

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

Абхарі Пеймана

УДК 621.77.014: 621.7. 043: 621.777.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ І УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ НА ОСНОВІ
РЕГУЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ ПЛАСТИЧНОГО
ФОРМОЗМІНЕННЯ**

**05.03.05 – процеси та машини обробки тиском,
13. – Механічна інженерія**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело _____ П. Абхарі

**Науковий консультант Алієв Іграмотдін Сєражутдінович,
доктор технічних наук, професор**

Краматорськ – 2019

АНОТАЦІЯ

Абхарі П. Розвиток наукових основ і удосконалення процесів точного об'ємного штампування на основі регулювання кінематики пластичного формозмінення. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05-процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2019.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування на базі розвитку наукових основ і удосконалення технологічних режимів та методів регулювання кінематики пластичного формозмінення. Рішення проблемних завдань пов'язано з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень і створенням математичних моделей процесів точного об'ємного штампування з регулюванням кінематики течії металу, створенням нових способів деформування і розробкою на їх основі методик проектування процесів.

Метою роботи є підвищення ефективності технологій точного об'ємного штампування на основі розвитку наукових основ і розробки технологічних способів деформування з регулюванням кінематики пластичної течії, які забезпечують підвищення продуктивності, якості виробів та економію ресурсів.

Теоретичні дослідження силового і напружено-деформованого стану заготовки в процесах точного об'ємного штампування виконано з використанням методу скінченних елементів і енергетичного методу балансу потужностей. Для експериментального дослідження характеру течії металу і формування пластичних зон осередків деформування використано фізичне моделювання. Метод фізичного моделювання також застосовувався для

вимірювання технологічних сил в поєднанні з методом математичного планування експерименту. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

На підставі проведеного літературного аналізу встановлено шляхи і проблеми розвитку процесів точного об'ємного штампування. Визначено основні напрями удосконалення області обробки тиском, які полягають у створенні і освоєнні нових способів деформування, заснованих на регулюванні кінематики формозміни і руху інструменту та спрямованих на розширення номенклатури одержуваних виробів і підвищення їх якості.

Для процесів закритої осадки на основі методу скінченних елементів встановлено умови формозмінення заготовки, зміну силових характеристик процесів видавлювання та сил розкриття матриць. Результати досліджень показали, що для процесу осадки характерним відхиленням форми є незаповнення кутів матриці. Встановлені основні фактори, які впливають на незаповнення кутів матриці, та умови їх регулювання.

Для підвищення точності заготовок дані рекомендації з вибору силових і геометричних параметрів процесу і регулювання кінематики руху інструменту. Для підвищення якості формоутворення рекомендовано застосування компенсатора та фасонної заготовки з технологічними порожнинами. Для усунення дефекту бочкоподібності рекомендованим є застосування профільованого інструменту, що також забезпечує достатній ступінь пропрацювання металу в порівнянні з традиційною схемою та підвищує якість готового виробу.

Реалізація на практиці процесу радіального видавлювання за різними кінематичними схемами деформування вимагає аналізу силового режиму, напружено-деформованого стану заготовки та умов розкриття півматриць. На основі енергетичного методу балансу потужностей дана оцінка силових характеристик та особливостей формоутворення заготовки при радіальному

видавлюванні з компенсатором циліндричної форми.

Для отримання фланців фасонної форми на різному рівні заготовки за схемами радіального видавлювання встановлені особливості формозміни заготовки і механізм утворення дефектів у вигляді утягнення. Встановлено вплив геометричних параметрів процесу на сили розкриття матриці. Методом скінченних елементів отримані діаграми залежності швидкості руху півматриці від розмірів деталі, що дозволяє отримувати бездефектні вироби. Запропоновано спосіб радіального видавлювання з редукуванням, який дозволяє знизити силу розкриття роз'ємної матриці.

Показана ефективність застосування операції підсадки фланцю, яка реалізується в тому ж штампі за рахунок рухомої півматриці. Отримання товстих фланців можливо поетапним деформуванням з двосторонньою подачею. Для реалізації процесів на виробництві розроблені схеми регулювання кінематики руху інструменту. На основі проведених скінченно-елементних досліджень встановлені умови деформування заготовки з урахуванням операції підсадки фланцю та отримані діаграми залежності швидкості руху півматриці від відносних висот фланцю, що дозволяють обрати співвідношення швидкості пуансону та верхньої півматриці для отримання бездефектного виробу.

На основі скінченно-елементного моделювання способів бокового видавлювання з одно- і двосторонньою подачею металу встановлені закономірності формоутворення відростків, які симетрично та несиметрично розташовані один відносно одного, відростків («перами») під кутом відносно до осі заготовки, що дозволило розширити номенклатуру отриманих виробів. Встановлено особливості силового режиму деформування і розкриття матриць, напружено-деформованого стану заготовки та формоутворення деталі з урахуванням кінематики руху півматриці.

На основі енергетичного методу балансу потужностей дано оцінки силових параметрів процесу видавлювання деталей з відростками,

розташованими на різній висоті. Встановлена нерівномірність розподілу приведенного тиску при поетапному заповненні відростків, що пов'язано з необхідністю подолання сил тертя при заповненні більш віддалених відростків.

Скінченно-елементний аналіз процесу отримання бокового відростку типу «пера» дозволив встановити стадії формоутворення та особливості напружено-деформованого стану деталі. Проведений порівняльний аналіз експериментальних та теоретичних даних показав, що відхилення теоретичних розрахунків не перевищувало допустимих значень.

Для процесу суміщеного радіального видавлювання деталей з фланцем встановлено особливості силового режиму з застосуванням енергетичного методу балансу потужностей та методу верхньої оцінки. Моделювання силового режиму дозволило оцінити оптимальне значення положення осередку деформування, що слугує параметром мінімізації процесу.

На основі методу скінченних елементів оцінено напружено-деформований стан заготовки в процесі суміщеного радіального та доцентрового видавлювання. Результати моделювання з залученням планування експерименту дозволило отримати аналітичні залежності у вигляді регресійних рівнянь з трьома змінними для оцінки енергосилових параметрів видавлювання, розкриття півматриць та опрацювання, а також умов формоутворення заготовки. На основі аналізу напружено-деформованого стану заготовки визначено значення вичерпання ресурсу пластичності.

Аналіз процесів комбінованого видавлювання складнопрофільованих деталей дозволив встановити умови виникнення дефектів типу утягнення, зажиму та прострілу. Дано рекомендації у вигляді діаграм залежності появи дефектів і швидкості руху матриці від відносних параметрів заготовки з одно- і двосторонньою подачею металу в осередок деформування.

Результати розрахунку методом скінченних елементів дозволили проаналізувати формозміну заготовки в процесі комбінованого

видавлювання пустотілих деталей з перемінною товщиною стінки. Для отримання деталей з різною товщиною стінки розроблено різні схеми кінематичного впливу на заготовку.

На основі уточнених та отриманих закономірностей силового та деформаційного режимів запропонована методика проектування процесів точного об'ємного штампування в закритих матрицях. Надані технологічні рекомендації з проектування процесів закритого радіального видавлювання фасонних фланців, бокового видавлювання відростків різної конфігурації поперечного перерізу та різного розташування відносно осі заготовки, що забезпечують отримання деталей без утворення дефектів, дозволяють обрати необхідні співвідношення геометричних параметрів і рекомендувати силовий режим та навантаження, які будуть діяти на інструмент.

Запропоновано ряд типів штампового оснащення, що включають в себе використання зажимних пристроїв для усунення розкриття матриць. Розроблені ресурсозберігаючі технології і креслення штампів передані та впроваджені на ряді підприємств. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано ряд способів, що розширюють технологічні можливості об'ємного штампування та дозволяють отримувати більш якісні вироби. Способи ТОШ захищені патентами України.

Отримані результати у вигляді розрахункових методик і проектних рекомендацій, а також дослідні установки для дослідження технологічних режимів процесів точного об'ємного деформування використовується в науково-дослідницькій практиці та навчальному процесі кафедри ОМТ ДДМА.

Ключові слова: точне об'ємне штампування, кінематика формозміни, силовий режим, сила розкриття, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, дефектоутворення.

ABSTRACT

Abhari P. Development of scientific foundations and improvement of precision forging processes based on kinematics control of plastic deformation. - Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the Doctoral degree of Technical Science in specialty 05.03.05 Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2019.

The growth of the metal forming industry has increased. This increase is due to development of new and more advanced equipments, presses and materials. Product quality, cost and time to market are three overriding issues in metal forming industry. Due to this, the use of finite element method based on computer aided design and engineering techniques for process simulation has been increasing each year. Recently, the numerical simulation techniques using the rigid-plastic finite element method (FEM) have been successfully applied to investigate the forming characteristics of various metal forming processes. The finite element software is used a direct iteration and Newton-Raphson methods to solve the nonlinear equations. Metal forming can be classified into cold, warm, and hot forging. In the metal forming processes, extrusion process is one of the most important processing methods in the manufacturing industry for producing different parts with various shapes such as flanges, branches and other geometric forms. In recent years, there has been a greater need for enclosed cold forging technology to provide precision parts with various shapes. Extrusion process with room temperature is type of cold forging process. Near net shape quality, excellent surface finished and improved mechanical properties are the most important advantages by using cold forging process. During the simulations by commercial software for plastic deformation as QForm2D/3D and Deform2D/3D, it is seemed that the tubular billet is rigid-plastic body and various tool parts are all rigid bodies. The cylindrical solid or tubular billet is located in the die cavity and is squeezed by multiple rams. The billet is compressed with one or two opposite rams movement and the billet material fills the die cavity.

By this process can be produced axisymmetric and non-axisymmetric parts.

There are principal types of extrusion process such as forward, backward, radial, lateral and combined. Defects occurring as folding defect during metal forming processes sometimes are caused. Control material flow is very important and necessary during extrusion processes by kinematical mechanism to predict and avoid defects.

The dissertation is aimed for solving important scientific and technical problems in improve efficiency of precision forging processes based on development of scientific foundations, technological regimes and kinematics control method of plastic deformation. Problems solving in different fields of precision forging processes are related with theoretical and experimental investigations, make a mathematical perfect models for the regulation of the kinematics in metal flow, make new methods to get precision parts with various forms of deformation and development of process design methods based on them.

The aim of the dissertation is to increase the efficiency of precision forging processes based on the development of scientific foundations and development of technological methods of deformation with the regulation of kinematics in metal plastic flow that provide to increase productivity and high quality product and resource savings.

Theoretical investigation of power mode and stress-strain state with various shapes of billets in precision forging processes are considered by using the finite element method and the power method of energy balance (upper bound method). For an experimental investigation of metal flow parameters and the formation of plastic zones in deformation, physical modeling was used. The method of physical modeling was also used to measure technological forces in combination with the method of mathematical planning in an experiment. To assess the accuracy of the results of experimental studies used methods of mathematical statistics. Based on definition of literary analysis, aims and problems in development of precision forging processes are considered. Principal aims in development of metal forming fields that consist of making and developing new methods in kinematics control, plastic deformations, die tools movement, expanding range of parts and improving parts quality are defined.

For enclosed upsetting based on finite element method, conditions of

shaping form, changes of power mode parameters in forming characteristics and force of matrix disclosures are determined. Investigation results are shown that for enclosed upsetting characteristic shape deviations are unfilling in corner of matrix part. To improve the accuracy of billets, recommendations for choice of power mode, geometric parameters, kinematics control and die tool movements in enclosed upsetting are considered. To improve the quality of shaping, the use of a compensator and a shaped blank with technological voids is recommended. To eliminate the barrel-shaped defect by custom-made use of a profiled tool, this also provides a sufficient degree of study of the metal in comparison with the traditional scheme and improves the quality of the finished product.

The practical implementation of the radial extrusion process according to different kinematic deformation schemes requires an analysis of the force mode, the stress-strain state of the billet and the opening conditions of the brewer. On the basis of the power method of power balance, the power characteristics and features of the shaping of the billet during radial extrusion with a cylindrical compensator are estimated.

To get flanges in various levels of billets with different of shaping form in schemes of radial extrusion process, various forming, deformation and mechanism of defect formation such as folding defect are defined. The material flow behavior and the influence of various factors involved in radial extrusion processes with mandrel were explored. Forming characteristics such as deformation patterns (gridlines distortion), distributions of effective strain and stress in two different schemes of radial extrusion process with mandrel, viz, single-ended and double-ended during the forming process with different forming parameters, and also to predict and avoid folding defect in theses processes have been investigated. In order to avoid folding defect and to make new material flow and to create a hollow parts without folding defect has been used a movable upper die in die schemes. Influence of process geometry parameters in force of matrix disclosures is determined. On the basis of the finite-element studies, the conditions for deformation of the billet taking into account the flange grafting operation and the resulting diagrams of the speed of movement of the matrix versus the relative heights of the flange were established, which allow choosing the ratio of the punch

speed and the top matrix to obtain a defect-free product.

On the basis of the finite element modeling of side extrusion with single and double-sided metal feed, the laws of shaping processes that are symmetrically and asymmetrically located relative to each other, processes (feathers) at an angle with respect to the axis of the billet, are established, which made it possible to expand the range of the obtained products. The features of the force mode of deformation and opening of the matrix, the stress-strain state of the billet and the shaping of the part are established taking into account the kinematics of the movement of the brewing matrix. Based on the energy method of power balance (upper bound method), estimates are given of the force parameters of the process of extrusion of parts with processes located at different heights. The uneven distribution of the reduced pressure during the gradual filling of processes has been established, which is connected with the need to overcome the friction forces during the filling of more distant processes.

The finite element analysis of the process of obtaining the lateral process of the (feather) type allowed us to establish the forming stages and the peculiarities of the stress-strain state of the part. A comparative analysis of experimental and theoretical data showed that the deviation of theoretical calculations did not exceed the permissible values. For the process of combined radial extrusion of parts with a flange, the features of the power mode are established using the energy method of power balance and the upper estimation method. Modeling of the force mode allowed us to estimate the optimal value of the position of the organization of deformation, which serves as a parameter to minimize the process.

Based on the finite element method, the stress-strain state of the billet in the process of combined radial and centripetal extrusion is estimated. The simulation results involving the planning of the experiment allowed us to obtain analytical dependencies in the form of regression equations with three variables for estimating the energy-force parameters of extrusion, the disclosure of the brewing matrix and mandrel, as well as the conditions for forming the blank. Based on the analysis of the stress-strain state of the billet, the value of plasticity resource exhaustion is determined.

Theoretical and experimental analyses of combined extrusion processes, to

make complex parts without defects such as lap, suction, collapse, cold shut and etc. are considered. It is very necessary accurate boundary conditions in combined extrusion processes to make precision parts. Recommendations to predict and avoid defect in the form of diagrams as velocity of die tool movements vs. relationship of billet parameters in single-ended and double-ended combined extrusion processes in material flow are determined. The results of the calculation by the finite element method made it possible to analyze the shape change of the billet in the process of combined extrusion of hollow parts with variable wall thickness. To obtain parts with different wall thickness, various schemes of kinematic impact on the billet have been developed.

On the basis of the refined and obtained laws of the force and deformation modes, a method of designing the processes of exact volumetric stamping in closed dies is proposed. Provided technological recommendations on the design of the processes of closed radial extrusion of shaped flanges, lateral extrusion of processes of various cross-sectional configurations and different locations relative to the axis of the billet, providing parts without the formation of defects, allow you to choose the necessary ratios of geometric parameters and recommend the force mode and load will act on the tool.

A number of types of die tooling are proposed, including the use of clamping devices to eliminate the opening of the dies. The developed resource-saving technologies and stamp designs have been transferred and implemented at a number of enterprises. According to the results of theoretical and experimental studies, a number of methods have been proposed that expand the technological capabilities of die forging and allow obtaining better products. Ways of Tosh are protected by patents of Ukraine.

The results obtained in the form of computational methods and design recommendations, as well as research facilities for the study of technological regimes of exact volumetric deformation processes are used in research practice and the educational process of the department of MF DSEA.

Key words: precision forging process, kinematics of shaping form, power mode, force of matrix disclosures, finite element method, stress-strain state, defect formation.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов : научное издание. – Монография – Днепропетровск, 2014. – Том 1. – С. 192–196.

2. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // XVI International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Series : Monographs. – Czestochowa, 2015. – №48. – P. 90–93.

3. Abhari Payman. Investigation of load on the tools in precision radial extrusion process with multiple ram /Payman Abhari // XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»:Series: Monographs. – Nr 56. – Częstochowa, 2016 – P. 330–333.

4. Abhari Payman. Investigation of fracture moment in radial extrusion process by finite element method / Payman Abhari // XVIII International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics. – Series: Monographs. – Częstochowa, 2017. – Nr 68. – C. 97–101.

5. Abhari Payman. Numerical simulation of cold forging process to investigate folding defect in enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2 (80). – p. 71–77. – ISSN 2521-1943, <http://journal.mmi.kpi.ua/author/submission/109198>, DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.96079>.

6. Abhari Payman. Finite Element Simulation of Flashless Radial Extrusion Process / Payman Abhari, Igramotdin Aliiev // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 14, Issue 4 Ver. III (Jul. – Aug. 2017), PP 79 – 83

[http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14\(4\)Version-3.html](http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14(4)Version-3.html), DOI: 10.9790/1684-1404037983.

7. Abhari Payman. The study of folding defects during the radial-forward extrusion in the enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Science and Research (IJSR). – July 2017. – Volume 6. – Issue 7. – p. 1746–1749. – ISSN: 2319-7064, <https://www.ijsr.net/archive/v6i7/ART20175702.pdf>, DOI: 10.21275/ART20175702.

8. Abhari Payman. Application of Numerical Simulation to Investigate Material Flow in Hollow Radial Extrusion/ Payman Abhari // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET). – July-August-2017. – Volume 3. – Issue 5. – p. 556–560. – ISSN 2394-4099. – <http://ijsrset.com/archive.php?v=6&i=18&pyear=2017>, DOI :10.32628/IJSRSET1734145.

9. Abhari Payman. The investigation of lateral extrusion process using finite element simulation / Payman Abhari // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET). – August 2017. – Volume 5. – Issue VIII. – p. 1703–1707. – ISSN 2321-9653. <http://ijraset.com/archive-detail.php?AID=60>, DOI: 10.22214/ijraset.2017.8242.

10. Abhari Payman. Computer-aided simulation to investigate material flow in combined-radial extrusion / Payman Abhari // International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT). February 2018. – Volume 4. – Issue 2.– p. 24–28.– ISSN: 2454-6135.– DOI: 10.7324/IJERAT.2018.3187, Doiurl <http://dx.doi.org/10.7324/IJERAT.2018.3187>, <https://ijerat.com/index.php/admin/archiveissue?issueid=410>.

11. Прогнозирование дефектообразования при комбинированном выдавливании в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 63–67.

12. Алиева Л. И. Силовые режимы радиального выдавливания деталей с высоким фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // Кузнечно-

штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4. – С. 24–26.

13. Напряженно-деформированное состояние поковок в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова, Г. П. Клименко // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – Темиртау, 2014. – №1 (4). – С. 9–12.

14. Косенко М. В. Выдавливание полых конических деталей / М. В. Косенко, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С.350-352.

15. Совершенствование технологии деформирования осесимметричных поковок / О. Е. Марков, Л. Н. Соколов, С. В. Янчук, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 295–298.

16. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 1 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2005. – №2 – С.24-29.

17. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 2 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2006. – №3 (5)– С.97-102.

18. Алиев И. С., Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала Сообщение 3 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2008. – № 1(11). – С. 7–12.

19. Алиева Л. И. Анализ заполнения полости штампа в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – Київ, 2011. – № 63. – С. 285–288.

20. Прогнозирование дефектообразования в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. В. Патык // Вісник національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. – Харків, 2011. – № 47. – С. 140–145.

21. Алиева Л. И. Анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании методом измерения твердости / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Обработка материалов давлением: сб. научн. труд. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 30–33.

22. Абхари П. Б. Формоизменение трубчатой заготовки в процессе раздачи / П. Б. Абхари, О. В. Патык // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 26–30.

23. Алиев И. С. Исследование формоизменения силового режима процесса бокового выдавливания методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків, 2013. – № 42 (1015). – С. 7–13.

24. Алиева Л. И. Определение величины утяжины в процессе радиально-продольного выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків, 2014. – № 44 (1087). – С. 3–7.

25. Абхари П. Б. Теоретический анализ процесса выдавливания деталей с фланцем в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Херсонського національного технічного університета. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 11–18.

26. Абхари П. Б. Теоретический анализ процесса выдавливания деталей с фланцем в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Херсонського національного технічного університета. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 11–18.

27. Пат. 116545 Україна, В 21 J 5/00. Спосіб виготовлення деталей з фланцем / П. Абхарі, Л. І. Алієва, Р. І. Сивак, А. А. Єр'оміна, заявник і

патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612441; заявл. 06.12.2016; опубл. 25.05.2017. Бюл. №10. – 5 С.

28. Пат. 117796 Україна, МПК В21К 21/00, В21С 23/20, В21J 5/00. Спосіб отримання порожнистих виробів з тонким дном / Алієва Л. І., Абхари П., Гончарук Х. В., Таган Л. В.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201700272; заявл. 10.01.2017; опубл. 10.07.2017. – Бюл. № 13. – 4 С.

29. Пат. 122023 Україна, МПК В21К 21/08. Спосіб отримання порожнистих виробів з фланцем / Абхари П., Алієва Л. І., Таган Л. В., Картамишев Д. О.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201706444; заявл. 23.06.2017; опубл. 26.12.2017. – Бюл. № 24. – 5 С.

30. Алиева Л.И. Радиальное выдавливание втулок с фланцем / Л. И. Алиева, П. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С. 6.

31. Абхари П. Конечно-элементный анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании / П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 173–174.

32. Абхари П. Исследование формоизменения в процессах радиального выдавливания / П. Абхари, Л. И. Алиева // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С. 6.

33. Алиев И. С. Кинематические варианты бокового выдавливания деталей с отростками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – С. 9.

34. Алиев И. С. Особенности штамповки в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. В. Цыганенко // Машины та пластична деформація металів. Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. – Запоріжжя, 2012. – С. 70–71.

35. Абхари П. Б. Моделирование закрытой штамповки поковок типа «крестовин» методом конечных элементов / П. Б. Абхари, О. А. Жукова, О. В. Патык // Всеукраинская научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь 2013». – Краматорск. – С. 22.

36. Алиев И. С. Боковое выдавливание деталей с отросткам / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2013 – С. 16.

37. Abhari P. Modeling simulation for fleshless precision forging process with finite element method / P. Abhari, O. A. Zhykova // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013.– С. 98.

38. Абхари П. Б. Моделирование процесса бокового выдавливания деталей с наклонными отростками в форме наклонных перьев / П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И. А. Норицина. – Москва, 2013. – С. 251–252.

39. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов. Материалы X Международной научно-технической конференции. – Днепропетровск : Национальная металлургическая академия Украины, 2014 – С. 25.

40. Алієв І. С. Дослідження силового режиму в процесі видавлювання

деталей з бічними відростками в роз'ємних матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ. – Київ: НТТУ «КПІ», 2014 – С. 10–12.

41. Алиев И. С. Штампы с разъемными матрицами для закрытой штамповки / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию кафедры «Обработка металлов давлением» – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – С. 4.

42. Абхари П. Б. Моделирование комбинированного выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, К. В. Гончарук, Л. К. Паращенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 9–10.

43. Алиев И. С. Моделирование кинематических вариантов бокового выдавливания деталей с отростками / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 12–13.

44. Алиева Л. И. Определение энергосиловых параметров совмещенного радиального выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением. Материалы Международной научно-технической конференции. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 28–32.

45. Алиев И. С. Боковое выдавливание отростков в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIII

Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 8–9.

46. Алиев И. С. Моделирование процесса бокового выдавливания отростка в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Сучасні технології промислового комплексу. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2015. – Випуск 2. – С. 7.

47. Алиев И. С. Дефектообразование при штамповке в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 85-річчю створення кафедри обробки металів тиском в НТУУ «КПІ», 2015 – С. 10–15.

48. Абхари П. Б. Напряженно-деформированное состояние осесимметричных заготовок при штамповке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 64–67.

49. Абхари П. Б. Исследование деформированного состояния деталей с фланцем в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – С. 8–9.

50. Абхари П. Б. Усилия раскрытия полуматриц при радиальном выдавливании фланцев на оправке / П. Б. Абхари // Сучасні технології промислового комплексу-2016. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон, 2016. – С. 125–127.

51. Абхари П. Б. Прогнозирование возникновения дефекта утяжины в процессе радиального выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Кременчук, 2016. – С. 32–34.

52. Абхари П.Б. Моделирование процесса закрытой осадки методом конечных элементов / П. Б. Абхари // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Киев : НТУ «ХПИ», 2016 – С. 3–5.

53. Алієв І. С. Удосконалення технологічного оснащення процесів штамповки у роз'ємних та рухливих матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари // Пластична деформація металів. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Дніпро : Національна металургійна академія України, 2017. – С. 43–44.

54. Абхари П. Б. Исследование силового режима процесса точной объемной штамповки несимметричных изделий в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2017. – С. 87–88.

55. Абхари П. Б. Конечно-элементное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей / П. Б. Абхари / Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Том 1. – Мариуполь ПГТУ, 2017. – С. 192–194.

56. Абхари П. Б. Выдавливание деталей с боковыми отростками / П. Б. Абхари // Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції: збірник тез доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 14–15.

57. Способы управления формообразованием деталей при выдавливании / Алиева Л. И., Абхари П. Б., Ибрагимов А. И., Корденко М. В. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПИ», 2017. – С. 8–10.

Додатково наукові результати дисертації відображені в роботах:

58. Марков О.Е. Особенности комбинированнойковки прокатных валов с осадкой слитка на плите с отверстием / О.Е. Марков, П. Абхари, С.В. Янчук // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском: наук.-практ. конф. – Краматорськ, ДДМА, 2007. – С. 70. – ISBN 5-77-63-1585-9.

59. Исследование энергосиловых параметров в процессе бокового выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина, В. Т. Лебедь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 13–17.

60. Алиев И. С. Технологические процессы штамповки радиальным выдавливанием в закрытых штампах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 166–172.

61. Разработка штампов для выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, Л. И. Алиева, И. С. Алиев, А. А. Ерёмина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 223–321.

62. Абхари П. Б. Силовой режим процесса радиального выдавливания фланца на оправке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 11–16.

63. Марков О.Е. Компьютерное моделирование процессовковки / О.Е. Марков, П. Абхари // Энергомашспецсталь: I наук.-техн. конф. молодых ученых та спеціалістів ОАО „ Энергомашспецсталь-2007”. – Краматорськ, 2007. – С. 27–29.

64. Марков О.Е. Моделирование процессаковки валов из слитков / О.Е. Марков, П. Абхари // IX Всеукр. наук.-практ. конф. «Технологія-2006». – Сєверодонецьк, 2006. – С. 15–16.

65. Марков О.Е. Моделирование процессовковки МКЭ / О.Е. Марков, П. Абхари // „Азовмаш 2006”: I міжнар. наук.-техн. конф. – Маріуполь, 2006. – С. 57–58.

66. Алиев И. С. Моделирование формоизменения в процессе бокового выдавливания / О. А. Жукова, П. Б. Абхари, И. С. Алиев // Матеріали загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Механіка пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів». – Київ : НТТУ «КПІ», 2014. – С. 64–66.

67. Абхари П. Б. Кинематические варианты в закрытой штамповке деталей с фланцем / П. Б. Абхари, А. А. Еремина, А. С. Кучма // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 11.

68. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания / Л. И. Алиева, Я.Г. Жбанков, Н.С. Грудкина, П.Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 148–152.

69. Алиев И. С. Формоизменение полых деталей с фланцем в процессе холодного выдавливания / И. С. Алиев, П. Б. Абхари // Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Мариуполь ПГТУ, 2017. –Том 1. – С. 190–191.

70. Абхари П. Б. Исследование формоизменения заготовки в процессе осадки профилированным инструментом / Абхари П. Б., Самоглядов А. Д. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 5–6.

ЗМІСТ

ВСТУП	28
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ	36
1.1 Технологічні аспекти процесів точного об'ємного штампування	36
1.2. Дефектоутворення в процесах точного об'ємного штампування і кінематика руху металу	50
1.3 Теоретичні та експериментальні методи рішення задач пластичного формозмінення	57
1.4 Аналітичний аналіз процесів об'ємного штампування	76
1.5 Особливості конструювання штампів з роз'ємними і рухомими матрицями	117
Висновки	121
2 ВИБІР НАПРЯМІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	123
2.1 Вибір напрямів дослідження	123
2.2 Методика проведення теоретичних досліджень	127
2.3 Методика проведення експериментальних досліджень	142
Висновки	158
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАКРИТОЇ ОСАДКИ	159
3.1 Особливості процесу закритої осадки	159
3.2 Моделювання напружено-деформованого стану заготовки і кінематика течії металу в процесі закритої осадки	162
3.3 Регулювання кінематики руху інструменту при закритій осадці	176
3.4 Моделювання впливу кінематики руху інструменту та геометричних параметрів процесу закритої осадки	180
3.5 Кінематика процесу калібрування заготовок	186
3.6 Експериментальне дослідження процесу закритої осадки	188
Висновки	192

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАКРИТОГО РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ	194
4.1 Закрите радіальне видавлювання фланця з односторонньою подачею	194
4.1.1 Моделювання процесу закритого радіального видавлювання різнотовщинних фланців	196
4.1.2 Дослідження впливу геометричних параметрів видавлювання на силові характеристики процесу	200
4.1.3 Особливості формоутворення заготовок при радіальному видавлюванні в конічну порожнину	208
4.1.4 Модель процесу радіального видавлювання фланця з компенсатором	217
4.1.5 Параметри процесу радіального видавлювання фланця з редукуванням	229
4.2 Кінематика формозмінення заготовки при радіальному видавлюванні фланця	242
4.3 Кінематика процесу формоутворення деталей з фланцем на основі комбінування операцій видавлювання і підсадження	251
4.4 Оцінка використання ресурсу пластичності металу при радіальному видавлюванні в роз'ємних матрицях	256
4.5 Визначення параметрів силового режиму кінематичних варіантів радіального видавлювання методом планування експерименту	261
4.6 Дослідження процесу утворення дефектів типу утягнень при радіальному видавлюванні фланця на оправці	269
4.6.1 Особливості бездефектного формоутворення заготовок при радіальному видавлюванні	270
4.6.2 Регулювання кінематики процесу радіального видавлювання фланця	277
4.7 Визначення залежності приведенного тиску радіального видавлювання в рухомій матриці енергетичним методом	288

4.8 Експериментальне дослідження процесу радіального видавлювання і його кінематичних варіантів	298
Висновки	315
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БОКОВОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВІДРОСТКАМИ	318
5.1 Кінематичні варіанти отримання деталей з відростками	318
5.2 Аналіз силового режиму бокового видавлювання по кінематичному варіанту з односторонньою подачею металу методом верхньої оцінки	320
5.3 Дослідження силових характеристик процесу бокового видавлювання деталей з відростками, розташованими на різній висоті, енергетичним методом балансу потужностей	327
5.4 Дослідження силового режиму видавлювання деталей з відростками плоскої форми	330
5.5 Дослідження кінематичних варіантів бокового видавлювання фасонних відростків в роз'ємних матрицях	334
5.5.1 Моделювання процесу бокового видавлювання відростка прямокутного і круглого перерізу при односторонній подачі в роз'ємних матрицях	334
5.5.2 Моделювання процесу бокового видавлювання відростка прямокутного і круглого перерізу при двосторонній подачі в роз'ємних матрицях	340
5.5.3 Аналіз процесу формоутворення відростка різної конфігурацією на торці стрижня боковим видавлюванням	346
5.5.4 Аналіз кінематичних характеристик деформування при боковому видавлюванні порожнистого відростку круглого і квадратного перерізу при двосторонньої подачі	351
5.5.5 Особливості силового режиму бокового видавлювання ступінчастих відростків	352

5.6 Дослідження силових режимів процесу бокового видавлювання відростків зі зміщеними осями методом скінченних елементів	358
5.7 Формоутворення та силовий режим процесу бокового видавлювання відростків типу «пера»	364
5.8 Експериментальне дослідження схем бокового видавлювання	370
Висновки	382
6 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО ТА СУМІЩЕНОГО ДЕФОРМУВАННЯ	385
6.1 Моделювання процесу суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями	385
6.1.1 Аналіз силового режиму суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями методом верхньої оцінки	385
6.1.2 Дослідження силових характеристик суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями енергетичним методом балансу потужностей	390
6.1.3 Моделювання силового режиму процесу суміщеного радіального видавлювання деталі типу втулка з фланцями на основі планування експерименту	397
6.2 Визначення ступеню використання ресурсу пластичності на основі методу скінченних елементів	405
6.3 Аналіз кінематики формозмінення для усунення дефектів типу утягнення	412
6.4 Моделювання процесу радіально-прямого видавлювання	417
6.4.1 Дослідження напружено-деформованого стану та силового режиму при радіально-прямому видавлюванні	418
6.4.2 Дефектоутворення при радіально-прямому видавлюванні складнопрофільованих деталей	420
6.5 Моделювання процесу видавлювання порожнистих деталей з перемінною товщиною стінки	424

6.5.1 Аналіз силового режиму видавлювання порожнистих деталей з перемінною товщиною стінки методом верхньої оцінки	424
6.5.2 Дослідження формоутворення процесу видавлювання пустотілих деталей зі змінною товщиною стінки методом скінченних елементів	430
6.6 Формоутворення складнопрофільованих деталей способами комбінованого видавлювання на основі регулювання кінематики течії металу	435
6.6.1 Усунення дефектів типу «простріл» при формоутворенні складнопрофільованих деталей комбінованим видавлюванням	435
6.6.2 Усунення дефектів типу «зажим» при комбінованому видавлюванні складнопрофільованих деталей	438
6.7 Експериментальне дослідження процесів комбінованого видавлювання	453
Висновки	468
7 УДОСКОНАЛЕННЯ, РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ	471
7.1 Послідовність проектування технологічного процесу точного об'ємного штампування	471
7.2 Розробка штампового оснащення з регулюванням кінематики формозмінення	488
7.3 Удосконалення процесів об'ємного штампування та розширення їх технологічних можливостей на основі управління кінематикою формоутворення деталей	519
7.4 Розробка технологій об'ємного штампування	527
Висновки	536
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	537
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	541
ДОДАТОКИ	577

Актуальність теми. Однією з основних тенденцій розвитку сучасного машинобудування є розробка та впровадження нових наукових технологій, що підвищують якість виробів і знижують собівартість їх виготовлення. Від технологій заготівельного виробництва багато що залежить: як ресурсозбереження, так і отримання якісних виробів, а отже, і конкурентоспроможність кінцевої продукції.

Одним з важливих напрямків вирішення зазначених проблем металообробних галузей промисловості є освоєння технологічних процесів точного об'ємного штампування (ТОШ) складнопрофільованих деталей і заготовок із заданими експлуатаційними характеристиками. Процеси ТОШ демонструють стійку тенденцію до розширення області використання і зростання обсягів продукції, що випускається. Для вирішення таких проблемних питань і завдань ТОШ, як поліпшення якості і собівартості продукції, підвищення надійності інструменту і продуктивності обробки, розробляються нові технологічні способи, оснащення та обладнання для формоутворення деталей з меншими питомими і повними навантаженнями та меншим числом операцій. Серед таких способів можна виділити об'ємне штампування в закритих, роз'ємних і рухливих матрицях поперечного та комбінованого видавлювання, в яких передбачено ефективне управління формоутворенням деталей, напружено-деформованим станом (НДС) заготовки, силовим і деформаційним режимами процесів за допомогою регулювання кінематики пластичної формозміни і руху деформуючого інструменту.

Незважаючи на перспективність і ефективність, освоєння нових процесів ТОШ відстає від потреб виробництва. Реалізація нових способів штампування і розширення можливостей відомих способів вимагає пошуку оптимальних режимів обробки, оцінки впливу кінематичних параметрів на

НДС заготовки, дефектоутворення і силовий режим, що включає як активні сили деформування, так і реактивні сили розкриття матриць.

Рішення даних проблемних завдань пов'язано з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень і створенням математичних моделей процесів ТОШ з регулюванням кінематики течії металу, створенням нових способів деформування і розробкою на їх основі методик проектування процесів.

Зважаючи на викладене, науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів ТОШ на основі розвитку наукової бази, математичних моделей і удосконалення процесів деформування з регулюванням кінематики формозміни є актуальною і сучасною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Новітні технології і ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі». Робота виконана на кафедрі «Обробка металів тиском» (ОМТ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0111U000174, 0115U004736 – виконавцем, і 0117U001164, де здобувач був відповідальним виконавцем), а також у рамках договірних науково-дослідних робіт з підприємствами.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності технологій точного об'ємного штампування на основі розвитку наукових основ і розробки технологічних способів деформування з регулюванням кінематики пластичної течії, які забезпечують підвищення продуктивності, якості виробів та економію ресурсів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі актуальні задачі:

- аналіз напрямків, методів і рішень практичних і теоретичних завдань

для створення і реалізації ресурсозберігаючих технологій ТОШ;

- розробка чисельних математичних моделей для розрахунку силового режиму, формозміни і напружено-деформованого стану заготовки в процесах осесиметричної і плоскої деформації в умовах закритого штампування в рухомих матрицях;

- аналіз закономірностей зміни напружено-деформованого стану, силового і деформаційного режиму з регулюванням кінематики пластичної течії на основі математичних моделей в залежності від геометричних та кінематичних параметрів технологічних процесів комбінованого та бокового видавлювання;

- удосконалення процесів об'ємного штампування на основі урахування кінематики течії та перевірки адекватності математичних моделей і припущень, прийнятих при теоретичному аналізі процесу;

- розробка на основі проведених досліджень нових технічних і технологічних рішень, які розширюють можливості і підвищують конкурентоспроможність вивчених процесів для створення технологій виготовлення виробів методом точного об'ємного штампування на основі регулювання кінематики формозмінення заготовки;

- розробка на основі теоретичних та експериментальних досліджень технологічних режимів процесів ТОШ, систематизація технологічних рекомендацій, методик проектування для впровадження результатів досліджень в практику промислового виробництва та навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Технологічні процеси точного об'ємного штампування.

Предмет дослідження. Закономірності силового і деформаційного режимів пластичного формозмінення, напружено-деформованого стану металевих заготовок, способи регулювання кінематики формозмінення.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження силового і напружено-деформованого стану заготовки в процесах точного об'ємного штампування

виконано з використанням методу скінченних елементів і енергетичного методу балансу потужностей. Для експериментального дослідження характеру течії металу і формування пластичних зон осередків деформування використано фізичне моделювання. Метод фізичного моделювання також застосовувався для вимірювання технологічних сил в поєднанні з методом математичного планування експерименту. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні її основні положення:

1. Вперше на основі енергетичного методу балансу потужностей та методу скінченних елементів розроблено комплекс математичних моделей процесів точного штампування заготовок в закритих і роз'ємних матрицях та деталей різної конфігурації і встановлені залежності силового режиму та технологічних і конструктивних особливостей процесу формоутворення, які відрізняються врахуванням сил розкриття роз'ємних матриць, напружено-деформованого стану заготовки, використання яких дозволяє визначити технологічні режими з урахуванням кінематичних та геометричних параметрів процесу.

2. Вперше на основі методу скінченних елементів виявлені умови появи дефекту типу прострілів в порожнистих деталях з профільованою поверхнею та побудовані граничні криві для зон бездефектного деформування з урахуванням схеми закритого штампування та параметрів процесу, що дозволило запропонувати спосіб двоперехідного комбінованого деформування з усуненням дефектів форми деталей.

3. Отримали подальший розвиток на основі методу скінченних елементів закономірності формоутворення деталей з фланцем в процесах об'ємного штампування видавлюванням, які, на відміну від існуючих, враховують вплив кінематики подачі металу в приймальну порожнину матриці, що забезпечує

зниження нерівномірності деформацій і регулювання силового режиму процесу.

4. Уточнені особливості формозмінення заготовок в процесах видавлювання трубчатих деталей типу втулок з масивним фланцем, які, на відміну від існуючих, засновані на керуванні течією металу за рахунок узгодження швидкостей переміщення пуансона і рухомої матриці, що дозволило підвищити якість та розширити номенклатуру отримуваних деталей.

5. Отримали подальший розвиток закономірності зміни напружено-деформованого стану стрижневих деталей, що штампуються, способом радіального видавлювання; суть новизни полягає в тому, що враховує включення в процес формоутворення схем висадки на різних етапах видавлювання, що дозволило обґрунтувати та поширити технологічні можливості процесів штампування і шляхи спрощення конструкції штампового оснащення з роз'ємними матрицями.

6. Вперше теоретичним та фізичним моделюванням виявлені умови та механізм утворення дефектів типу утягнень в зоні дна порожнистих деталей з глухим отвором і встановлено фактори, які здійснюють найбільший вплив на кінематику течії металу та процес появи відхилень форми, що дозволило обґрунтувати і запропонувати новий спосіб бездефектного холодного видавлювання з формуванням тимчасових технологічних буртів в придонній зоні деталі.

Практична цінність отриманих результатів. Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки.

- розрахункові залежності, за допомогою яких вивчені та обґрунтовані режими нових процесів точного об'ємного штампування з урахуванням кінематичного впливу та геометрії інструменту;

- залежності з розрахунку основних технологічних параметрів різних способів видавлювання, які дозволяють раціоналізувати процеси закритого штампування і застосувати уніфіковані розрахункові схеми, що спрощує

технологічну підготовку виробництва і вибір технологічних варіантів;

- визначено раціональні технологічні схеми формозміни заготовок, напружено-деформований стан заготовки і силові режими процесів, розроблені нові процеси точного об'ємного штампування;

- науково-обґрунтовані рекомендації і методики проектування технологічних процесів виготовлення осесиметричних і неосесиметричних виробів, штампи для виготовлення складнопрофільованих деталей.

Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних продуктів, технічних рішень і практичних рекомендацій використані на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ПАТ «Дружківський завод металевих виробів» (м. Дружківка), ТОВ «Укртехконтакт» (м. Бахмут). Окремі положення дисертації використовуються на кафедрі ОМТ ДДМА в рамках викладання ряду спеціальних дисциплін, а також при виконанні науково-дослідних робіт, курсових та дипломних проектів студентами спеціальності 136 «Металургія».

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати автором отримані самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автору належить розробка математичних моделей, алгоритмів і програмних засобів, участь в проведенні експериментів, аналіз та узагальнення результатів теоретичних, а також експериментальних досліджень, розробка практичних рекомендацій та участь у впровадженні їх в промислове виробництво процесів ТОШ. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора описаний додатково у коментарях до списку робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних, всеукраїнських та регіональних науково-технічних (НТК) та науково-практичних конференціях (НПК), в тому числі: XVI – XXI міжнародних НТК (МНТК) «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки

тиском» (м. Краматорськ, ДДМА, 2011 – 2018 pp.); VII – XIV МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, ДДМА, 2011 – 2016 pp.); V Всеукраїнська НТК молодих спеціалістів «Енергомашспецсталь – 2013» (м. Краматорськ, 2013 p); XVI – XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», (Czestochowa, 2015 – 2017 pp); МНТК «Прогрессивные методы и технологическая оснастка процессов обработки металлов давлением» (Санкт Петербург, 2014 p); МНТК «Современные технологии обработки давлением: моделирование, проектирование, производство», присвячена 70-річчю кафедри МТОМД МГТУ «МАМІ», (Москва, 2013 p); XI МНТК «Пластична деформація металів» (Дніпро, 2017); МНТК «Університетська наука - 2017» (м. Маріуполь, 2017 p); МНТК «Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (м. Вінниця, 2011 p); Всеукраїнській НТК «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки» (м. Вінниця, 2017 p); II МНТК «Машини та пластична деформація металів» (м. Запоріжжя, 2012 p); IX МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (Харків, 2017 p); I, II Всеукраїнській НТК «Сучасні технології промислового комплексу», (м. Херсон, 2015, 2016 pp.); IV – VIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ, 2013 – 2017 pp.); Всеукраїнській НТК «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту», (м. Кременчук, 2016 p.), на НТК професорсько-викладацького складу ДДМА (м. Краматорськ, 2011 – 2018 pp.); на розширених наукових семінарах ХНТУ (м. Херсон, 2017), НТУУ «ХПІ» (м. Харків, 2017 p.), НТУУ «КПІ» (м. Київ, 2018 p.), а також на щорічних наукових конференціях ДДМА (м. Краматорськ 2011 – 2018 pp.) та об'єднаному науковому семінарі кафедри ОМТ ДДМА (м. Краматорськ, 2018 p.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 70 роботах, в тому числі: 4 колективні монографії, 13 статей в фахових виданнях України, 12 – у зарубіжних виданнях (11 статей опубліковано в наукових журналах, внесених до міжнародних наукометричних баз даних), 9 статей опубліковано без співавторів, 29 робіт – в матеріалах міжнародних конференцій. На нові технічні рішення отримано 3 патенти України на корисну модель.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи 648 сторінок, в тому числі 274 сторінки основного тексту, 317 рисунки та 42 таблиць, список використаних джерел з 312 найменувань та 7 додатків.

Автор висловлює щире подяку науковому консультанту професору Алієву І.С. за поради і консультації, а також співробітникам, аспірантам і докторантам кафедри ОМТ ДДМА за допомогу при проведенні експериментальних досліджень і оформленні дисертації.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

1.1 Технологічні аспекти процесів точного об'ємного штампування

В області ковальсько – штампувального виробництва в останні роки досить інтенсивно проводилися наукові дослідження, спрямовані на поліпшення якості одержуваних деталей, економію ресурсів, поліпшення умов праці і т.п. У зв'язку з цим широкий спектр інформації, що публікується сьогодні, присвячений вирішенню різних задач технології кування і штампування, що сприяють забезпеченню вищевказаних вимог. Відзначається, що чільну роль сьогодні у виробництві і збуті будь-яких виробів, особливо експортованих, грає їх якість, а не низька ціна. Тому виконання технічних вимог, що пред'являються до якості металу, реалізується на основі сертифікації. Для забезпечення необхідної якості виробів в процесах ОМТ важливу роль відіграє дотримання умов деформування [1].

Інтенсифікація, комплексна механізація і автоматизація процесів штампування можливі на основі удосконалення технології штампування і пошуку нових прогресивних напрямків пластичного деформування металів і матеріалів. У здійсненні цих задач значну роль відіграє всебічне вивчення та дослідження параметрів процесів обробки металів тиском і, зокрема, процесів штампування [2].

Розвиток заготівного виробництва українського машинобудування особливо ресурсозберігаючих процесів точного об'ємного штампування (ТОШ) видавлюванням в сучасних умовах вимагає розробки нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів отримання заготовок, основна вимога до яких – забезпечення отримання високоякісних деталей у великих кількостях і з мінімальною вартістю. Рішенням цієї задачі, з урахуванням все більш ускладненої форми деталей, є застосування

маловідходних способів отримання виробів, розробка та освоєння нових технологічних способів деформування, що забезпечують отримання точних заготовок, максимально наближених за формою і розмірами до контурів готових деталей.

У найбільш загальному випадку виробнича система точного об'ємного штампування може бути представлена у вигляді сукупності об'єктів, пов'язаних між собою впорядкованими матеріальними і інформаційними потоками, функціонування яких спрямоване на досягнення певних цілей. При цьому основою будь-якого виробничого процесу є технологічний процес, що містить цілеспрямовані дії по перетворенню стану предмета праці.

У зв'язку з цим, аналіз стану технології точного об'ємного штампування видавлюванням доцільно виконати з точки зору здатності тих чи інших рішень (способів і технічних засобів) до поліпшення критеріїв розвитку на даному рівні виробництва. Задачею такого аналізу є найбільш повне уявлення наявних обмежень і протиріч між існуючими потребами і досягнутими можливостями.

Розробка і впровадження нових відповідних матеріалів для процесів точного об'ємного штампування, освоєння нових інструментальних матеріалів для штампів видавлювання, нових технологій виготовлення, термічної обробки, зміцнення і вдосконалення поверхневого шару інструменту сприяють підвищенню надійності технологічної системи і розширення області застосування процесів видавлювання[3, 4, 5].

Значний внесок у розвиток і становлення технології ТОШ видавлюванням внесли А. Е. Артес, А. В. Тітов, Е. П. Басалаев, Я. Ю. Бейгельзімер, М. З. Єрманок, К. М. Богоявленський, А. Л. Воронцов, В. А. Головін, Ю. І. Гуменюк, А. М. Дмитрієв, В. І. Дорошко, А. В. Євдокимов, В. В. Євстифєєв, В. А. Євстратов, В. Л. Калюжний, Д. П. Кузнецов, В. А. Кроха, Е. Н. Ланський, А. В. Лясніков, А. Н. Мітькін, Б. С. Мороз, Г. А. Навроцький, А. Г. Овчинніков, В. А. Огородніков, Л. Д. Оленін, В. Г. Паршин, І. Л. Перлін, І. П. Ренне, В. В. Ріс, О. А. Розенберг,

І. О. Сівак, В. З. Спусканюк, В. І. Стеблюк, Л. Г. Степанський, В. Є. Фаворський, Ю. Ф. Філімонов, Ю. К. Філіппов, П. Д. Чудаков, Л. А. Шофман, С. П. Яковлєв, Р. Гейгер, К. Ланге, Х. Кудо, Х. Л. Д. П'ю, Г. Д. Фельдман, В. Фелькнер, Д. Єверхардт та багато інших вчених.

Залежно від температури нагрівання заготовки процеси точного об'ємного штампування діляться на холодну (ХОШ), напівгарячу (НГОШ) і гарячу (ГОШ) об'ємну штамповку [6, 7]. Технологічні можливості процесів ХОШ, НГОШ і ГОШ, реалізовані в автомобільній промисловості ряду зарубіжних країн (ФРН, Японія, США і т.д.), відображені в табл. 1.1 [8]. Зіставлення переваг процесів дозволяє зробити висновок про перспективність подальшого розвитку, в першу чергу ХОШ і НГОШ.

Холодне видавлювання, здійснюване без нагріву заготовки, коли її температура значно нижча за температуру рекристалізації, найкращим чином задовольняє вимогам виробництва. При холодному видавлюванні в порівнянні з гарячим і напівгарячим найкоротший технологічний цикл і легше забезпечується висока якість порожнини, що виготовляється, по точності розмірів і чистоти поверхні [9].

Застосування холодного видавлювання в 2...6 разів і більше знижує собівартість деталей прес-форм і штампів. Холодне видавлювання застосовують набагато частіше, ніж гаряче і напівгаряче, однак ще недостатньо.

В останні роки зросла увага дослідників до цього процесу, але технологічні можливості холодного видавлювання виявлені ще не повністю, відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо розрахунку деяких технологічних параметрів процесу (наприклад, допустимої величини деформації), потребують уточнення запропоновані залежності (наприклад, формули для розрахунку сили деформування) [10].

У порівнянні з іншими засобами видавлювання найбільші технологічні можливості має закрите видавлювання в роз'ємних матрицях, при якому

Таблиця 1.1 – Технологічні можливості процесів ХОШ, НГОШ та ГОШ

Параметри	Об'ємне штампування		
	холодне	напівгаряче	гаряче
Точність розмірів, квалітет	7...11	9...12	14...16
Шорсткість поверхні Rz, мкм	близько 10	менш 30	понад 100
Маса поковки, кг	0,001...30	0,1...50	0,05...1500
Використовувані сталі	вуглецеві із вмістом вуглецю до 0.45%; низько – леговані з сумарним вмістом легуючих елементів до 3%	вуглецеві; леговані з сумарним вмістом легуючих елементів до 10%	будь-які
Можливість утворення форми	переважно тіла обертання	по можливості тіла обертання	без обмежень
Попередня обробка заготовок	відпал, фосфатування	не вимагається	не вимагається
Проміжна обробка заготовок	відпал, фосфатування	не вимагається	не вимагається
Економічна партія (при масі 1 кг), шт.	понад 3000	понад 10000	понад 500
Стійкість штампів, шт.	20000...60000	10000...20000	2000...5000

течія матеріалу заготовки в поперечному напрямку по всій її висоті обмежена обоймою.

Основною перевагою процесу штампування поковок видавлюванням в роз'ємних матрицях є економія металу за рахунок ліквідації відходу в облой [11] (за винятком незначного об'єму, що впливає в компенсаційні порожнини при заповненні бокових порожнин рівчака). Витрата металу знижується також завдяки зменшенню або повного усунення напусків (при виготовленні поковок з глибокими порожнинами в центральній частині і з ребрами). Важливе значення має зниження припусків і допусків на видавлювальні елементи поковок. Поряд з економією металу процес забезпечує високу продуктивність при штампуванні і дозволяє скоротити число переходів [12, 13].

Закрите видавлювання дозволяє виготовляти порожнини вельми складної форми, високої точності (до 3-го, а іноді 2-го класу) і чистоти поверхні (до 10-го класу). Цим способом, наприклад, виготовлені порожнини матриць прес-форм для пресування циліндричних косозубих шестерень з кутом нахилу зуба до 45° .

Закритим видавлюванням, можна виготовляти порожнини великої глибини, не руйнуючи матеріалу заготовки. Висока пластичність матеріалу обумовлена тим, що в процесі деформування в зв'язку з наявністю схеми напруженого стану всебічного нерівномірного стиснення в заготовці створюється великий гідростатичний тиск.

Таким чином, при виготовленні видавлюванням глибоких порожнин з метою запобігання руйнування матеріалу заготовки необхідно її діаметр приймати якомога менше, підвищуючи тим самим гідростатичний тиск.

Однак зі зростанням гідростатичного тиску збільшується питомий тиск деформування, який часто досягає величин, що перевищують допустимі навантаження на інструмент.

Внаслідок необхідності докладання великих питомих тисків деформування закритим холодним видавлюванням можна виготовляти

порожнини великої глибини тільки з маловуглецевої сталі (залізо Армко; Сталі 10, 20), що має невисокий опір деформуванню. В середньовуглецевій і інструментальній сталях цим способом можна отримувати порожнини дуже малої глибини.

Напівзакрите видавлювання відрізняється від закритого тим, що обмеження течії матеріалу заготовки в поперечному напрямку проводиться обоймою не по всій її висоті, а на частині, що перевищує на 20...30% глибину порожнини. Внаслідок цього питомий тиск деформування зменшується приблизно на 20% у порівнянні з закритим видавлюванням. Зміна умов деформування призводить до деякого зниження точності виконання поперечних розмірів порожнини, а також до зменшення пластичності деформованого матеріалу. Напівзакритим видавлюванням доцільно виготовляти порожнини з похилими стінками, коли необхідна точність поперечних розмірів не вище 3-го класу.

Відкрите видавлювання здійснюється без застосування обойми і характеризується вільним переміщенням матеріалу заготовки в поперечному напрямку. Відкритим видавлюванням можна виготовляти порожнини відносно невисокої точності (до 5-го класу) і невеликої глибини; глибокі порожнини отримати неможливо з огляду на відносно невисоку пластичність матеріалу (внаслідок малої величини гідростатичного тиску) і неминучої появи тріщин у заготовці.

Питомий тиск деформування при відкритому видавлюванні нижче, ніж при закритому. Застосування відкритого видавлювання доцільно для виготовлення порожнин з похилими стінками (конічної, сферичної форм та ін.). В цьому випадку якість порожнини по точності розмірів і чистоті поверхні досить висока [14].

Для розширення області застосування процесу холодного видавлювання застосовують полегшуючі камери, що представляють собою спеціальні порожнини, попередньо утворені в заготовці або інструменті і заповнюються в процесі деформування матеріалом заготовки. При закритому

і напівзакритому видавлюванні, камери знижують питомий тиск і сила деформування, а при відкритому видавлюванні підвищують точність розмірів виготовленої порожнини.

Зниження питомого тиску і сили видавлювання відбувається внаслідок збільшення площі поверхні, вільної від контакту з інструментом, зменшення величини гідростатичного тиску, а також зміни характеру перебігу матеріалу. До камер можна віднести попередні порожнини, виготовлені в заготовці обробкою різанням з метою зменшення величини деформації при подальшому остаточному оформленні порожнини [15].

Більшість видів камер дозволяє зменшити питомий тиск на 15...25%, а деякі з них на 50...60% і більше. Це дає можливість виготовляти холодним видавлюванням порожнини в середньовуглецевій і інструментальній сталях.

Майже всі види полегшуючих камер знижують пластичність матеріалу, внаслідок чого можливе утворення тріщин. Таким чином, використання полегшуючих камер може істотно розширити сферу застосування процесу холодного видавлювання тільки при деформації високопластичних матеріалів. Більшість марок інструментальних сталей має невисоку пластичність, отже, при їх деформуванні камери не завжди дадуть бажаний результат [16].

Для трьох окремих випадків (закритого видавлювання без камер, закритого видавлювання з нижньою циліндричною полегшуючою камерою і відкритого видавлювання) за результатами дослідження напружено-деформованого стану заготовки встановлені наближені розрахункові залежності, що дозволяють обчислити граничну глибину порожнини з умови міцності заготовки при видавлюванні циліндричного майстер-пуансона з плоским торцем. При значному підвищенні міцності деформувального інструменту пластичність матеріалу заготовки дозволяє підвищити ступінь деформації [17].

З викладеного випливає, що застосування холодного видавлювання обмежене величиною допустимого навантаження на інструмент (для

найбільш міцних марок інструментальної сталі, що становить не більше 2500...3000 МПа) і міцністю заготовки.

Розрізняють шість груп поковок, характерних для штампування в процесах точного об'ємного штампування (табл. 1.2). У ТОШ можна виготовляти поковки, форма яких є поєднанням елементів конфігурацій, різних груп поковок: важелі, тяги, шатуни двигунів внутрішнього згоряння і т.д. [11].

У табл. 1.3, що представляє собою класифікацію схем штампування і типових представників поковок, показані різновиди простих і комбінованих процесів поперечного видавлювання і форми одержуваних виробів. В основу класифікації покладено кінематику руху металу і вид одержуваних виробів. При складанні класифікації використані деякі критерії, викладені в роботах [18].

Також подано класифікацію основних схем штампування в роз'ємних матрицях на основі аналізу форм поковок і особливостей формозміни металу (табл. 1.4). Характерними ознаками класифікації прийняті орієнтування площини роз'єму матриці по відношенню до осі деформувального пуансона, кількість деформувальних пуансонів і число переходів [19,20].

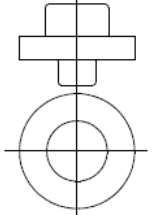
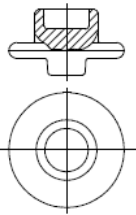
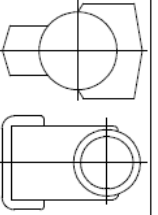
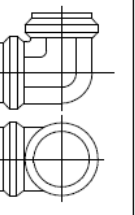
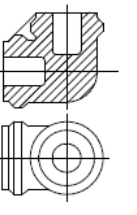
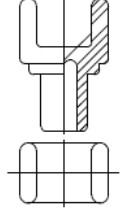
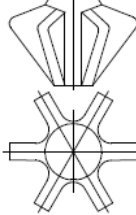
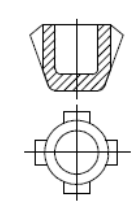
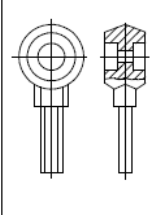
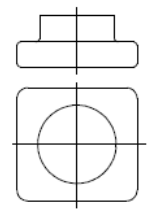
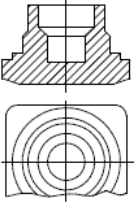
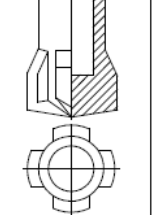
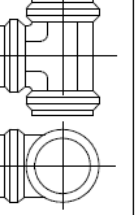
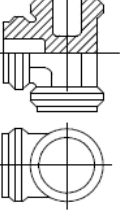
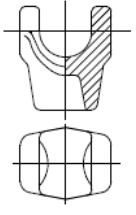
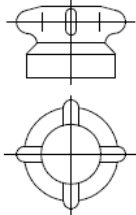
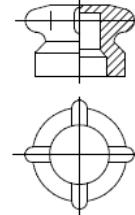
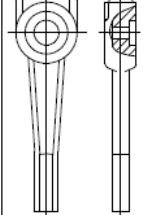
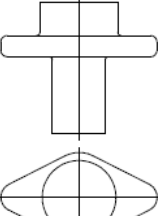
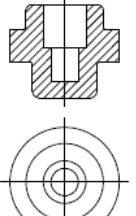
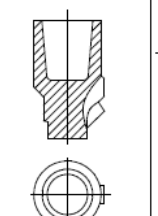
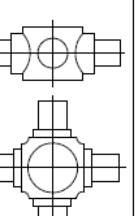
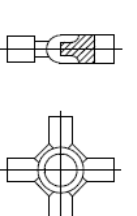
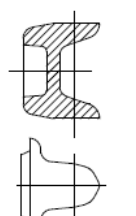
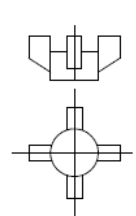
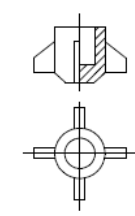
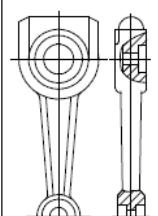
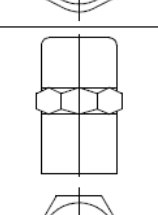
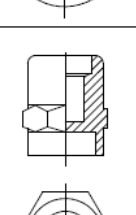
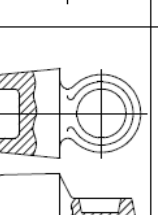
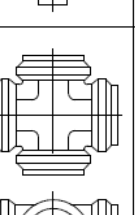
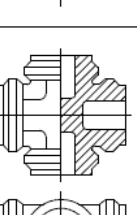
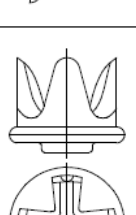
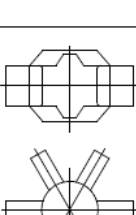
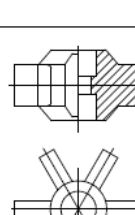
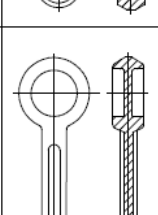
Розглянемо відомі способи отримання складнопрофільних деталей в роз'ємних матрицях (табл. 1.5) [21, 22].

При розробці технології точного об'ємного штампування на якість кінцевого продукту суттєво впливає правильний вибір центру тиску, методика визначення положення якого при штампуванні у відкритих штампах.

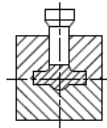
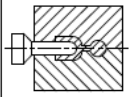
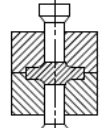
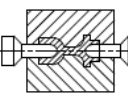
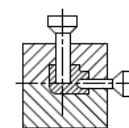
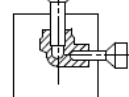
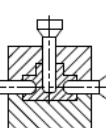
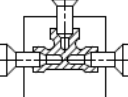
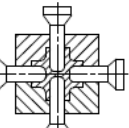
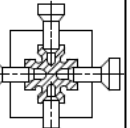
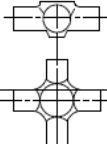
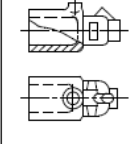
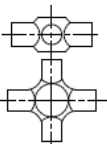
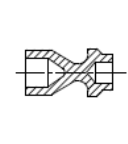
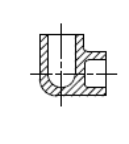
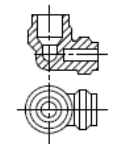
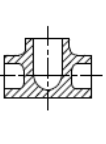
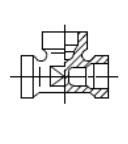
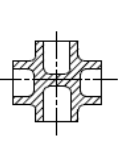
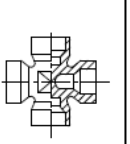
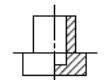
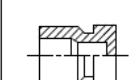
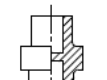
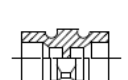
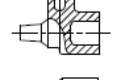
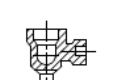
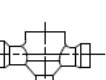
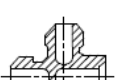
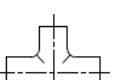
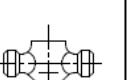
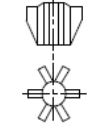
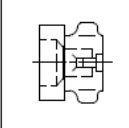
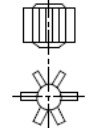
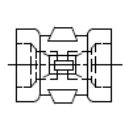
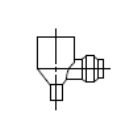
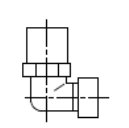
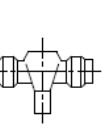
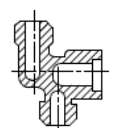
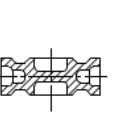
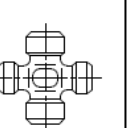
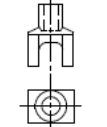
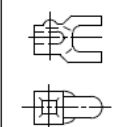
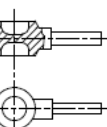
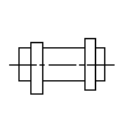
Слід зазначити, що групове виробництво точних поковок, одержуваних об'ємним штампуванням, дозволяє значно збільшити номенклатуру деталей, що переводяться на прогресивні ресурсозберігаючі технології пластичного деформування замість технологічних процесів різання і кокильного лиття.

Велика увага підвищенню точності поковок приділяється за кордоном. Зокрема, в Японії однією з важливих галузей досліджень і удосконалень є точне штампування, про що свідчить розробка фундаментальних концепцій

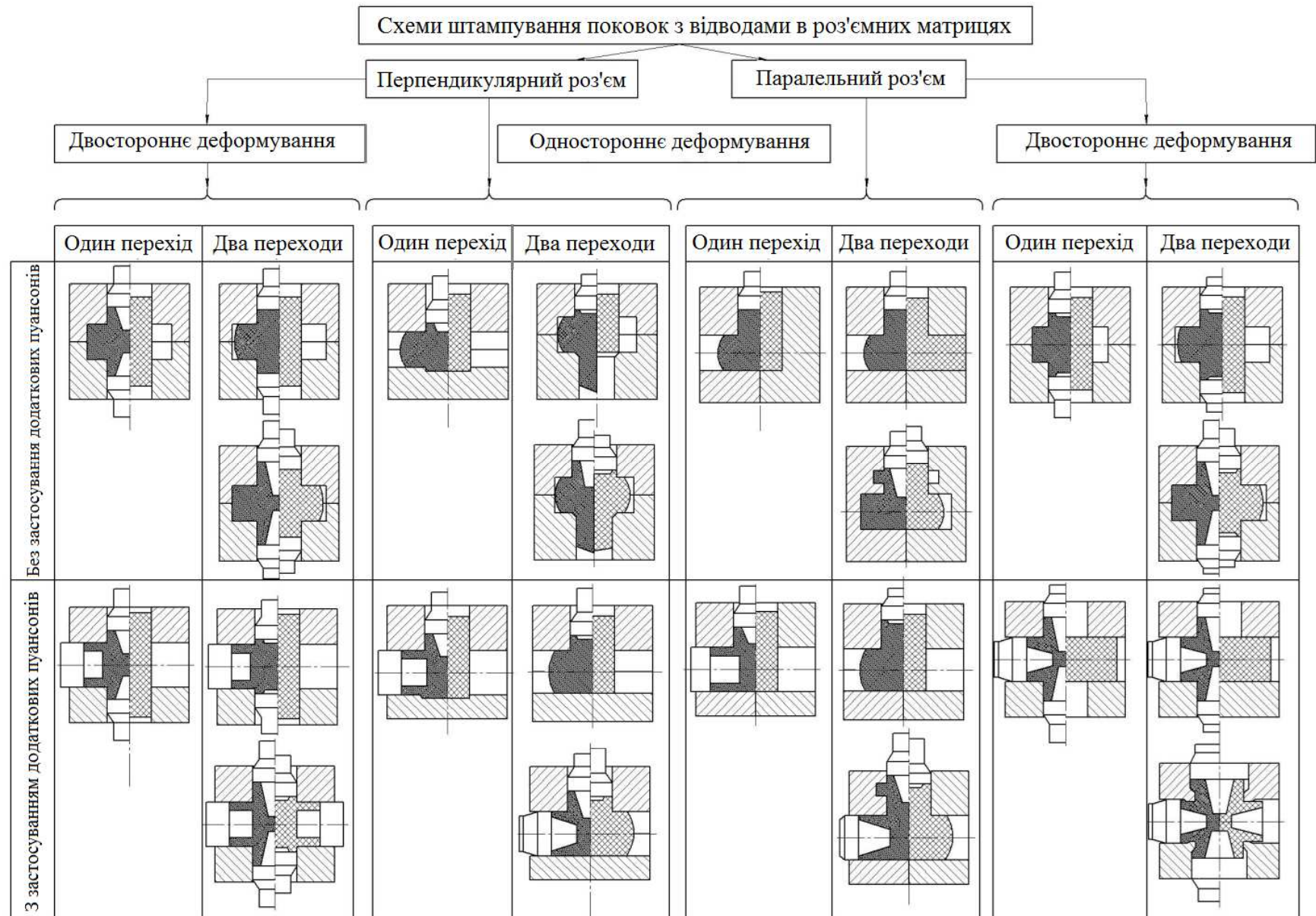
Таблиця 1.2 – Класифікація поковок, виготовлених в штампах з роз'ємними матрицями для процесів точного об'ємного штампування (ТОШ)

Група								
I Фланцеві		II Корпусні	III Відросткові		IV З розвилкою	V Оребрені		VI Подовжені
Суцільні	Порожнисті		Суцільні	Порожнисті		Суцільні	Порожнисті	
								
								
								
								

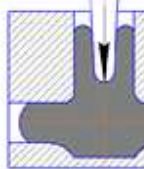
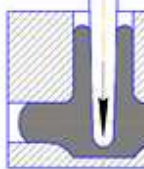
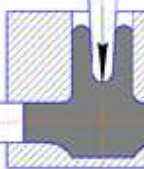
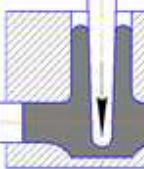
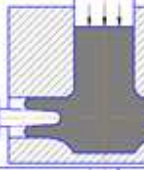
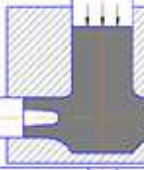
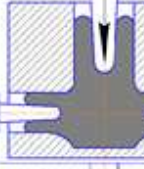
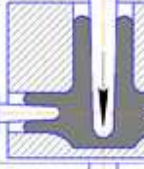
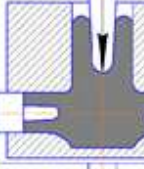
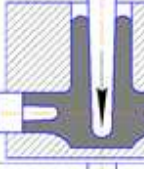
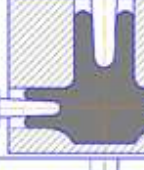
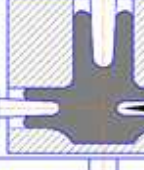
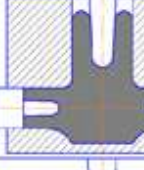
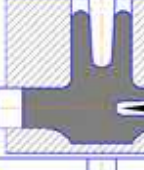
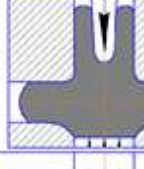
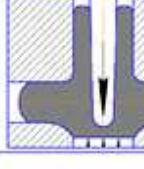
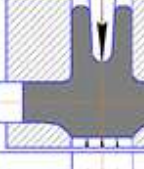
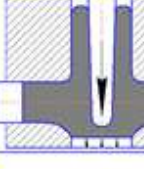
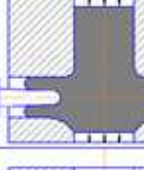
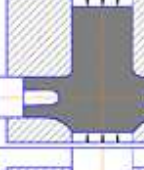
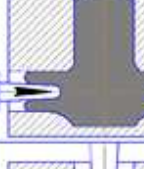
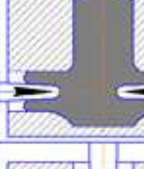
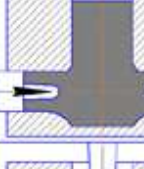
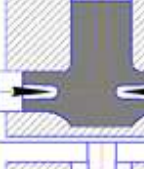
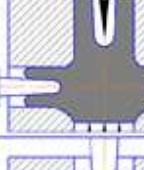
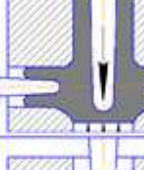
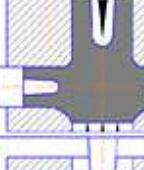
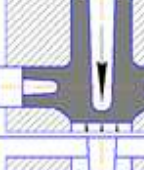
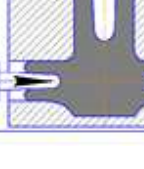
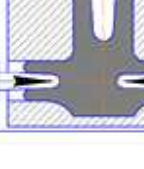
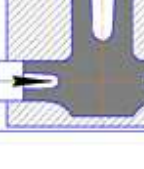
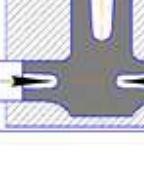
Таблиця 1.3 – Класифікація схем точного об'ємного штампування різною кількістю пуансонів і типових представників поковок

Схема штампування	Одним пуансоном		Двома пуансонами				Трьома пуансонами		Чотирма пуансонами	
	Поперечний роз'єм	Поздовжній роз'єм	Зустрічними		Перпендикулярними		Поперечно-поздовжній роз'єм	Поздовжній роз'єм	Поперечно-поздовжній роз'єм	Поздовжній роз'єм
			Поперечний роз'єм	Поздовжній роз'єм	Поперечно-поздовжній роз'єм	Поздовжній роз'єм				
Типові представники поковок										
										
										
										
					—	—	—	—	—	—

Таблиця 1.4 – Класифікація схем точного об'ємного штампування з різним рухом пуансону



Таблиця 1.5 – Класифікація схем точного об'ємного штампування з різним рухом пуансону при боковому видавлюванні

	№ n/n	I-ша група	II-га група	III-тя група	IV-та група
Одностороннє видавлювання	1				
	2				
	3				
	4				
Двостороннє видавлювання	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

підвищення точності поковок, виготовлених холодним об'ємним штампуванням.

Представляє практичний інтерес розрахунково–аналітичний спосіб визначення точності в технологічних процесах холодного штампування, а також способи оптимізації та можливості досягнення граничної точності, в тому числі особливості досягнення точності при осесиметричному деформуванні в результаті зменшення товщини вихідної заготовки. Для керування течією металу в процесах об'ємного штампування з метою скорочення тривалості стадії до штампування застосовують методику розрахунку, що заснована на розв'язанні зворотних задач формозміни методом граничних елементів, виявлена можливість зниження сили і роботи деформування.

Класифікацію процесів ТОШ видавлювання в залежності від способу деформування можна побудувати на основі поділу всіх процесів на два класи: - базові або основні прості процеси; - комбіновані, тобто складні процеси, які одержують шляхом об'єднання базових. За основу класифікації базових процесів видавлювання приймемо напрямок руху інструменту і течії металу, співвідношення напрямків докладання зовнішніх сил і вид одержуваних деталей. В залежності від співвідношення напрямків руху інструменту і течії металу заготовки видавлювання розділяється на поздовжнє і поперечне. Поздовжнє видавлювання характеризується тим, що в процесі деформації заготовки площа її поперечного перерізу зменшується, а частина деталі, що видавлюється, переміщається уздовж осі вихідної заготовки. Поперечне видавлювання характеризується тим, що видавлюється частина заготовки переміщається під кутом до осі заготовки.

У процесах поздовжнього і поперечного видавлювання використовуються чотири основних (базових) способи видавлювання: пряме, зворотне, радіальне і бокове видавлювання. Вони відрізняються схемами напружено–деформованого стану та докладання сили тертя, областю використання і видом одержуваних деталей.

При прямому видавлюванні пластична течія металу відбувається в напрямку прикладання сили і збігається з напрямком руху пуансону. Для способу характерне переміщення всієї заготовки уздовж стінок порожнини інструменту (матриці). При зворотному видавлюванні пластична течія металу відбувається в напрямку, протилежному руху пуансона, а відносного ковзання недеформуємої частини заготовки по інструменту не відбувається.

Радіальне видавлювання характеризується поперечною пластичною течією металу в кругову порожнину, що призводить до утворення осесиметричних деталей з потовщеннями (фланцями). Для бокового видавлювання характерна пластична течія металу в одну або кілька канальних поперечних порожнин з утворенням на деталі відростків різної конфігурації. Поєднанням (відцентровим і доцентровим) поперечним видавлюванням можна утворити потовщення або відростки на зовнішній і внутрішній поверхні трубчастої заготовки.

Слід зазначити, що засіб радіального видавлювання іноді називають висадкою видавлюванням, а термін радіальне або поперечне видавлювання застосовують для позначення процесу радіального штампування деталей типу зірочок, яке не виявляється в строгому сенсі терміна, процесом видавлювання.

Терміни відцентрове і доцентрове видавлювання, мабуть, не є найбільш вдалими, оскільки асоціюються з ефектами, характерними для обертових вузлів і деталей. Але, з огляду на можливість рідкісного застосування в практиці одночасно обох різновидів схем видавлювання, ці короткі терміни має сенс використовувати на стадіях пошуку альтернативних схем видавлювання.

В даний час досить актуальним для удосконалення процесів штампування деталей складної форми є проведення комплексного дослідження перетворення форми заготовок за стадіями деформування з умови оптимальної інтенсивності ступеню деформації від простої вихідної заготовки (стандартний прокат) до складної заготовки, використовуючи

багаторівчакове штампування, яке складається з визначення кількості переходів і оптимальної вихідної форми заготовки для кожного переходу штампування. Підвищення якості виробів можливе за рахунок технологій, що враховують всі реальні фактори, які впливають на кінцевий результат. Ця технологія повинна задовольняти основним принципам технологічності і враховувати можливості конкретного виробництва. В таких випадках застосування закритих схем штампування є досить перспективним та альтернативним способом деформування.

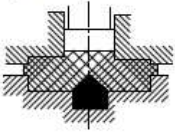
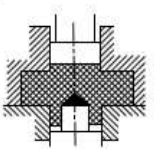
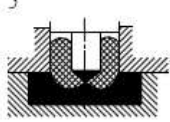
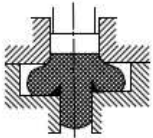
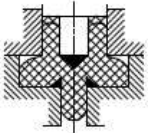
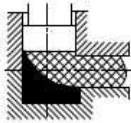
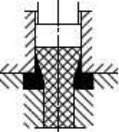
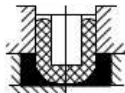
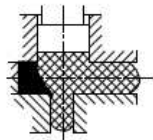
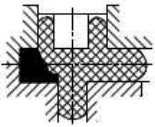
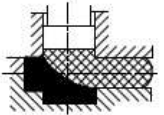
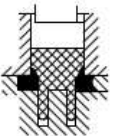
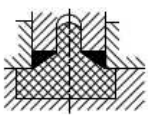
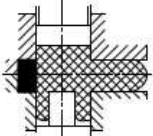
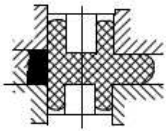
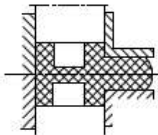
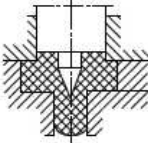
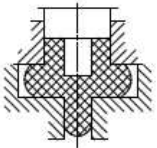
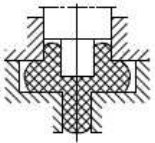
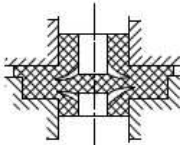
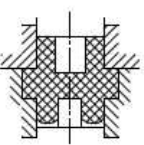
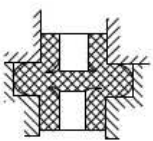
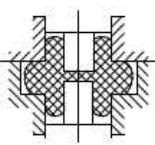
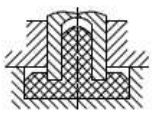
1.2. Дефектоутворення в процесах точного об'ємного штампування і кінематика руху металу

При штампуванні можливе утворення застійних зон і виникнення утягнень в металі, що може бути причиною браку поковок (табл.1.6) [20].

Брак при штампуванні видавлюванням – прес–утягнення виникає внаслідок зміни напрямку деформування верхніх шарів металу (безпосередньо під пуансоном) з горизонтального на вертикальне. Усувається зниженням швидкості деформування.

Скол зовнішній має місце на межах так званих мертвих зон при прямому видавлюванні. Він відбувається внаслідок переміщення окремих ділянок деформованого металу з різними швидкостями або по шляхах різної довжини. Ділянки металу, що рухається з меншою швидкістю або за найбільшим шляхом, гальмують переміщення сусідніх ділянок, що рухаються з більшою швидкістю або по найкоротшому шляху. Виникаючі при цьому напруження можуть перевищити межу міцності металу при температурі деформації і викликати його руйнування. Цей брак усувається зниженням швидкості деформування. Поява на поверхні поковки надривів типу «йорж» свідчить про наявність великого зовнішнього тертя об стінки матриці. Усувається поліруванням стінок матриці, правильним підбором мастила і швидкості деформування. Скол внутрішній має місце в тих

Таблиця 1.6 – Види дефектів поковок в процесах точного об'ємного штампування

Характер дефекту		Пресування з переважанням бокового витікання	Пресування з переважанням прямого витікання	Пресування з переважанням зворотного витікання	Пресування одночасно з боковим та прямим витіканням	Пресування одночасно з боковим і зворотним витіканням
Застиглі зони	першого виду	1 	2 	3 	4 	6 
		7 	9 	11 	13 	17 
	другого виду	8 	10 	12 	14 	18 
		19 	21 	—	23 	27 
Утяжки		20 	22 	—	24 	28 
					26 	

випадках, коли метал дуже пластичний, коефіцієнт тертя малий, а кут великий; висока швидкість, одержувана периферійним шаром, найближчим до стінки, може викликати внутрішній скол в стрижні, де швидкість серединних шарів виявиться значно меншою і напруження перевищать межу міцності нагрітого металу.

Затиск являє собою заштамповану складку в результаті невірною заповнення чистового рівчака штампа металом (зустрічний рух металу) або заочування задирок, отриманих на перших переходах штампування.

Найбільш часто зустрічаються затиски типу «простріл» від затікання металу перемички або плівки в тіло поковки або при розміщенні фігур на штампі попарно «валетом». Простріл – вид затиску, що є наслідком інтенсивності течії металу під виступаючою частиною штампа (під пуансоном) при недостатньому радіусі заокруглення останньої кромки.

Щоб уникнути затисків в місцях перемичок в штампі передбачають спеціальні виїмки або «кишені», в яких може розміститися надлишок металу. Невиявлений брак затиску призводить до аварій в експлуатації. Затиск є одним з дефектів, що виникає на межі застійних зон тих ділянок порожнини рівчака, які заповнюються металом на початку пресування, а потім залишаються в стороні від основного потоку металу.

Існує два види застійних зон. На межах застійних зон першого виду не проникають зовнішні окислені шари металу вихідної заготовки. Будь-які переміщення металу по межах застійних зон не викликають виникнення затисків в поковці. На межах застійних зон другого виду можуть проникнути зовнішні окислені шари металу заготовки (схеми 7 – 18 див. табл. 1.6) і викликати затиск. Ці шари проникають в тіло поковки трохи пізніше появи застійної зони, що підтверджується можливістю отримання поковок без затисків з одним відростком невеликої довжини. Запізнення виникнення затиску в порівнянні з моментом виникнення застійної зони пояснюється нестабільністю становища її межі. Так, при пресуванні за схемою 7 положення точки входу окисленого металу в тіло поковки безперервно

змінюється в інтервалі L , величина якого визначається співвідношенням швидкостей зміцнюючих та розміцнюючих процесів, розподілом температури металу, коефіцієнтом зовнішнього тертя, нестабільністю висоти кута деформації.

При пресуванні за всіма іншими схемами виникнення затисків відбувається аналогічно лише з тією різницею, що довжина інтервалу L може обмежуватися формою і розмірами поковки. Наприклад, при пресуванні (схема 8 див. табл. 1.6) цей інтервал практично усувається наявністю в поковці другого відростка, що призводить до виникнення затиску одночасно з появою застійної зони. Те ж саме відноситься до пресування за схемами 9, 10, 12, 13, 14, 17 і 18 (див. табл. 1.6).

Застійні зони другого виду можуть бути допущені тільки на невеликій ділянці робочого ходу пуансона при пресуванні невідповідальних поковок, якщо їх розміри і форма не обмежує інтервалу L . При практичних розрахунках можна користуватися величиною критичного об'єму металу, що проходить уздовж меж застійної зони з моменту її утворення до моменту виникнення затиску.

Крім того, на формозмінення заготовки значно впливають і геометричні параметри інструментів. Як зазначено в роботах [1, 23], оптимальна форма пуансона, що дозволяє видавлювати вироби з найменшими силами, залежить від ступеню деформації, глибини одержуваної порожнини і виду оброблюваного матеріалу.

Якщо форма дна виробу не відповідає оптимальній формі робочої частини пуансона, то для зниження загальної сили видавлювання, зокрема зворотного, попередньо виробляють штампування в оптимальному режимі з необхідною для цієї мети формою інструменту, а на наступний перехід остаточно фасують дно [1, 24].

Більшість дослідників [73-75L] не враховують особливості конфігурації перехідних кромek матриці і кінематичного режиму деформування в роз'ємних матрицях, що при аналізі силового режиму розкриття рознімних матриць вносить значну похибку.

До процесів обробки тиском зі складною кінематикою переміщення інструменту можна також віднести циклічне деформування [9, 25, 26]. У цьому випадку сила деформування знижується за рахунок зменшення сил тертя на контактних поверхнях і за рахунок протікання явища знеміцнення, так як дія циклічного навантаження подібна нагріванню заготовки [25].

Вплив швидкості деформування на величину питомої сили формозміни неоднозначно [24, 27]. В одних випадках зі збільшенням швидкості деформування тиск на пуансоні зменшується [25], а в інших випадках - збільшується [9, 27, 28]. У той же час, в роботі [24] встановлено, що питома сила видавлювання мало змінюється в інтервалі швидкостей, характерних для традиційно застосовуваного виробничого обладнання. А зміна швидкісного режиму деформування зміцненого матеріалу на стадії доштампування у звичайного пресового устаткування зі стандартною швидкістю робочого ходу призводить навіть до зниження потрібної сили деформації процесу. Так, застосування, в зв'язку з цим, прес-молотів дозволяє скоротити енерговитрати до 3 разів у порівнянні з формозміною таких же поковок на пресовому обладнанні [29].

Зі зменшенням ступеню свободи течії формозмінного матеріалу заготовки сили деформування однозначно збільшується [1, 9, 24]. Однак, застосування заготовки з підвищеною ваговою та геометричною точністю дозволяє в процесі закритого штампування отримати вироби з високою точністю геометричних розмірів, які не потребують додаткового доопрацювання. В іншому випадку застосовується напівзакрита обробка тиском виробів в штампах, конструкцією яких передбачаються компенсатори закритого (саморозкриваючі і противодавлячі пристрої) і відкритого (компенсаційні порожнини) типу, що дозволяють розмістити в них надлишок металу, знизити навантаження на інструмент і підвищити стійкість штампового оснащення [9, 30, 31].

Основне призначення проміжного середовища між поверхнями заготовки та інструменту - зниження сил контактного тертя, що приводить до

зменшення сили та тиску деформування, підвищенню стійкості інструменту і якості виробів.

Використання проміжного середовища в процесах ОМТ дозволяє штампувати заготовки з важкодеформуємих, високоміцних і крихких матеріалів. У той же час, для цих процесів характерні наступні недоліки: низька продуктивність; ускладнення конструкції штампів необхідність попереднього фасонування заготовки зростання тиску деформування.

Підвищення ступеню деформації приводить, в основному, до порушення суцільності мастильного шару, збільшення сил тертя і сили видавлювання. При холодному зворотному видавлюванні стаканів порушення мастильного шару відбувається при зануренні пуансона в заготовку на глибину 0,85 його діаметра [32]. Тому в багатьох холодних процесах штампування видавлюванням граничне формозмінення обмежують унаслідок порушення цілісності мастильного шару, а не в зв'язку з вичерпанням ресурсу пластичності [26].

Одним із шляхів зниження енергосилових параметрів способів холодного видавлювання виробів і підвищення граничного ступеню деформації є розробка багатоопераційного технологічного процесу. При цьому строго певна послідовність операцій складається або з урахуванням знакозмінних деформацій [24, 33], або з урахуванням раціонального розподілу ступеню деформації по переходах або дробності деформації [1, 9, 24, 34].

Найменше значення питомої сили при видавлюванні порожнини спостерігається при значеннях ступеню деформації в діапазоні 0,36-0,51 [1, 9]. При подальшому зростанні ступеню формозміни, особливо більш 0,69, навантаження на інструмент різко збільшуються [1, 9, 35]. Тому при виготовленні пустотілих виробів подібних стакану або втулки, як правило, спочатку отримують напівфабрикати з більшою товщиною стінки, ніж необхідно, для зниження питомої сили деформування, а потім одним з існуючих способів здійснюють стоншення стінки.

Якщо дозволяють величина ступеню деформації, навантаження на інструмент і конфігурація деталі, то виріб можна виготовити за один перехід.

Використовуючи підхід, запропонований в роботах [36, 37], процес отримання стрижневих деталей з осьовим відростком і фланцем можна розглядати як облойним штампування у відкритих штампах з одночасним заповненням гравюри штампа і плином металу в облойну канавку (задирку). В цьому випадку задирка виступає в ролі фланця [38-40]. Основною передумовою при вирішенні таких завдань була наявність точки (поверхні) розділу течії металу в гравюрі і задирку. В роботі [40] Л. А. Шофманом розглянуто приклад штампування з задиркою, коли метал одночасно заповнює порожнину гравюри (осьовий відросток) і тече в радіальному напрямку утворюючи задирку (фланець). У першому випадку розглядається початкова стадія процесу течії металу в гравюрі штампа і задирку, а в другому випадку розглядається кінцева стадія процесу течії металу в гравюрі штампа і в задирку з одночасною його підсадкою.

В роботах [36,40-42] також зазначалося, що на кінцевих стадіях процесу можливе зменшення обсягу задирок за рахунок зворотної течії деякої частини металу з задиркою в порожнину штампа, що відповідає схемі деформування як один з можливих варіантів кінематики течії металу. На цьому етапі відбувається процес, аналогічний з процесом осадки у підкладних кільцях. Як відомо з робіт теорії ОМТ [43-45], процес перебігу металу у фланці по двох протилежних напрямках характеризується наявністю площини розділу течії.

В роботі [44] Л. Г. Степанського розглянуто задачу формозміни при штампуванні у відкритих штампах для осесиметричних поковок типу дисків з маточинами, що мають горизонтальну площину симетрії. Весь процес штампування розбитий на кілька етапів з характерним плином металу. Перший етап штампування полягає в одночасному формуванні маточини і дискової частини поковки, другий етап являє собою видавлювання задирки і завершення формування поковки.

1.3 Теоретичні та експериментальні методи рішення задач пластичного формозмінення

На сучасному етапі розвитку теоретичних досліджень існує ряд методів, що дозволяють визначити напружено–деформований стан, силу та формозмінення у разі пружньо– пластичних і малих пластичних деформацій ідеально пластичних і зміцнених тіл.

Метод спільного рішення наближених рівнянь рівноваги і пластичності та ін. дозволив інтеграцією звичайних диференціальних рівнянь отримати аналітичні залежності сил деформування при куванні, гарячому та холодному штампуванні, прокатці та інших процесах в залежності від ряду різних факторів. Але цей метод не дозволяє враховувати нерівномірність деформації, неоднорідність властивостей і зміцнення за об'ємом заготовки, а також залежність сил контактного тертя від зміцнення приконтного шару.

Метод характеристик, розроблений в математичній теорії пластичності, дозволив отримати точні замкнуті рішення деяких простих задач. У прикладній теорії пластичності широко застосовуються такі наближені варіанти методу, як чисельне інтегрування рівнянь характеристик, графічна побудова ліній ковзання на підставі теорем Генки – Прандтля, побудова ліній ковзання у вигляді ламаних ліній.

Методом характеристик (ліній ковзання) вирішені багато задач теорії обробки металів тиском (ОМТ). Метод дозволяє визначати силу деформування, формозміну заготовки, напруження в об'ємі заготовки, знаходити межі розділу жорсткої і пластичної зони. Однак слід відмітити, що метод характеристик строго справедливий лише для плоских задач. Вельми обмежене застосування методу для осесиметричних задач і практично невідомі рішення об'ємних задач для пластично неоднорідних тіл.

Метод опору матеріалів пластичним деформаціям дозволяє визначати силу і формозміну при скінченних пластичних деформаціях, коли процес деформування носить монотонний характер. У загальному випадку процеси

холодного об'ємного штампування немонотонні і застосування зазначеного методу обмежене.

Складність процесів деформації привела до створення експериментально–розрахункових методів їх вивчення. Серед цих методів слід зазначити метод ділільних сіток, вельми ефективний при вивченні плоскої і, в деяких випадках, осесиметричної деформації, метод твердості, що дозволяє визначити напруження і деформації в будь-якому перерізі заготовки після холодної пластичної деформації.

Подальше спрощення побудови ліній ковзання призвело до методу верхньограничних оцінок, коли поле ліній ковзання замінюється простішим кінематично можливим полем, що складається з жорстких блоків і задовольняє граничним умовам.

Останнім часом при розробці та вдосконаленні технологічних процесів обробки металів тиском зростає роль теоретичного аналізу, який має ряд переваг перед експериментальним: менші матеріальні витрати, можливість дослідження в широкому діапазоні змінних параметрів.

Для зручності аналізу формули для визначення сил поперечного видавлювання зведені в табл. 1.7.

Одне з перших рішень по теоретичному аналізу процесу поперечного видавлювання виконав А. Г. Овчинников. В роботі [46] показано можливість встановлення деформуючої сили, необхідного для бокового видавлювання. В роботі [47] розглядається двостороннє деформування металу. Розрахунок деформуючої сили проведений за допомогою комбінування енергетичного методу з методом наближених рівнянь рівноваги пластичності (див. табл. 1.7, формула 1.1). Формула 1.2 використовується для визначення сили деформування при односторонній подачі металу. Форма осередку пластичної деформації встановлена, виходячи з експериментальних даних. Формула 1.3 була отримана енергетичним методом з урахуванням об'ємної деформації. Осередок деформації умовно розбивається на зовнішню кільцеву та внутрішню циліндричну ділянку.

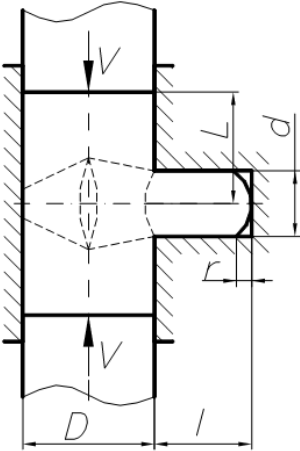
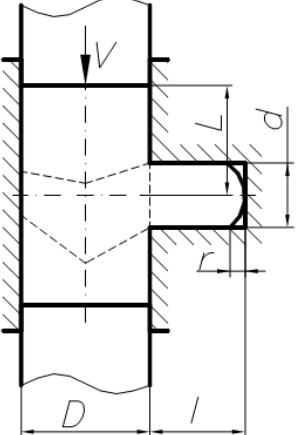
Розглянуті дослідження показують, що значна увага в них приділена одному з найважливіших для процесів видавлювання питанню – визначенню сили деформування.

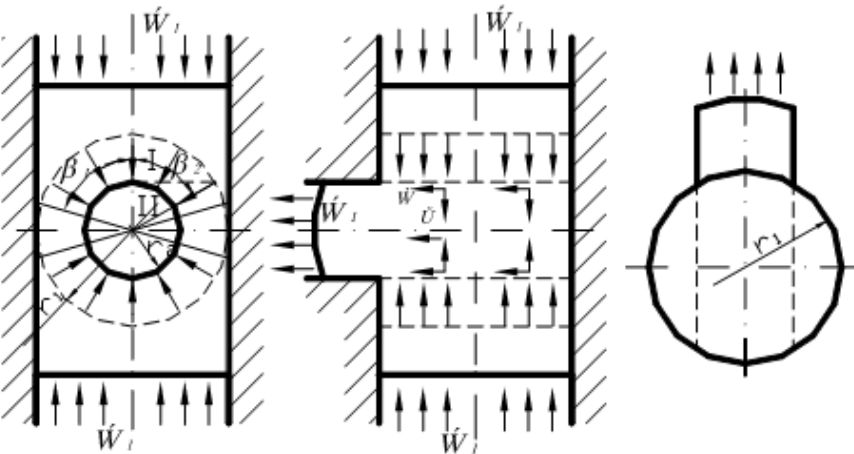
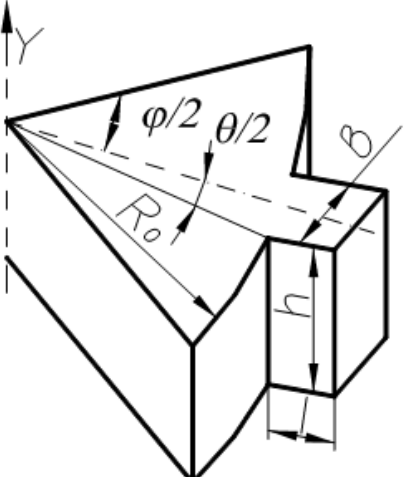
У роботах І. М. Жвік та І. Б. Покрас [48] було наведено визначення силових параметрів процесів бокового видавлювання в щілину. Аналітична залежність була отримана спільним рішенням рівнянь рівноваги з наближеним рівнянням пластичності для плоскої деформації (див. табл. 1.7, формула 1.4). М.С. Едуардов [49] досліджував напружений стан, використовуючи рішення задачі затікання металу в конічну порожнину (див. табл. 1.7, формула 1.5). У роботах В. І. Барикіна і В. С. Нестерова [50] формули 1.6 отримані на підставі рішення наближених рівнянь рівноваги та умов пластичності для окремих ділянок деформованого об'єму. В. Г. Кондратенко і М. В. Блінов [51], використовуючи енергетичний метод балансу потужностей, отримали такий вираз для визначення питомої сили деформування (див. табл. 1.7 формула 1.7.)

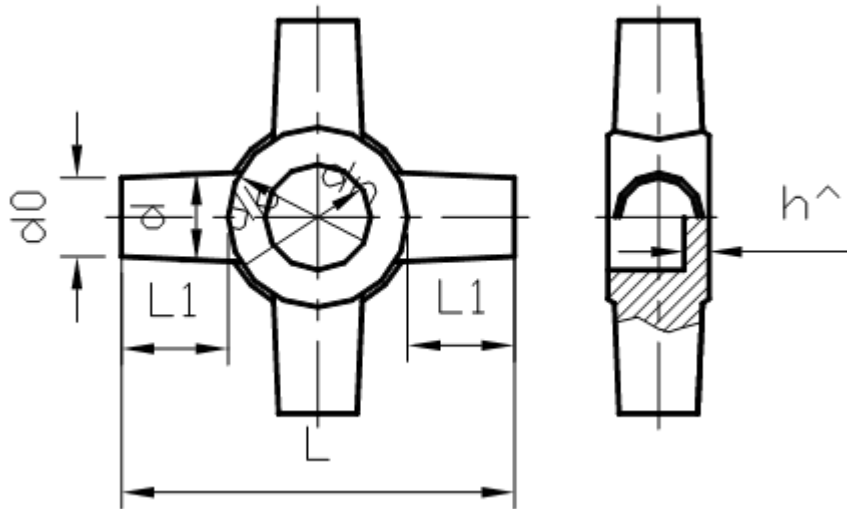
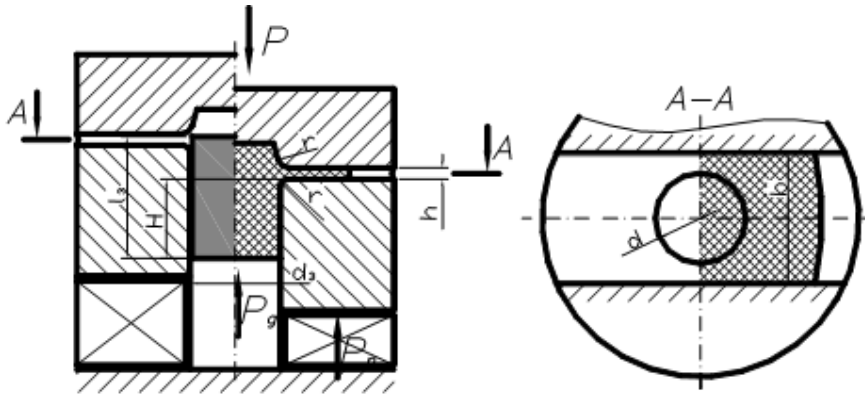
Для аналізу бокового і радіального видавлювання дослідниками використані і інші наближені методи, такі як метод рішення наближених рівнянь рівноваги і пластичності, енергетичні методи балансу потужностей, верхньої оцінки. Як видно з таблиці (див. табл. 1.7) більшість дослідників не враховують можливу (а в деяких випадках необхідну) перехідну кромку від вертикальної до поперечної порожнини, яка може бути або у вигляді фаски, або у вигляді криволінійного контуру. Враховується округлена кромка, однак розрахунок за цими формулами дає великий розкид значень. Особливо мало вивчено сили розкриття матриць, як правило, формули наводяться для випадку доштампування (вільна течія), який характеризується різким зростанням сили деформування і розпору в порівнянні з вільним витіканням.

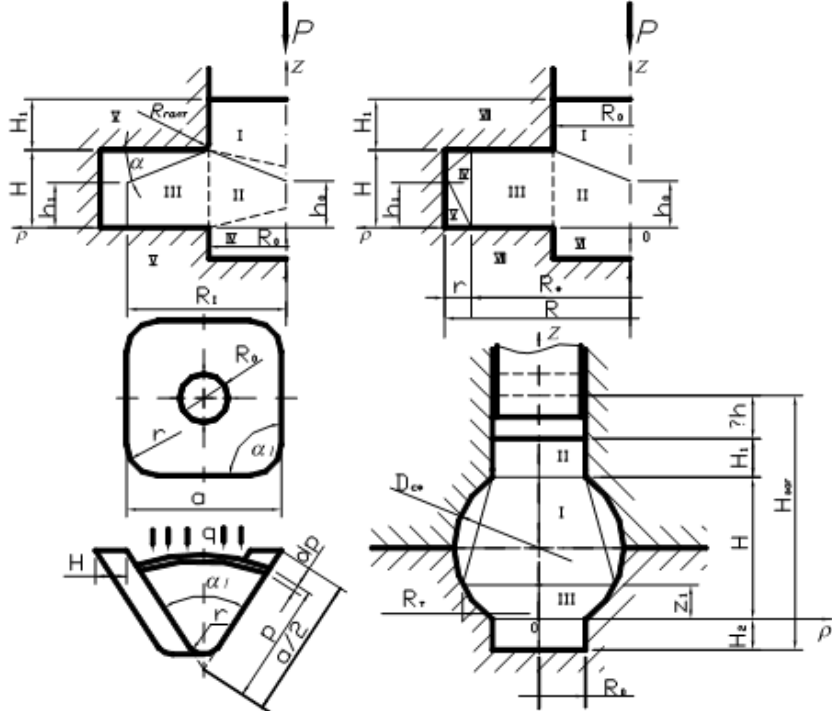
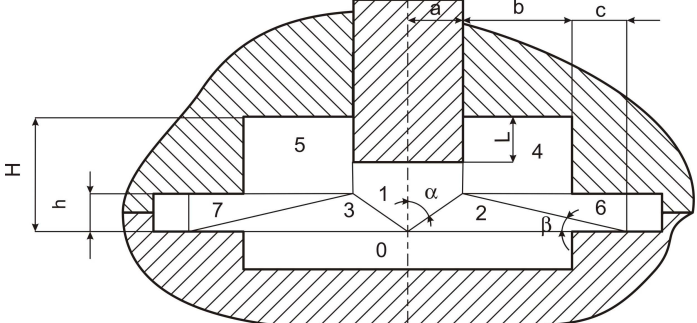
У процесі штампування в роз'ємних матрицях дуже важливим технологічним фактором є сила, яку необхідно прикладати для запобігання

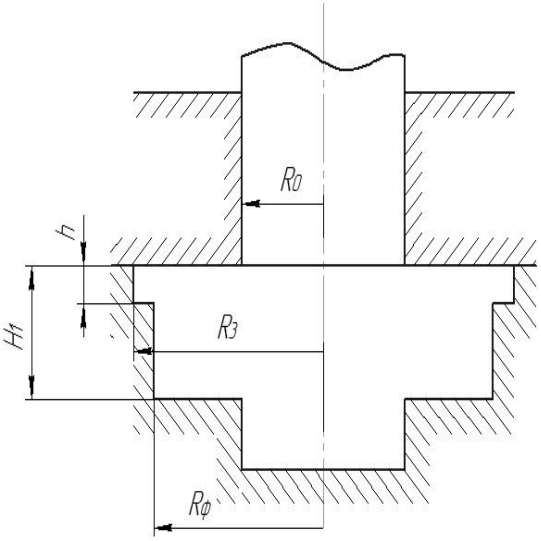
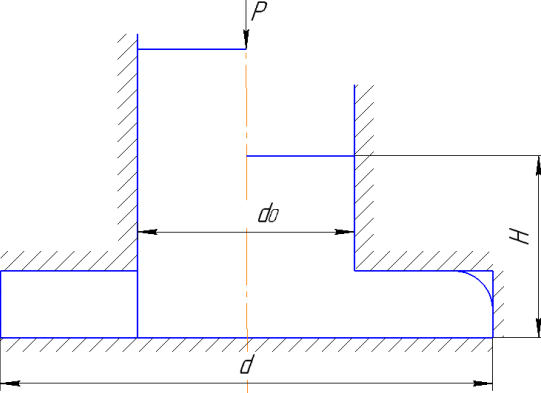
Таблиця 1.7 – Математичні моделі силового режиму поперечного видавлювання

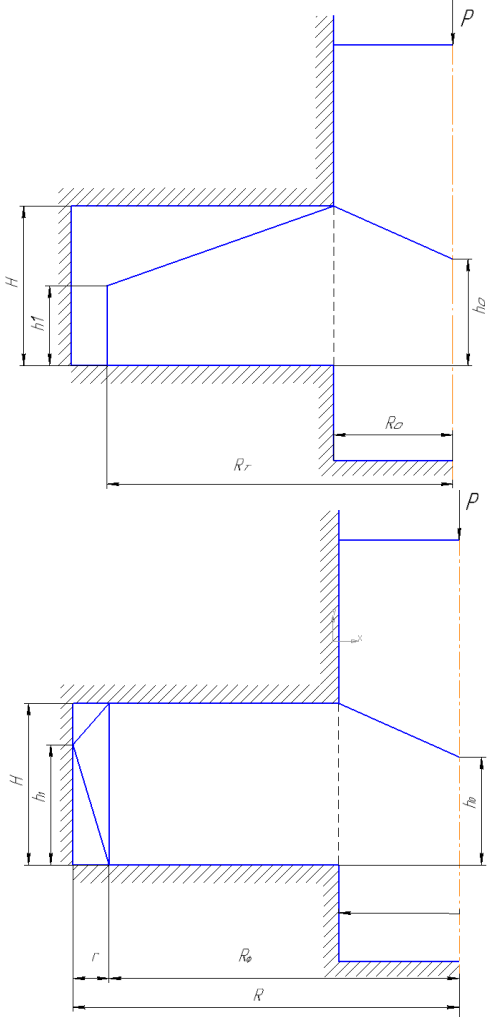
1	Автор, джерело і розрахункова схема процесу	Формули
1	2	3
1.1	А. Г. Овчинников та ін. [46]  a)	$\frac{P}{\sigma_s} = 1 + \ln \lambda - \frac{1}{2\lambda - 1} \cdot \ln 2 \cdot \lambda + \frac{d}{8D} \cdot (1 + \mu) + \frac{1}{4} \cdot (t_1 + t_2) + \frac{\mu}{\beta} \times \left(4 \cdot \frac{L}{D} - \sqrt{\frac{d}{D} - \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\lambda^2}} \right) + \frac{4 \cdot \mu \cdot (l - r)}{\beta \cdot d} + \left(1 + \frac{d}{\pi} \right) \cdot \ln \frac{1 + \mu}{3\sqrt{3}} \frac{1}{\lambda}$ a)
1.2	 б)	$\frac{P}{\sigma_s} = 1 + \frac{1}{2} \left(\ln \pi - \frac{1}{2\pi - 1} \ln 2\pi \right) + \frac{\pi}{8} + \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{\pi^2} (1 + 0.7\mu) + \frac{1}{4} (t_1 + t_2) + \frac{\mu}{\beta} \left(4 \cdot \frac{L}{D} - \frac{5}{4} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \right) + 4\mu \frac{(l - r)}{\beta \cdot d} + \left(1 + \frac{4\mu}{\pi} \right) \ln \frac{d}{1.75r}$ б) $\lambda = \sqrt{\frac{D}{d}}$ де: t_1 и t_2 – функції кутів нахилу межі осередку деформації до осі відростка

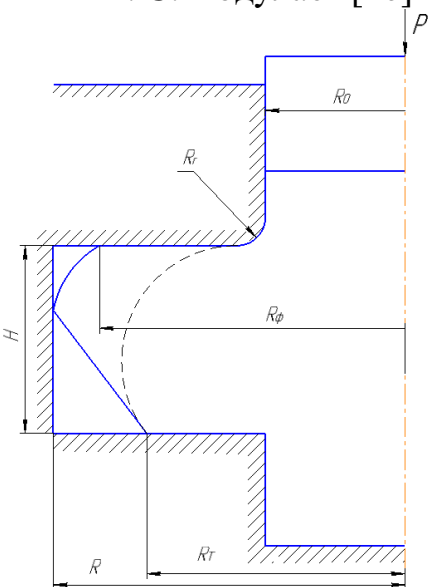
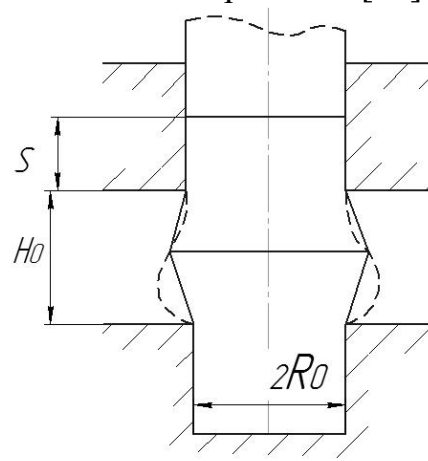
1	2	3
1.3	А. Г. Овчинников та ін. [47] 	$\frac{P}{\sigma_s} = \frac{4}{\pi\sqrt{3}}(\beta_1 \sin \beta_1 + \cos \beta_1 - \beta_2 \sin \beta_2) \ln \pi$ $+ \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{5}{12} \sqrt{\pi^2 - 1} \right) + \frac{4}{\sqrt{3}\pi^2} + \frac{4}{\sqrt{3}}\pi + \frac{1 + \mu}{3\sqrt{3}} \frac{1}{\lambda}$ $\lambda = \frac{D_0}{d}$ де: β_1 и β_2 – визначають нахил нижньої межі кільцевої ділянки осередку деформації
1.4	І. М. Жвік та І. Б. Покрас [48] 	$\bar{p} = \frac{P}{\sigma_s} = \frac{4n^*}{\sqrt{3}} \left(lb - \frac{l^2 b}{h} + \frac{2n^*}{\sqrt{3}} R_0^2 \left[\frac{\varphi}{2} + \frac{l}{h} \left(1 + \mu \frac{h+l}{b} \right) \frac{1}{3\mu} \left(e^{\frac{3\mu\theta}{2}} - e^{3\mu\frac{\varphi-\theta}{2}} \right) \right] \right)$ видавлювання одночасно в кілька (n^*) рівномірно розташованих по периметру каналів

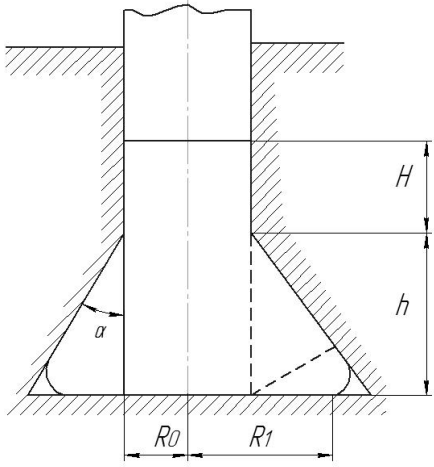
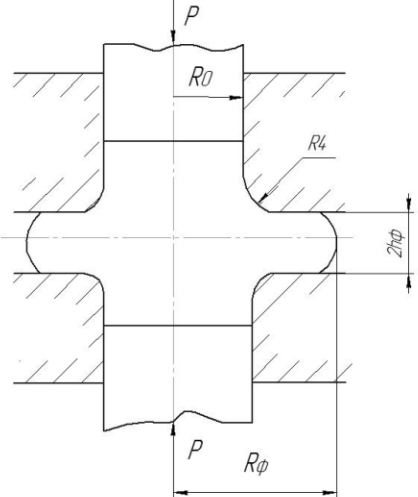
1	2	3
1.5	М. С.Едуардов [49] 	$P = \frac{\pi d_n^2}{4} \sigma_i k_\phi,$ $k_\phi = 3 + \frac{8 l_1 m_1 m_2}{\sqrt{3} d_0 + d_1} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{d_n - d_s}{d_1 - 2h} \ln \frac{d_1}{2h} + \frac{d_s}{6h} \right)$
1.6	В. І. Барикін та В. С. Нестеров [50] 	$P_d = F \sigma_s \left[3.15 + \frac{2H}{d} + \frac{d}{2(h + 2r)} \right]$ $P_r = 2.6 \pi \sigma_s [r(d + r) + 0.28(b - d)^2 - 0.19dH]$

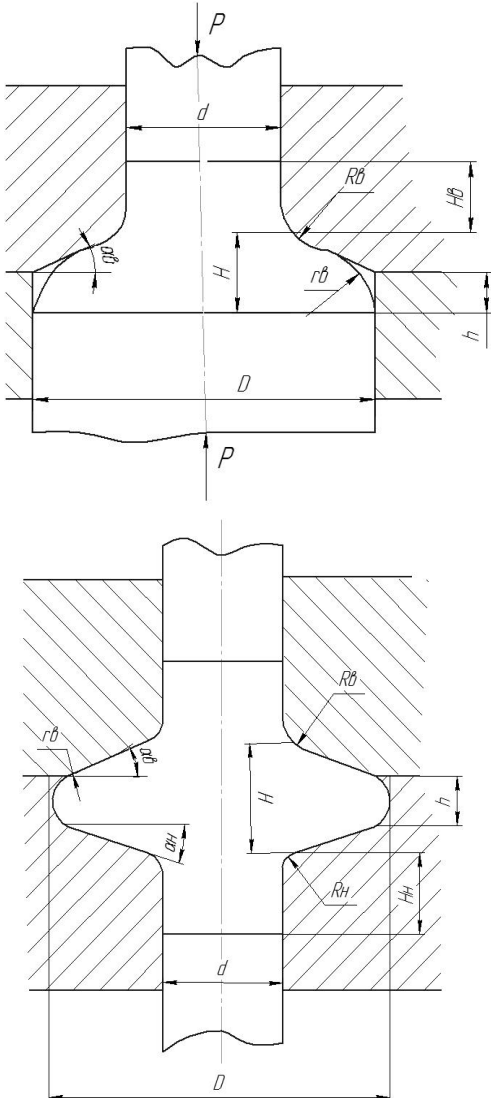
1	2	3
1.7	В. Г. Кондратенко та М. В. Блінов [51] 	$\bar{p} = \frac{P}{\sigma_s} = 1.1 \left(1 + \ln \frac{\bar{R} - \bar{r}}{\bar{R}_0} \right) + \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1 - h_0}{\bar{R}_0} \right)^2}}{(1 - \bar{h}_0)^2} \times \left(\frac{\bar{R}_0(1 - \bar{h}_0)}{2} - \frac{h_0 \bar{R}_0}{(1 - \bar{h}_0)} \ln \frac{1}{\bar{h}_0 + \bar{h}_0 \bar{R}_0} \right) + \frac{1}{\bar{R}_0} + \frac{1.1 (\bar{R}_0^2 - 8\bar{R}\bar{r} + 3\bar{r}^2)}{6(2\bar{R}^2 - 3\bar{R}\bar{r} + \bar{r}^2)} + \frac{2\bar{R}^2 - 6\bar{R}\bar{r} + 3\bar{r}^2}{4(2\bar{R}^2 - 3\bar{R}\bar{r} + \bar{r}^3)} + \frac{2\bar{R}\bar{r} - \bar{r}}{8} + \frac{(1 - \bar{r})^2}{8\bar{r}^2} \times \frac{(2\bar{R}\bar{r} - \bar{r}^2)}{\bar{R} - \bar{r}} + 2\mu \left(\bar{R} - \bar{R}_0 - \bar{r} + \frac{\bar{H}_1}{\bar{R}_0} \right).$
1.8	Л. Г. Степанський [44] 	$p = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2 \cdot h - H}{b + c} + \frac{2 \cdot b + c}{h} \right) + \tau_K \cdot \left(\frac{c}{h} - \frac{L}{b + c} \right)$

1	2	3
1.10	Л. И. Подрабинник [32] 	Інженерний метод, враховується різна товщина фланця від осі до периферії: $\frac{P}{\sigma_s} = 1 + \ln \frac{R^0}{2h} + \frac{R^0}{3h} + 2\mu \frac{H_1}{R_0} + P_k$ Для двостороннього видавлювання: $R_k = \left(0,45 \frac{h_2}{h} + 0,55\right) \ln \frac{R_1}{R_0};$ Для одностороннього видавлювання: $P_k = \left(0,3 \frac{\beta}{h} + 0,7\right) \ln \frac{R_1}{R_0};$ $\frac{P}{\sigma_s} = 1 + 2 \ln \frac{R_\phi}{R_0} + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left[\left(10 \frac{R_\phi}{R_0^3} - 4\right) \frac{h}{R_\phi} + \frac{\left(\frac{R_\phi}{R_0}\right)^3 + 1 + \mu \left(\frac{R_\phi}{R_0^3} - 1\right)}{R_\phi^3/R_0 - h/R_0} \right]$
1.11	С. С. Соловцов [53] 	Метод балансу робіт $\bar{P} = 1,1 \left[\left(1 + \frac{4\mu}{\pi}\right) \ln \frac{l}{2} + 2\mu \left(\frac{d - d_0}{2l} - 1\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d_0}{l} + \frac{4l}{3d_0}\right) + \ln \frac{d - d_0}{2l} + 2\mu \frac{(H - l)}{1,1d_0} \right]$ Спільне рішення диф. рівнянь рівноваги і сил пластичності. $Q = 1,1\pi\sigma_{s1} \left\{ \left(2,57 + 1,5 \ln \frac{l}{2r}\right) \left[\frac{(d - 2l)^2}{4} - \frac{d_0^2}{4} \right] - \frac{d_0^2}{4} \ln \frac{d - 2l}{d_0} \right. \\ \left. + 1,5l(d - l) \ln \frac{l}{2r} + 0,93r(d - r) + h(0,57d - 1,32l) \right\} - \pi\mu d_0 H \sigma_{s2}$ σ_{s1} та σ_{s2} – напруження течії металу в матриці і полості

1	2	3
1.12	Ф. С. Абдулаєв [46] 	Енергетичний метод балансу потужностей $\frac{P}{\sigma_s} = 1,1 \left(1 + \ln \frac{\bar{R}_r - \bar{h}_1}{\bar{R}_0} \right) + \frac{\bar{a}^2 \bar{R}_0}{(1 - \bar{h}_0)^3} \sqrt{1 + \frac{(1 - h_0)^2}{\bar{R}_0^2}} \cdot \left[\frac{1 - \bar{h}_0^2}{2\bar{a}(1 + \bar{a})} + \frac{\bar{h}_0}{a(1 + \bar{a})} \cdot \ln \bar{h}_0 \right] + \frac{\bar{h}_0 \bar{R}_0}{(1 - \bar{h}_0)^3} \cdot \ln \bar{h}_0^\mu + \left[2 \frac{\bar{H}_1}{\bar{R}_0} + \frac{\bar{R}_r - \bar{R}_0}{\bar{h}_1 - 1} \ln \bar{h}_1 \right] + \frac{\bar{a} + 1}{\bar{R}_0} - \frac{1 - \bar{h}_1}{4(\bar{R}_r - \bar{R}_0)} - (\bar{a} + 1) \frac{\bar{a}}{\bar{R}_0} \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{\bar{a}} \right)$ Де $\alpha = 0,03 + 0,5 \left(\frac{H}{R_0} - 0,42 \right) \text{ при } 0,42 < \frac{H}{R_0} < 0,72$ $\alpha = 0,18 \text{ при } \frac{H}{R_0} > 0,72$ $\frac{P}{\sigma_s} = 1,1 \left(1 + \ln \frac{\bar{R} - \bar{r}}{\bar{R}_0} \right) + \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1 - \bar{h}_0}{\bar{R}_0} \right)^2}}{(1 - \bar{h}_0)^2} \left[\frac{(1 - \bar{h}_0) \bar{R}_0}{2} - \frac{\bar{h}_0 \bar{R}_0}{1 - \bar{h}_0} \cdot \ln \frac{1}{\bar{h}_0} + \bar{h}_0 \bar{R}_0 \right] + \frac{1}{\bar{R}_0} + \frac{1,1(\bar{R}^2 - 8\bar{R}\bar{r} + 3\bar{r}^2)}{(\alpha 2\bar{R}^2 - 3\bar{R}\bar{r} + \bar{r}^3)} + \frac{2\bar{R}^2 - 6\bar{R}\bar{r} + 3\bar{r}^2}{4\bar{r}(2\bar{R}^2 - 3\bar{R}\bar{r} + \bar{r}^2)} + \frac{2\bar{R}\bar{r} - \bar{r}}{8} + \frac{(1 - \bar{r})^2 (2\bar{R}\bar{r} - \bar{r}^2)}{8\bar{r}^2 (\bar{R} - \bar{r})} + 2\mu \left(\bar{R} - \bar{R}_0 - \bar{r} + \frac{H_1}{R_0} \right)$

1	2	3
1.13	Ф. С. Абдулаєв [46] 	Спільне рішення диф. рівнянь рівноваги з умовою пластичності Треска–Сен–Венана. Для стадії вільного витікання: $\frac{P}{\sigma_s} = -[2,2 + 4(0,45 - \bar{r})] \cdot \frac{\bar{R}_\phi^2 - \bar{R}_0^2}{\bar{R}_0} \beta \frac{\bar{R}_\phi^2}{\bar{R}_0^2} \ln \frac{R_\phi}{\bar{R}} - \beta \ln \frac{\bar{R}_0}{\bar{R}} + \frac{2\mu}{3\bar{R}_0^2} (2R_\phi^3 - 2\bar{R}_0^3 - 3\bar{R}\bar{R}_\phi^2 - 3\bar{R}\bar{R}_0^2) - 2\mu\bar{H}_1$ Для цього етапу доштампування: $\bar{R} = \frac{R}{H}; \bar{R}_\phi = \frac{R_r}{H}; \bar{R}_0 = \frac{R_0}{H}; \bar{H}_1 = \frac{H_2}{H}$ Для вільного витікання: $\bar{Q} = \bar{\sigma}_s = \left(1 + 1.1 \ln \frac{R_r}{R_0}\right) \frac{R_r(1 + \frac{1.1R_r}{2R_0})}{R_0(R_r^2/R_0^2 - 1)}$
1.14	Г. В. Вікерс та ін. [54] 	Енергетичний метод, відсутність контактного тертя. Для $\frac{H_0}{R_0} \geq 2$ $\frac{P}{\sigma_s} = \frac{2H_0}{3S(G-1)} \left[G^3 \left(\ln G - \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{3} \right]$ $G = \sqrt{\frac{9}{4} + 3 \frac{S}{H_0}} - \frac{1}{2}$

1	2	3
1.15	П. Д. Чудаков та В. І. Гусинський [55] 	Енергетичний метод, кінцева стадія несталого процесу $\frac{P}{\sigma_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 3,75 - \sqrt{4 + C^2} + \frac{R_1 \sqrt{4 + C^2} - 2R_0}{R_1 - R_0} - \ln \frac{R_1}{R_0} + \frac{2R_0^2 + 6h^2 + 3R_0 C^2}{6R_0 h} + \frac{(R_1 + R_0)^2 C(1 + C^2) - (R_1 - R_0)ch}{h[h(R_1 - R_0)C]} \right\} + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu \left[\frac{2H}{R_0} + \frac{R_0}{3h} + \frac{R_1 - R_0}{h - (R_1 - R_0)C} + \frac{R_1 - R_0}{h \sin^2 \alpha} \right]$ $C = \operatorname{ctg} \alpha$
1.16	Л. П. Кузнєцов [56] 	Двостороннє деформування $P = 2F_0 \beta \sigma_i \frac{R_\phi^2}{R_0} + \mu \frac{\sigma_T}{\beta \sigma_i}$ $\beta = 1,08; \sigma_i = f(\varepsilon_i); \varepsilon_i = \ln \frac{F_\phi}{F_0}$

1	2	3
1.17	І. А. Биков [57] 	$\frac{P}{\sigma_s} = 1,15 \left[\left(1 + \frac{4\mu}{\pi} \right) \ln \frac{h}{r} + 2\mu \left(\frac{D-d}{2H} - 1 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{H} + \frac{4H}{3d} \right) + \ln \frac{D-d}{2H} + 2\mu \left(\frac{H_T \cdot H}{1,15d} \right) + 1 \right]$ $H_T = H + H_B$ $Q = 1,1\pi\sigma_{s1} \left\{ \left(2,57 + 1,5 \ln \frac{h}{2r} \right) \frac{(D-2H)^2}{4} - \frac{d^2}{4} - \frac{d^2}{4} \ln \frac{(D-2H)}{4} + 1,5(D-H) \ln \frac{h}{2r} + 0,93r(D-r) + H(0,57D - 1,32H) \right\} - \pi\mu d H_B \sigma_{sr}$ $\frac{P}{\sigma_s} = 1,1 \left[\left(1 + \frac{4\mu}{\pi} \right) \ln \frac{2h}{3r_B} + 2\mu \left(\frac{D-d}{H} - 1 \right) + 0,66 \ln \frac{3(D-d)}{4h} + 2\mu \frac{H_T - H}{1,1} + 0,75 \frac{d}{H} + 0,3 \frac{H}{d} + 1 \right]$ $Q = 1,1\sigma_s \left\{ \left(2,57 + 1,5 \ln \frac{h}{3r_B} \right) \left[\left(\frac{D}{2} - \frac{2}{3}H \right)^2 - \frac{d^2}{4} \right] + \frac{d^2}{4} \ln \frac{3D-4H}{3d} + H \left(\frac{3D-2H}{3} \right) \ln \frac{h}{3r_B} + 0,93r_B(D-r_B) + 0,66H(0,75D - 0,88H) \right\} - \pi\mu d H_B \sigma_{sr}$

розкриття матриці. Для визначення значення розкриваючої сили або отримання її залежності від інших параметрів процесу штампування проводилися різні дослідження в даній області.

Сила розкриття визначається тільки при витіканні металу в облой, а при його відсутності, що характерно для штампування в роз'ємних матрицях, рішення не може бути застосовано [58].

І. С. Поляков і О. Ф. Дриль [59] пропонують рішення, в якому немає обліку форми перехідної кромки, що є важливим параметром при радіальному видавлюванні, так само розглядається плоска задача.

Ю. Г. Момзіков і О. А. Ганаго [60] пропонують рішення, яке вимагає знаходження функції відносного середнього тиску необхідного для заповнення кутів, для кожного конкретного випадку штампування, що трудомістке і вимагає проведення настановних експериментів.

В. С. Барков і Л. І. Подрабіннік [52] також в своєму рішенні призводять закономірності, розглядаючи тільки локальну ділянку осередку деформації, що прилягає до видавлюваного фланця, тоді як течія металу можлива у всьому обсязі фланця.

Для запропонованих рішень, характерні наступні недоліки: не враховується форма перехідної кромки матриці; рішення не застосовні для фланця на кінці стрижня; рішення не враховують підсадки на заключній стадії процесу; немає рішень по затіканню металу в компенсаційну порожнину; не в повній мірі враховуються умови тертя на різних ділянках контакту заготовки і деформуючого інструменту.

Представлено вираз для розрахунку приведенного тиску деформування заготовки в даному процесі, залежне як від геометричних параметрів процесу, так і від умов тертя. При цьому використовувалися основні положення і допущення енергетичного методу [61, 62].

Автори робіт [63-65] в ході експериментальних досліджень встановили, що в разі прямого видавлювання з роздачею, сила деформування знижується на 16-38% в порівнянні зі зворотним видавлюванням і на 27-60% - в

порівнянні з прямим видавлюванням. Крім цього, було встановлено підвищення пластичності на початковому етапі видавлювання при заповненні конічної щілини, а також більш рівномірний розподіл деформації. Подальшого зниження сили деформування при виготовленні судин, балонів, трубних заготовок з складнодеформуємих матеріалів можна домогтися в процесі гідромеханічного видавлювання з висадкою [66, 67].

Найбільшою мірою свободи течії металу і, відповідно, найбільшого зниження сили деформування можна домогтися, якщо розворот течії матеріалу заготовки буде відбуватись відразу ж після виходу металу з обсягу заготовки одночасно з боку бокової поверхні нижньої ділянки заготовки та нижньої торцевої поверхні, або з боку нижньої ділянки бокової поверхні. У процесі вільного (без матриці) видавлювання виготовляють глибокі порожнисті судини. При цьому питома сила знижується в 1,5...1,8 рази [68].

В роботах [69] зазначалося, що при розробці технологічного процесу видавлювання стрижнів з фланцем є широкі можливості варіювання діаметра вихідної заготовки від діаметра стрижня до діаметра фланця. Деталі з досить широким фланцем (більше 2) виготовити за один перехід важко. Тому такі деталі, як правило, виготовляють за два переходи: видавлювання утворюють стрижень, а потім на другому переході оформляють фланець. Також зазначалося, що при видавлюванні стрижневої частини велику роль відіграють умови контактного тертя і граничне формозмінення.

В роботах [70-78] представлені результати дослідження процесів штампування поковок з плоским фланцем і осьовим відростком в однорівчачових штампах. Показано, що виготовлення поковок такого типу відбувається в чотири етапи. Перші два етапи деформування - вільна осадка заготовки і обмежена осадка [74-76] протікають аналогічно для поковок всіх типів. Ці два етапи досить вивчені. Третій етап - вільне витікання металу для оформлення фланця - мало вивчений. При штампуванні поковок з плоскими фланцями, так само як і при виготовленні попередньої заготовки для штампування шестерень зі складним вінцем, незалежно від способу

прикладання навантаження основним фактором, що визначає межі осередку деформації і форму фланця є відношення висоти фланця до діаметру заготовки [77, 78, 79]. Четвертий етап деформування полягає в заповненні кутових порожнин. При застосуванні процесу одноперехідного штампування вводиться ряд технологічних обмежень, пов'язані з розподілом течії металу. У випадках, коли діаметри верхньої і нижньої маточин різні, діаметри зрівнюються в більшу сторону, що призводить до зниження коефіцієнта використання металу.

Одним із шляхів інтенсифікації процесу штампування є використання пластичності матеріалу при певних температурно-швидкісних умовах деформування [70, 71, 78-82,]. Так в роботі [71] представлені схеми технологічних процесів видавлювання і висадки стрижневих деталей з широким фланцем за один перехід на основі використання ефекту швидкісного удару. При цьому процес висадки фланця і процес прямого видавлювання стрижня протікають послідовно, що призводить до збільшення навантажень на деформуючий інструмент на кінцевому етапі деформування.

Підвищити коефіцієнт використання металу на 15-35% при відкритому штампуванні можна за рахунок застосування елементів радіального, прямого або зворотного видавлювання [76-80]. Однак, дані способи не знайшли широкого застосування в промисловості через недостатнє теоретичне опрацювання. Для забезпечення кінцевої формозміни потрібне застосування складного штампового оснащення, що збільшує час на пошук і розробку оптимальних режимів і схем деформування.

Значно розширити можливості отримання складнопрофільних деталей можна шляхом освоєння способів комбінованого видавлювання, заснованих на поєднанні прямого, зворотного і поперечного видавлювання [69, 77, 80]. Процеси комбінованого видавлювання поєднують в собі переваги поздовжнього і поперечного видавлювання. Даним способом можна отримувати деталі більш складної форми в порівнянні з традиційними способами штампування [71, 72, 74, 78]. Застосування процесів

комбінованого видавлювання дозволяє збільшити коефіцієнт використання металу до 0,98 за рахунок максимального наближення форми і розмірів заготовок до параметрів готової деталі. Завдяки цьому досягається значна економія металу, зменшується трудомісткість подальшої обробки різанням. Ці особливості дозволяють застосовувати процеси комбінованого видавлювання замість лиття, гарячого штампування і обробки різанням при виробництві заготовок і деталей різної конфігурації з чорних і кольорових металів і їх сплавів [69, 78, 80-89].

Для отримання складнопрофільних деталей з фланцем доцільно використовувати комбіновані способи штампування видавлюванням, активно регулюючи кінематику течії металу в порожнині штампа. В роботі [40] представлена схема, яка генерує процеси комбінованого видавлювання. Прості схеми прямого, зворотного і поперечного видавлювання комбінують в різних варіантах, як за часом, так і по шляху деформування за рахунок синхронного або асинхронного переміщення складових частин деформуючого інструменту.

На підставі результатів аналізу конфігурації складнопрофільних стрижневих деталей з фланцем і аналізу класифікаційних таблиць способів їх отримання, представлених в роботах [71, 77-79, 81, 82], можна зробити висновок, що найбільш ефективний переклад їх виготовлення зі штампування у відкритих штампах на точну маловідходне штампування в закритих штампах з елементами комбінованого видавлювання [76-78].

Узагальнюючий аналіз технологічних процесів отримання стрижневих деталей з фланцем і схем деформування показав, що здійснення операцій формоутворення може відбуватися за шістьма основними схемами деформування [69-72, 78-80]:

- пряме видавлювання ступеневого стрижня;
- пряме видавлювання з подальшим розкочуванням;
- відкрите або закрите штампування за кілька переходами з елементами прямого видавлювання;
- висадка з редукуванням;

- комбіноване поперечно-пряме або поперечно-зворотне видавлювання;
- комбіноване штампування з елементами комбінованого видавлювання і осадки фланця по ходу процесу.

Комбінування схем радіального і зворотного (прямого) видавлювання відрізняється меншою енергоємністю процесу в порівнянні з багатоперехідним штампуванням, більшою стійкістю вихідної заготовки в області фланця і різноманітністю можливих технологічних схем силового і кінематичного впливу на заготовку [68, 69, 74, 80-82].

Приклади освоєння комбінованих процесів штампування видавлюванням східчастих стрижневих деталей з фланцем вельми обмежені. Ці процеси вимагають вивчення напружено-деформованого стану, аналізу силового режиму, кінцевого і граничного формозмінення [68, 72, 73, 78]. Тому, для підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування необхідно вирішити завдання, що стоять перед технологами і конструкторами за визначенням силового і кінематичного режимів деформування на основі моделювання комбінованого видавлювання і комбінованого штампування.

В роботах [36, 40-42] також зазначалося, що на кінцевих стадіях процесу можливе зменшення обсягу задирок за рахунок зворотної течії деякої частини металу з задиркою в порожнину штампа, що відповідає схемі деформування як один з можливих варіантів кінематики течії металу. На цьому етапі відбувається процес, аналогічний з процесом осадки у підкладних кільцях. Як відомо з робіт теорії ОМТ [43-45], процес перебігу металу у фланці по двох протилежних напрямках характеризується наявністю площини розділу течії.

Дослідженню осадки у підкладних кільцях присвячено багато робіт [42-43, 75]. В роботі [40] представлений аналіз процесу осадки з затікання металу в осьовий відросток. Даний процес розглянуто як окремий випадок штампування у відкритих штампах. Дослідження формозміни процесу проведено двома методами теоретичного аналізу: методом полів ліній

ковзань і методом вирішення наближених рівнянь рівноваги і пластичності. При ускладненні конфігурації деформуючого інструменту, а саме при наявності ступеневого стрижня, аналіз процесу штампування за допомогою представлених виразів скрутний.

В роботах Л. Д. Оленина [83-87] наведені приклади аналізу силового і деформаційного режиму процесів комбінованого видавлювання деталей типу «стакан з осьовим відростком» енергетичним методом. Аналіз виконано для квазістаціонарних стадії, коли пластичною деформацією охоплений весь обсяг між дном контейнера і торцем пуансона, а пластичними зонами, що примикають до виходів в відповідні канали, залишається зона недеформованого металу. Аналіз проводився з варіюванням геометрії осередка деформування і положення площини розділу течії металу.

В роботах зазначалося, що для розрахунку формозміни в процесах з одночасним перебігом металу за двома або більше напрямків необхідна додаткова умова мінімуму роботи деформування, так як ці процеси є саморегульовані і протікають в оптимальному енергетичному режимі. Також встановлено, що головними факторами управління течії металу є додаткові навантаження, а вплив тертя не настільки істотно.

Узагальнюючий підхід для аналізу процесів комбінованого видавлювання на основі методу верхньої оцінки було запропоновано І. С. Алієвим в роботах [87-93], а пізніше і В. М. Гридасова [90]. Процес поділяється на ряд стадій, на кожній з яких течія металу представляється квазістаціонарним процесом. В роботах [88-92] зазначалося, що при протіканні процесу в оптимальному саморегульованому енергетичному режимі розробка технологічного процесу ускладнюється, тому що кінцева геометрія деталі не може бути визначена однозначно по зміщеним обсягами металу, а залежить від безлічі технологічних факторів. Вибір підходу для аналізу того чи іншого технологічного процесу в значній мірі залежить від правильного вибору кінематично можливого поля швидкостей [36, 37, 40-42, 82, 94].

У роботах А. А. Родіонова [95], А. Ю. Аверкієва [96] і їх співавторів розроблені пристрої з рухомими пів матрицями для видавлювання фланців на трубчастих заготовках.

Найбільш вивченим процесом можна вважати поздовжнє видавлювання, причому інтерес до способів прямого і зворотного видавлювання не знижується і в останні роки. Відпрацьовано як теоретичні аспекти, так і практичні рекомендації стосовно до розрахунків технологічних режимів. Слід зазначити роботи А. М. Дмитрієва та А. Л. Воронцова [97-99], а також робота з аналізу нових схем деформування [100]. Методами теоретичного аналізу успішно вирішені завдання обліку зміцнення, розрахунку накопиченої деформації, прогнозування властивостей і нерівномірності деформацій та ін.

Процеси поперечного та комбінованого поздовжньо-поперечного видавлювання слід віднести до менш вивчених і тому недостатньо поширеними у виробництві. Завдання видавлювання циліндричних і конічних потовщень розглянуті в роботі, виконаній в МГТУ ім. Н.Е. Баумана [25].

Відомі також рішення О. К. Савченко [101] та інших авторів [98, 100] для радіального видавлювання конічних потовщень. Їх особливість, в тому, що розглядаються випадки спрощеного симетричного радіального видавлювання з 2-х сторонньою подачею металу в осередок деформації. Відповідно, розрахункова схема заснована на припущенні про симетричну форму вогнища деформації щодо координатних осей, в силу чого рішення виходить менш трудомістким. У той же час з роботи А. Г. Овчинникова [25] відомо, що більш поширена і реалізована в штампах схема з односторонньою подачею металу вимагає значно більших (на 30-35%) сил деформування. Це є достатньою підставою для вирішення завдань знаходження силових параметрів деформування для схем деформування - радіального видавлювання з односторонньою подачею. Важливо також дотримання експериментально спостерігаємій картині течії і формі осередку деформації

при вирішенні задач аналізу деформаційних процесів і формозміни.

У роботах А. Н. Пасько, А. А. Харитонova та ін. авторів [102, 103] наведені чисельні та експериментальні результати в порівнянні силових режимів і формозміни при штампуванні висадкою і радіальним видавлюванням внутрішніх і зовнішніх фланців. Несподіваними є висновки [103] про сильний вплив величини тертя на поверхні опрацювання на зміщення зони зміцнення в осередку деформації, а також твердження про істотне перевищення ступеню деформування при радіальному видавлюванні потовщень в порівнянні з висадкою. В роботі [104] на прикладі радіального видавлювання показана принципова можливість реєстрації інтегральних сил тертя в вертикальній порожнині матриці, чому в чималому ступені сприяють сприятливі особливості даного процесу.

1.4 Аналітичний аналіз процесів об'ємного штампування

У роботі І. С. Алієва, та ін. [105] представлений спосіб виготовлення виробів з боковими виступами, розташованими на різному рівні уздовж осі виробу. На рис. 1.1 – а, показано розміщення заготовки в матриці (ліворуч) і деформування її на проміжній стадії двостороннім поперечним видавлюванням (праворуч); на рис. 1.1 – б, показані стадії процесу отримання готового виробу з двома фланцями після поперечного видавлювання з двосторонньою подачею (ліворуч) і після калібрування фланця (відростка) на площину (праворуч); на рис. 1.2 наведені одержувані типові вироби.

Даний спосіб здійснюють наступним чином. Заготовку 1 переважно в холодному стані розміщують в складову матрицю 2 на протипуансон 3 і діють на неї зі швидкістю V_1 пуансоном 4. З моменту прикладення пуансоном 4 осьового навантаження до заготовки 1 і початку деформування останньої в напрямку руху пуансона 4 переміщують також матрицю 2 з формотворними поперечними, наприклад, канальними, порожнинами 5 і 6,

розташованими похило під гострим кутом β до осі, причому швидкість руху матриці V_2 переважно в два рази менше швидкості пуансона V_1 .

Після завершення видавлювання напівфабрикат видаляють з матриці, а виступ розгортають в поєднанні з формуванням до положення, перпендикулярного до поздовжньої осі виробу, тобто осьовою дією пуансона 7 і вставки 8 калібрують на площину (див. рис. 1.1, б). При необхідності виступи можуть бути розгорнуті на будь-який необхідний кут β шляхом переміщення пуансона 7 і вставки 8 з потрібним кутом нахилу робочих поверхонь. Використанням двох встановлених одна над іншою і розсувних у бік виступів вставок 8 можна здійснити калібрування одночасно обох виступів.

Таким чином, спосіб дає можливість отримувати поперечним видавлюванням порожнисті і суцільні вироби з виступами, відростками або фланцями різних конфігурацій, розташованими на різному рівні уздовж поздовжньої осі заготовки (див. рис 1.2). Оптимальні значення кутів β між векторами руху металу і подачі металу пуансоном при видавлюванні відростків і фланців, що забезпечують мінімум енерговитрат, знаходяться в межах $32...55^\circ$, тобто значно менше прямого кута. Однак запобігання деформування центральної зони заготовки між порожнинами досягається при кутах $\beta < 75...80^\circ$, що дозволяє рекомендувати ці значення β для практичної реалізації способу.

Один з можливих варіантів безоблойного штампування видавлюванням поковок з відростком суцільного перерізу розглядали в роботі [106]. У ньому розглядається підвищення якості одержуваних деталей за рахунок отримання напрямку волокна, що збігається з контуром деталі.

На рис. 1.3 показано положення деформувального інструменту і заготовки в момент початку (див. рис. 1.3 а, в) та в кінці (див. рис. 1.3 б, г) процесу бокового видавлювання деталі з відростками.

Спосіб здійснюють наступним чином. Півматриці 1 і 2 замикають силою P_1 . Нагріту заготовку 3 поміщають в основну порожнину рівчака і

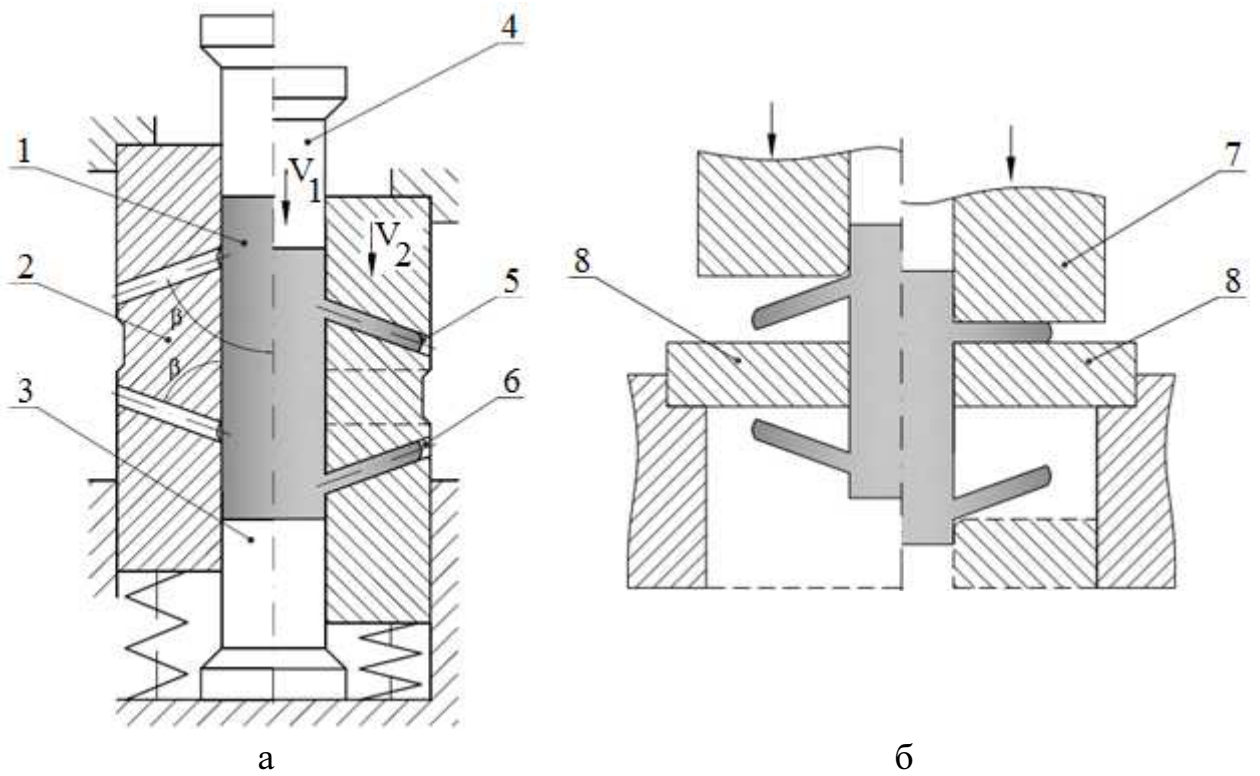


Рисунок 1.1 – Виготовлення виробів з боковими виступами, розташованими на різних рівнях вздовж осі заготовки

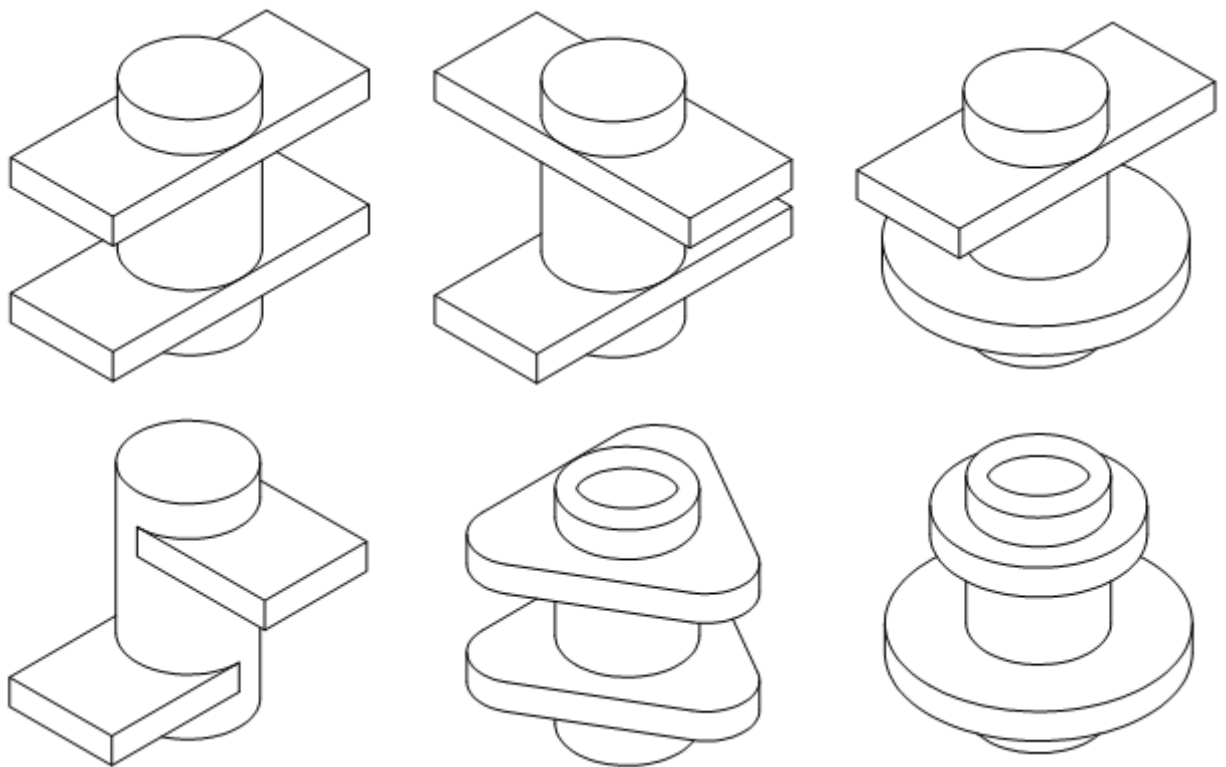


Рисунок 1.2 – Отримувані типові вироби

приводять в рух пуансон 4. Останній, впливаючи на заготовку 3 силою P_2 , видавлює матеріал в бокові порожнини рівчака. Потім пуансон 4 відводять від поковки 5, розмикають півматриці 1 і 2 і виштовхують поковки штовхачем 6. При штампуванні в нероз'ємній матриці пуансон в процесі деформування діє на бокові поверхні заготовки і відростків до повного заповнення рівчака штампа. Напрямок волокна показано умовно стрілками.

Для збереження спадкового волокна у торця заготовки необхідно витримати відстань від торців вихідної заготовки до найближчих осей бокових відростків не менше ширини вихідної заготовки.

При дотриманні співвідношення виключається втрата стійкості матеріалу в місці видавлювання бокових відростків.

$$H < 4h - d,$$

де H – висота вихідної заготовки;

h – висота приймальної порожнини для видавлюємого відростка;

d – діаметр вихідної заготовки.

Промислове випробування показало, що запропонований спосіб отримання деталей з відростками дозволяє отримувати якісні деталі за рахунок збігу напрямку волокна з контуром деталі, що, в свою чергу дозволяє підвищити герметичність деталей і складальних одиниць трубопровідної арматури, енергетичних установок при їх експлуатації.

Отримання деталей з боковими зовнішніми виступами приведено в роботі [107]. Підвищення якості виробів досягається за рахунок запобігання утворенню затисків в процесі формозміни і досягнення більшої однорідності механічних властивостей за об'ємом деталі. В процесі видавлювання виступу його переміщують щодо заготовки, впливаючи на його бокову поверхню.

На рис. 1.4 представлена схема бокового видавлювання деталі з відростком в початковій стадії (див. рис. 1.4 а), в проміжній стадії (див. рис. 1.4 б) та в кінцевій стадії (див. рис. 1.4 в).

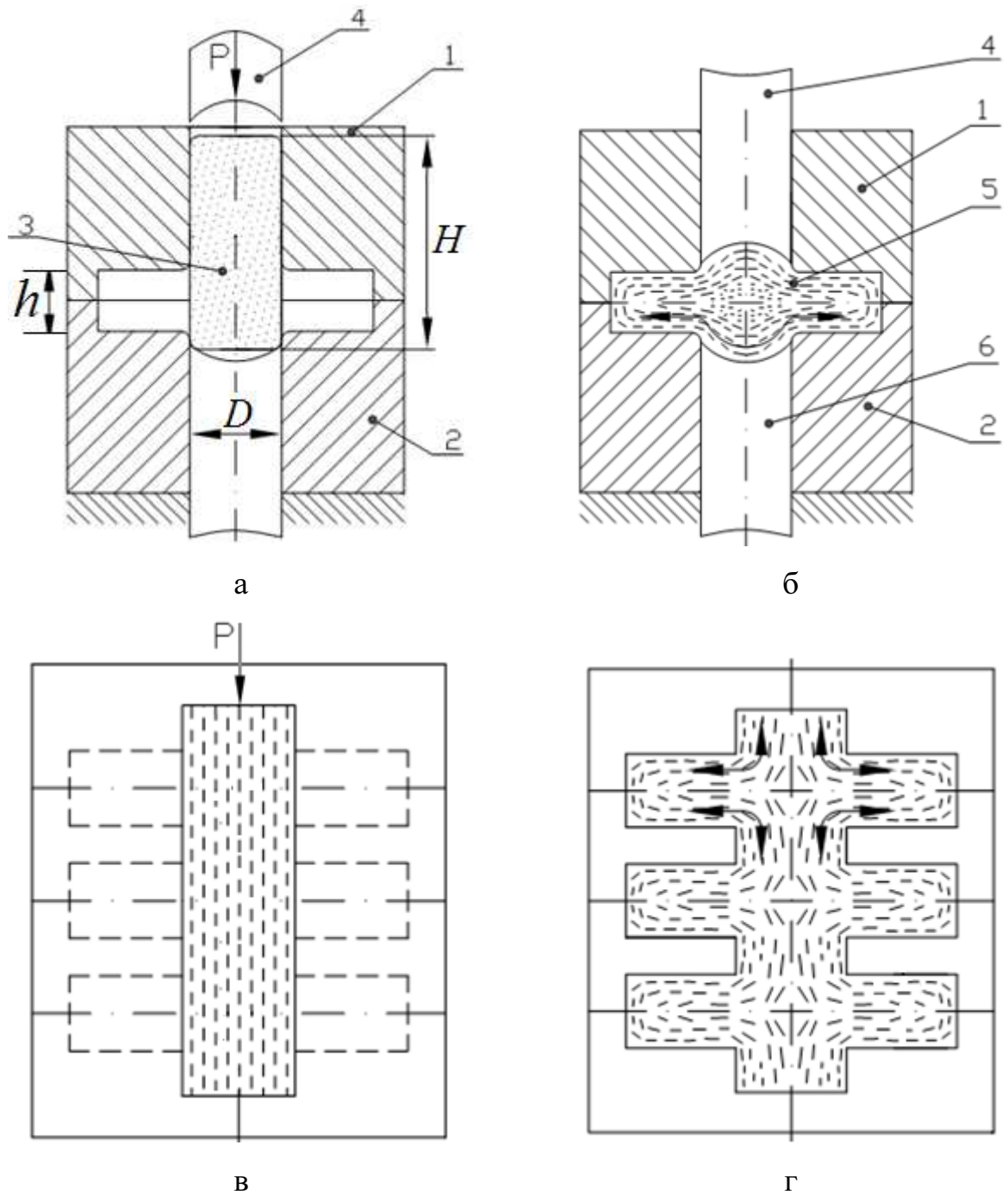


Рисунок 1.3 – схема бокового видавлювання для отримання деталі з відростками в момент початку (а, в) та в кінці процесу (б,г)

Процес здійснюється в такий спосіб: заготовку 1 розміщують в нижній півматриці 2, канал течії відростку (кільце) 3 з порожниною під виступ закріплена на планці 4, яка може переміщатися. Потім прикладають деформуючу силу за допомогою пуансона 5, який виконує спочатку відкриту, далі закрите видавлювання заготовки і починає витіснення металу в

порожнину матриці 3. При цьому близько нижнього торця заготовки 1 виникає застійна зона А. Осередок деформації локалізується в зоні BCD. У зоні вище лінії BC утворюється жорстка зона. Оскільки осередок деформації локалізується близько формотворної порожнини канала течії відростку (кільце) 3, то з переміщенням матриці за допомогою планки 4 переміщається і осередок деформації в зоні BCD. При переміщенні осередку деформації застійна лінія зміщується, а лінія DB, що обмежує застійну зону (див. рис. 1.4, б) переміщується і позначається B'D'.

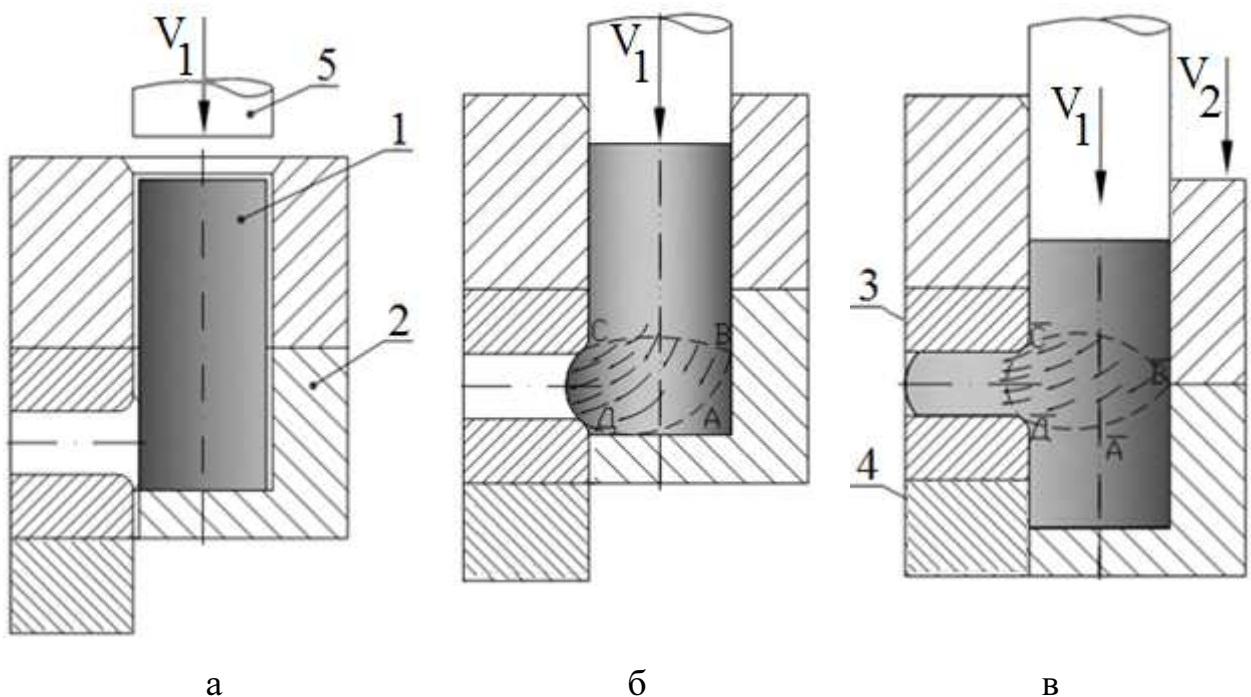


Рисунок 1.4 – схема бокового видавлювання для отримання деталі з відростком в момент початку (а), в проміжній стадії (б) та в кінцевій стадії (в)

У зв'язку з безперервним зміщенням межі застійної зони утворення затиску стає неможливим. Осередок деформації є зоною максимальних зсувних деформацій. Переміщення осередку деформації викликає інтенсивне опрацювання структури вихідної заготовки по ходу його руху. Збільшення ступеню накопиченої деформації та більш рівномірний розподіл за об'ємом одержуваної деталі викликає більш рівномірний розподіл механічних властивостей і поліпшення її якості. Таким самим способом забезпечується

формоутворення деталей з різною кількістю зовнішніх виступів, розташованих на одній висоті. Запропонований спосіб формоутворення деталей з боковими зовнішніми виступами дає можливість отримання виступів будь-якої довжини без утворення затисків і можливість отримання однакових властивостей міцності за об'ємом деталі.

У роботі Yılmaz Can та співавторів [108] було розроблено вертикальне рішення для бокового видавлювання шпонкової форми. Пропонується просте кінематично допустиме поле швидкості з параметром оптимізації. З запропонованого поля швидкості визначається верхнє граничне розв'язування за відносним тиском і навантаженням видавлювання щодо вибраних параметрів процесу. Результати порівнюються з теоретичними та експериментальними результатами з посиланням на ілюстрацію дійсності запропонованих полів швидкості. Це вказує на те, що представлений аналіз дає краще рішення верхнього краю.

Проаналізовано бокове видавлювання, використовуючи метод верхньої оцінки. Було запропоновано кінематично допустиме поле швидкості, в якому був застосований параметр оптимізації для представлення форми поверхні розриву. Зроблено висновок, що відносний тиск видавлювання збільшується зі збільшенням кількості зубів і коефіцієнтом тертя. Зниження товщини з постійним діаметром заготовки та такою ж кількістю зубів і коефіцієнтом тертя призводить до вищої відносного видавлювання. Запропоноване поле швидкості дає більш високі значення навантаження, ніж отримані в експерименті значення.

Найбільш повний теоретичний і експериментальний аналіз процесів отримання порожнистих деталей з фланцем, особливостей радіального і бокового видавлювання, представлений в роботах А. Г. Огороднікова, І. С. Алієва, Л. І. Алієвої, А. І. Лобанова і О. К. Савченко [109-112].

У цих роботах представлені рішення по визначенню силового режиму радіального видавлювання, сили розкриття матриць і формозміни, дані

рекомендації і алгоритм проектування технологічних процесів і штампового оснащення.

У роботах Л. І. Алієвої для визначення силових параметрів, режимів деформування процесів штампування видавлюванням (як для плоскої, так і для осесиметричної задачі) використовується метод кінематичних модулів, запропонований в роботах [91, 117], заснований на методі верхньої оцінки. При цьому підході в деформуємому зразку виділяються осередки деформації, які розбиваються на ряд «стандартних» кінематичних модулів [91, 118].

У роботах [115, 116] на основі аналізу форм поковок виділені основні схеми штампування в роз'ємних матрицях. Характерними ознаками прийняті орієнтування площині роз'єму по відношенню до осі деформувального пуансону, коли площина роз'єму розташована в напрямку руху пуансону або перпендикулярно його руху.

Залежно від орієнтування площині роз'єму матриць до осі пуансону в роботі [117] штампи розділені на: штампи з поперечним роз'ємом, штампи з поздовжнім роз'ємом і зі змішаним поздовжньо-поперечним роз'ємом.

Процеси холодного видавлювання відносяться до прогресивних методів обробки тиском і мають ряд технічних і економічних переваг перед іншими процесами обробки металів тиском. Широке поширення у виробництві може отримати комбіноване видавлювання, що дозволяє виготовляти складнопрофільовані деталі унікальної конфігурації.

Характерним недоліком цього процесу є нестійкість швидкостей течії матеріалу в різних напрямках. У виробництві це призводить до того, що технолог повинен задавати значні припуски на обрізку, а якщо вони не виконуються, то деталь вважається остаточним браком, при цьому коефіцієнт використання металу істотно скорочується. За допомогою методу розривних полів швидкостей вирішена задача комбінованого видавлювання деталей типу ступінчастих втулок з додатком протитиском до елементів деталі. Досліджено вплив додаткових сил на кінематику пластичної течії, силові

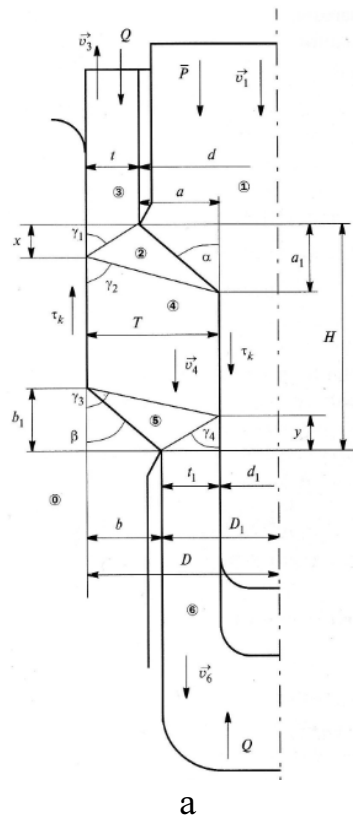
параметри і стійкість процесу деформування.

При комбінованому видавлюванні ступінчастої втулки з похилою перемичкою деформація локалізується в клинових каналах інструменту, тому для досягнення нестационарної стадії необхідно зблизити кромки інструменту до відстані, близької до товщини стінки виробу. Таким чином, стаціонарна стадія займає більшу частину часу деформування, і чим більше нахил перемички, тим більше цей час.

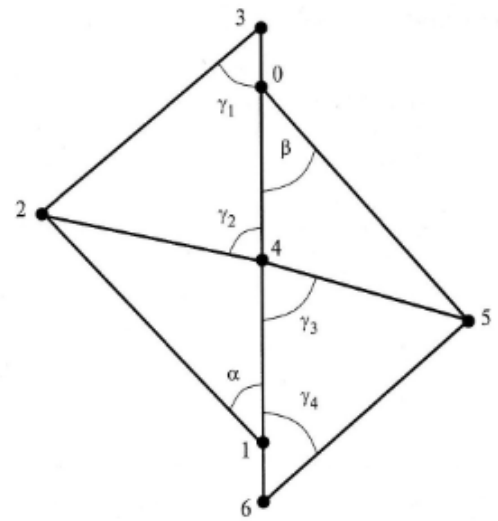
Найбільш прийнятним в енергетичному і деформаційному планах є спосіб видавлювання з додатком до тої чи іншої ділянки виробу додаткових сил Q , що не викликають пластичної деформації. Передбачати, куди переважно потече метал, практично неможливо. Для управління цим процесом пропонується впливати на видавлені частини виробу силами протинатягнення або протитиску, що не викликають пластичну деформацію в видавлених елементах деталі.

Розривне поле швидкостей на схемі комбінованого видавлювання (рис. 1.5, а) складається з двох осередків деформації (блоки 2 і 5 (цифри в кружечках)), проміжної непродетформованої частини заготовки (блок 4) і елементів виробу (блоки 3 і 6). Пуансон і матриця (блоки 1 і 0) представляють собою відповідно рухомий і нерухомий інструмент. Спочатку швидкість V_4 непродетформованої частини заготовки на годографу (див. рис. 1.5, б) задаємо довільно. Для того аби керувати точністю виготовлення деталей застосування протитиску дозволяє стабілізувати процес деформування та дає можливість керувати довжинами елементів виробу [118].

Новим методом, що дозволяє описати формо- та дефектоутворення для зниження трудомісткості і підвищення точності визначення кінематичних параметрів, зокрема процесу осадки симетричної заготовки, є метод візі пластичності [119]. Сутність розробленого нового методу візіпластичності (рис. 1.6, а) полягає в тому, що заготовка 1 з пластичного матеріалу

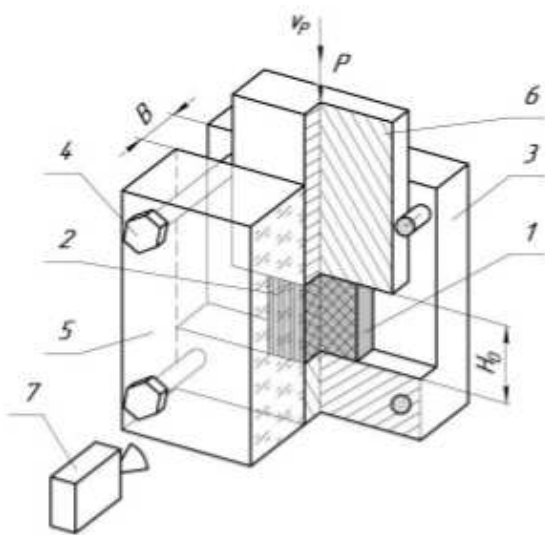


а

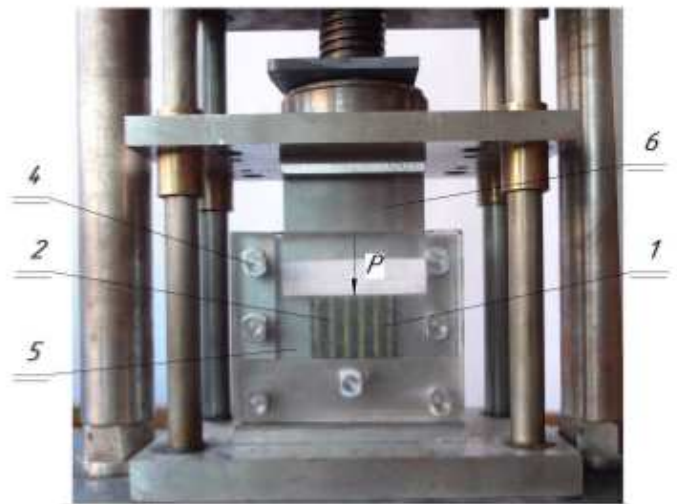


б

Рисунок 1.5 – Схема комбінованого видавлювання ступінчатої втулки з протитиском Q (а) та годограф швидкостей (б)



а



б

Рисунок 1.6 – Пристрій для універсального візіопластичного методу дослідження процесу осадки: а – принципова схема пристрою; б – робоче положення пристрою на гвинтовому лабораторному пресі (цифрове позначення відповідає позначенню на схемі – а)

(пластиліну), яка містить на боковій поверхні вставки (смуги) 2 з пластиліну іншого кольору, встановлюється в збірну матрицю, що містить бокову поверхню і підстави зі сталі 3, яка за допомогою стяжних болтів 4 з'єднується з прозорою боковою стінкою 5 матриці, до якої прилягає бокова поверхня заготовки з кольоровими вставками. Деформація заготовки здійснюється пуансоном 6, торцева поверхня якого може мати різну конфігурацію. Зміна положення і форми кольорових смуг 2 в процесі осадки заготовки 1 зі швидкістю V_p фіксується цифровою кінокамерою 7 через прозору бокову стінку матриці 5.

Проте застосування його для більш складних процесів поки що є не раціональним та технічно складним.

Широке поширення при аналізі технологічних задач обробки металів тиском знаходить метод скінченних елементів.

Метод скінченних елементів (МСЕ) відноситься до сучасних методів чисельного аналізу. Народження його відноситься до другої половини 50-х років минулого століття. Базою для його появи послужили роботи в таких напрямках як розвиток методів розрахунку стрижневих систем, застосування методу скінченних різниць та розробка варіаційних методів рішення задач теорії пружності і будівельної механіки. Неоціненний внесок у ці дослідження внесли радянські вчені І. Г. Бубнов, Б. Г. Галеркін, Л. В. Канторович, В. З. Власов, А. Р. Ржанцин, С. Г. Михлин та багато інших. Розвитку та популяризації МСЕ сприяли А. Ф. Смирнова, В. А. Постнова, О. Зенкевича і цілого ряду інших вчених. МСЕ протягом короткого часу розвинувся в самостійну галузь науки, що одержала широке поширення в області вирішення граничних задач математики, фізики і особливо механіки суцільних середовищ. Швидкий розвиток МСЕ йшов поряд з прогресом комп'ютерної техніки і її застосуванням у різних областях науки і інженерної практики.

Метод скінченних елементів включає різні підходи, в яких для визначення напруження, деформації та переміщення матеріал умовно

розбивають на окремі елементи, з'єднані в вузлових точках. Застосування цього методу може успішно проводитися як для жорсткопластичного матеріалу, так і для пружного. Цей вибір, також як і вибір скінченного елемента, здійснюється, виходячи з постановки задачі і раціональності використання того чи іншого підходу, описаного в МСЕ. Задача граничних умов і введення деяких гіпотез дозволяє в значній мірі спростити пошук рішення, хоча і в деякій мірі усереднює результат. Однак слід зауважити, що для частини процесів МСЕ може бути єдиним методом, що дозволяє досягати необхідного результату з достатнім ступенем точності.

Одним з найбільш трудомістких задач при використанні скінченно-елементного аналізу є побудова скінченно-елементної сітки. З метою спрощення підготовки та перевірки вхідних даних застосовується автоматична побудова сітки, що стало можливим завдяки досить високому ступеню розвитку комп'ютерної техніки і прикладного програмного забезпечення. Крім того, автоматизація дозволяє зменшити помилки операторів, забезпечити регулярність сітки, спростити параметричні дослідження.

Ротаційне штампування фланця з стрижнем - це успішне застосування ефекту роторного штампування. Для отримання складно-профільованих деталей у роботі G. Liu та інших [120] за допомогою МСЕ досліджувався напружено-деформований стан в процесі ротаційного видавлювання (рис. 1.7). На початковому етапі радіальне подовження матеріалу у верхній частині відіграє значну роль у формуванні фланців. Коли фланці контактують з нижньою плитою, то тангенціальне подовження більше, ніж радіальне подовження. Аналіз швидкості напруження та деформації при ротаційному формуванні круглого диску з центральною дією показує, що умови деформації не є абсолютно осесиметричними через часткове навантаження. Отже, остання частина не є абсолютно осесиметричною. У той же час, недоліки дефектів можуть бути передбачені, щоб допомогти в розробці штампів та процесу. За допомогою симуляції з'ясовуються причини

руйнування ударів. Показано, що удари впливають на металевий потік. В результаті дослідження було встановлено, що під час видавлювання фланця максимальне значення компонентів напружено–деформованого стану має місце у верхній частині деталі, яка контактує з обертовими пуансонами.

Значний прогрес у технологіях штампування, включаючи низьку вартість виробництва, дозволив інтенсивно використовувати об'ємне штампування. Виробничі компанії зосередили особливу увагу на виробництві складних форм. Традиційні методи гарячого і холодного штампування мають власні обмеження для виготовлення складної форми. Гаряче штампування вимагає складної системи з відносно вищою собівартістю. Тому багатоступеневе штампування може бути вигідним для виготовлення складних фасонних деталей. Для побудови багатоступеневої системи штампування необхідно характеризувати механічні властивості у відповідності до системних параметрів конструкції, таких як температура, швидкість штампування та ін. В роботі K. S. Park та інших [121] був досліджений багатоступеневий процес комбінованого зворотного-прямого видавлювання для отримання складної профілізації деталей (рис. 1.8). Дослідження на основі МСЕ дозволило проаналізувати напружено-деформований стан заготовки в умовах закритого зворотного-прямого видавлювання та особливості заповнення кутів матриці в процесі деформування. На основі отриманих даних дані рекомендації особливостей формоутворення типових деталей без дефектоутворення.

У сучасній парадигмі розробки металоутворюючого продукту, одночасний і оптимальний дизайн системи продукту, процесу та формування є нетривіальним питанням, оскільки існує багато факторів впливу, які взаємодіють один з одним. У роботі M. W. Fu та інших [122] представлено методологію систематичної оцінки та перевірки одночасного проектування системи формування металів. Крім того, пояснюється роль, яку виконує симуляція в цьому процесі. Традиційний дизайн та розробка металообробної продукції, процесу та системи – це пробний та помилковий процес,

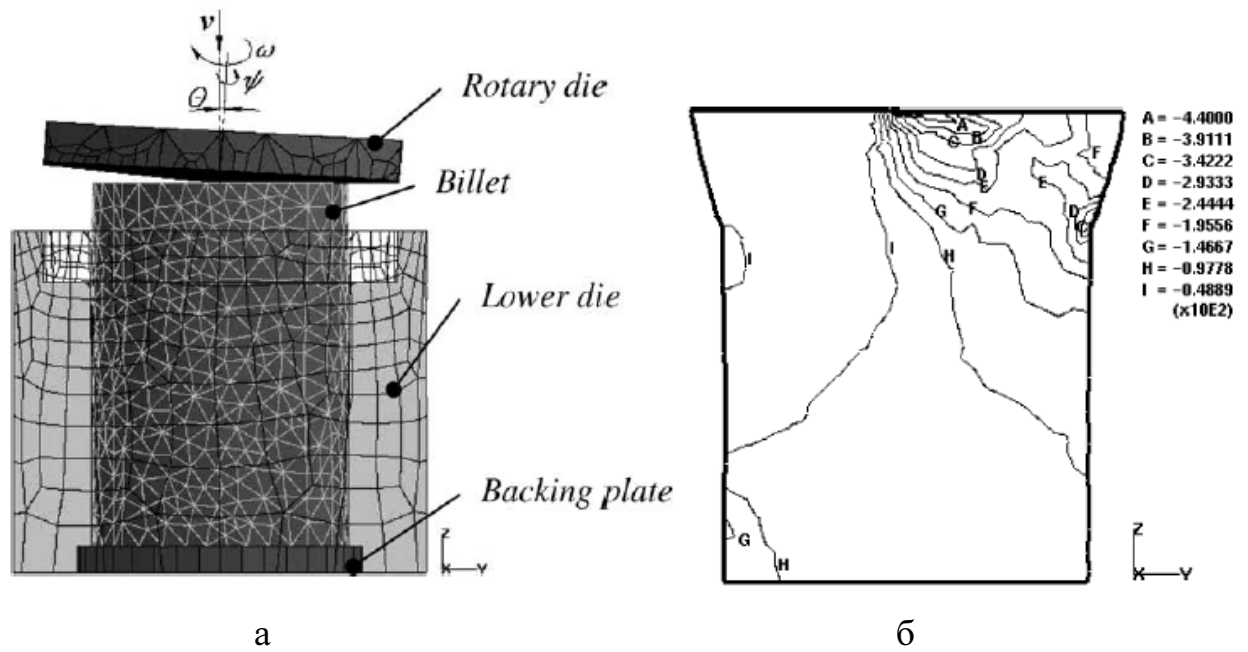


Рисунок 1.7 – Схема ротаційної висадки (а) та розподіл інтенсивності деформацій на заготовці(б)

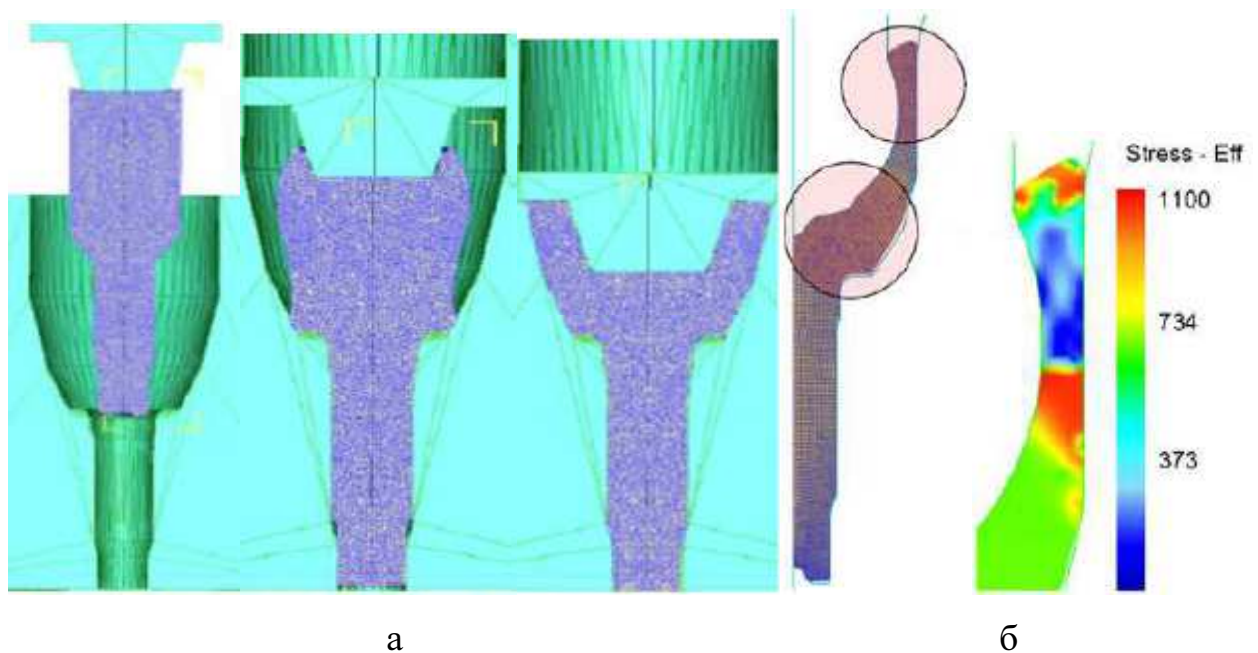


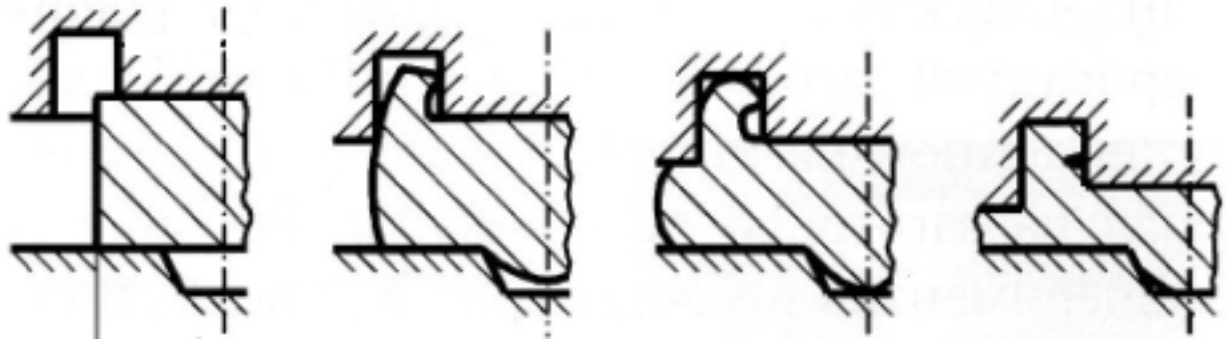
Рисунок 1.8 – Дослідження багатоступеневого процесу комбінованого прямо–зворотного видавлювання: а – формозміна заготовки; б – розподіл інтенсивності напруження

заснований на евристичному ноу-хау. Таким способом формування рішення є відсутність наукового обчислення та аналізу, а також багато разів вимагає фізичних випробувань в майстерні та дизайнерських змін. Для оцінки дизайну розроблені детальні критерії оцінки та використання критеріїв за допомогою технології моделювання для виявлення поведінки та характеристик конструкцій. Завдяки конкретним дослідженням розроблена технологія проілюстрована а її ефективність остаточно перевірена.

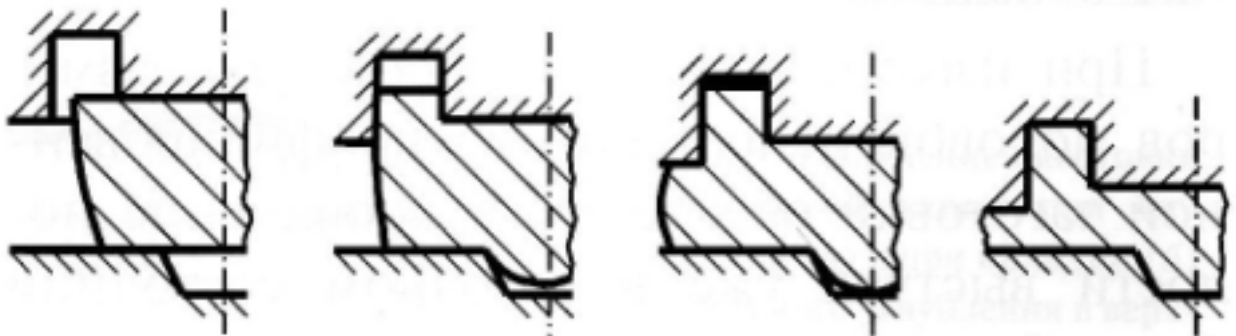
Симуляція допомагає оцінювати та перевіряти дизайнерські рішення у процесі переднього проектування та гарантує, що найкраще рішення для проектування можна отримати таким чином, щоб зменшити експериментальну роботу, скоротити витрати часу на випуск та скоротити вартість розробки. В дослідження розглянуті ці питання та розроблено методологію для оцінки та перевірки альтернативних дизайнерів для розробки інтегрованого процесу та продукту. Через тематичні дослідження ефективність розробленої технології перевірена.

Варіювання кінематичними умовами деформування дозволяє визначити формозмінення заготовки при осадженні з різними контактними умовами на верхньому і нижньому торцях (рис. 1.9). Отримано формули для визначення технологічних параметрів такого осадження, які зручні для практичного застосування. Висока точність розрахункових формул підтверджена значною кількістю експериментальних даних [123].

В умовах штампування в закритому штампі повного оформлення поковки досягти досить важко, - зокрема, залишаються незаповненими торцевій поверхні поковки (рис. 1.10). При цьому різко зростає сила штампування, що може привести до руйнування штампа. Тому застосовують поетапне штампування складнопрофільованого виробу, коли на другому етапі роботи проводять штампування у відкритому штамп [124]. Таким чином, встановлено, що за допомогою комп'ютерного моделювання в програмі DEFORM-3D можна аналізувати реальні процеси об'ємного штампування, зокрема, алюмінієвих сплавів. В даному випадку авторами роботи [126]

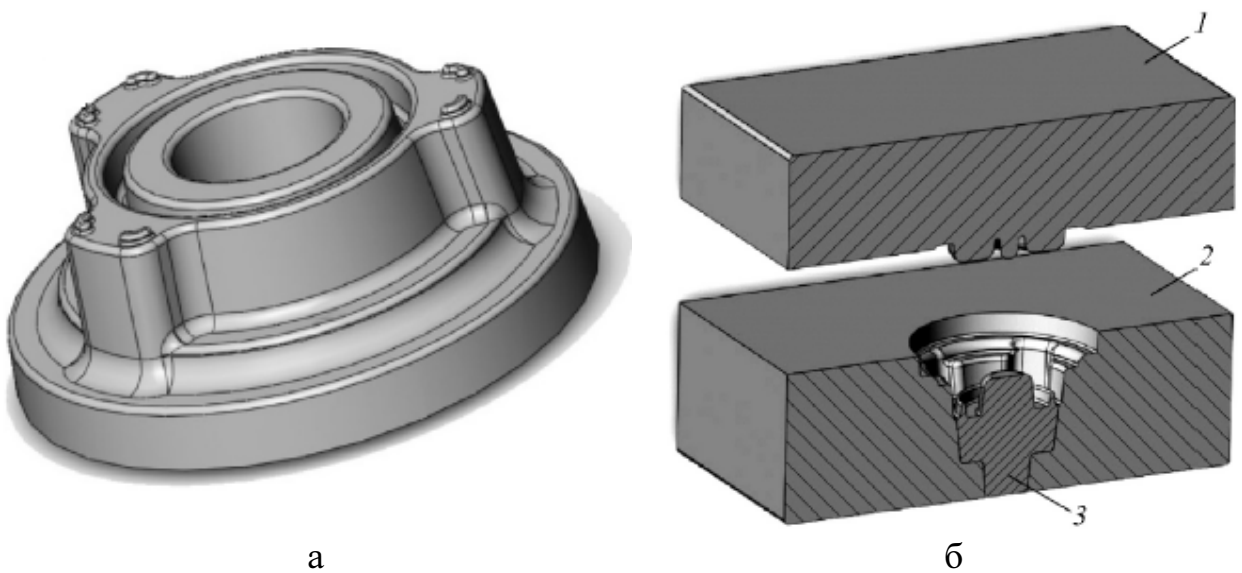


а



б

Рисунок 1.9 – Утворення дефектів (а) та бездефектне (б) об'ємне штампування заготовок



а

б

Рисунок 1.10 – Комп'ютерна модель закритого штампу: 1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – виштовхувач

розроблені оптимальні форми поковок, конструйовані рівчаки штампів з врахуванням основних елементів таких як ухили, радіуси заокруглень тощо.

В роботі [126] розглянуто процеси формоутворення головних частин на стрижневих заготовках методами холодного об'ємного штампування. Досліджено картини перебігу матеріалу і напружено-деформований стан заготовок. Проведено аналіз впливу геометричної форми головної частини на силові характеристики процесів.

Для комплексної оцінки впливу технологічних параметрів на силові і деформаційні характеристики процесу виготовлення головних частин на стрижневих заготовках і підвищення ефективності застосування даного процесу в умовах промислового виробництва необхідне проведення теоретичних і експериментальних досліджень.

У даній роботі досліджено процеси формування потайної конічної, конічної і циліндричної головних частин (рис. 1.11, а) на циліндричних стрижневих заготовках діаметром 17 мм з довжиною осаджуємої частини 29 мм зі сталі ШХ15. Обсяг сформованих головок приймали рівним 6600 мм.

Для дослідження кінематики течії матеріалу і напружено-деформованого стану заготовок використовували математичну модель на базі скінченно-елементного підходу, що дозволило розглядати процес висадки головної частини в тривимірній постановці. Об'ємним моделювали і заготовку, і інструмент. Розрахункові схеми процесів приведені на рис. 1.11, б. Процес висадки здійснювали на гідравлічному пресі номінальною силою 50 МН.

Аналіз розподілу інтенсивності напружень показав, що протягом всього процесу навантаження заготовки напруження, як правило, є стискаючі. У конічних головних частин мінімальні значення напружень спостерігаються на периферійній ділянці формуємої головки, а максимальні значення - в області найбільшого діаметра. Для циліндричної головної частини характерний більш рівномірний розподіл інтенсивності напружень по всьому деформованому об'єму.

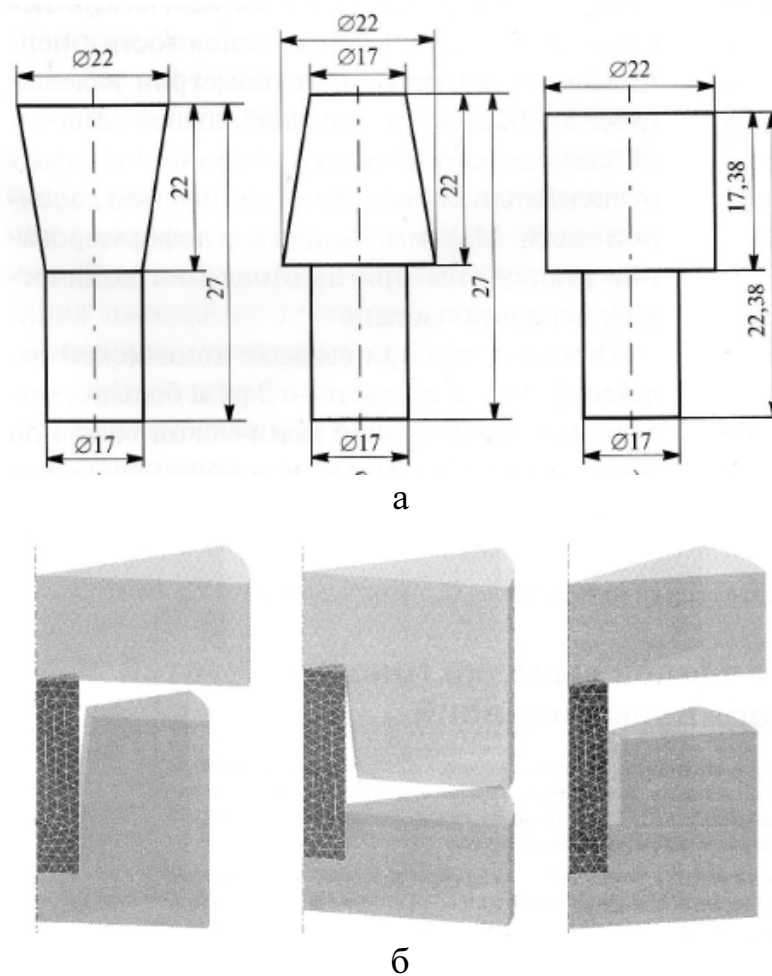


Рисунок 1.11 – Типові стрижневі вироби з різною конфігурацією головної частини (а) та схеми їх висадки

Слід зазначити, що інтенсивність напружень при висадці конічної головної частини на 15% вище, ніж при висадці конічної потайної та циліндричної головної частини. З аналізу картини розподілу деформацій за об'ємом заготовки слідує, що осьові деформації є стискаючі, а окружні і радіальні - розтягуючі. Максимальні значення деформації спостерігаються на торці потайної конічної головної частини і біля основи конічної і циліндричної головних частин.

Аналіз розподілу деформацій у пластичній області заготовки показав, що схема напружено-деформованого стану дозволяє досягати високих ступенів деформації без руйнування заготовки.

На основі результатів теоретичних досліджень встановлено залежності

енергосилових параметрів від геометрії виробів. Виявлено, що найбільший вплив на силу деформування головок надає відносний діаметр формованої головної частини. Максимальна сила деформування реалізується при виготовленні конічної головної частини. Відзначимо, що при висадці конічної головної частини сила майже в 2 рази більше, ніж при висадці потайної конічної головної частини, і на 20% більше, ніж при висадці циліндричної головної частини.

Кафедрою «Системи пластичного деформування» МГТУ «Станкин» проводяться роботи по розробці і впровадженню технології закритого штампування, в тому числі для виготовлення виробів автомобілебудування. Спільно з ВАТ «Тяжпрессмаш» виготовлений штамп з гідроблоком протитиском, призначений для закритого штампування виробів на універсальному пресі. Такий штамп встановлений в лабораторії кафедри на кривошипно-колінному пресі K0032 [127].

Особливість конструкції штампа полягає в тому, що завдяки послідовному поєднанню операцій висадки і видавлювання можна виготовити поковки складної форми, тобто конструктивно передбачена можливість змикання рознімної матриці після моменту затікання металу в її порожнину, при цьому хід нижньої півматриці становить $\Delta = H_0 - H_1$ (рис. 1.12) [126].

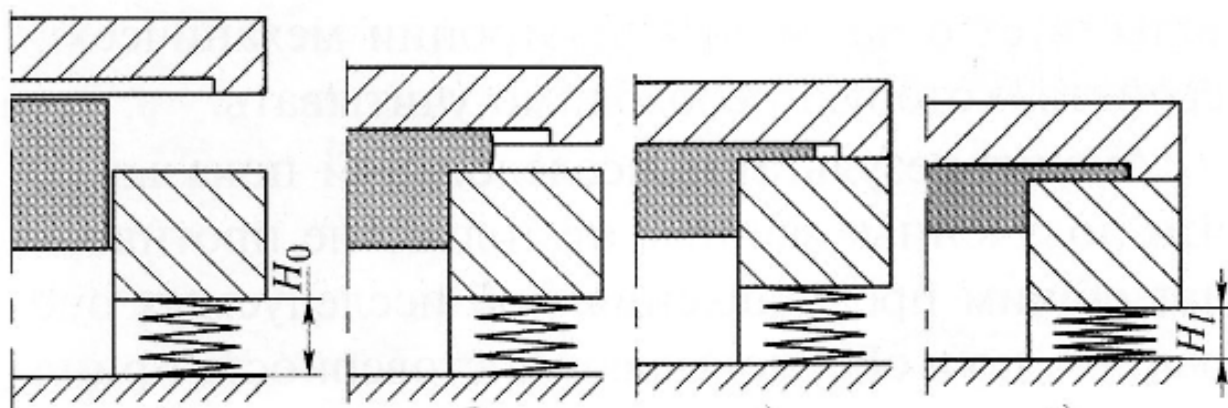


Рисунок 1.12 – Схеми закритого штампування з послідовним поєднанням операцій висадки і видавлювання

В результаті експериментального штампування були отримані поковки корпусу кульової опори зі сталі 45. Штампування здійснювали в гарячому стані ($T=1150^{\circ}\text{C}$). Перехід на закрите штампування для даної поковки зменшує витрату металу на 60 г. завдяки виключенню облою і на 40 г. завдяки зменшенню припусків і напусків. Таким чином, при масі поковки (за новою технологією) 0,36 кг. економія металу становить 22%. Розроблена технологія може застосовуватися для штампування корпусів кульових опор легкових автомобілів різних моделей і для поковок подібною конфігурації.

В результаті дослідження в роботі D. J. Lee [129] показано, що у комбінованому зворотно-прямому видавлюванні з боковою подачею з'являється такий дефект, як тріщиноутворення (рис. 1.13). Цей дефект виявляється в продуктах з невеликою товщиною, які необхідно пробити, і завдає шкоди точності розмірів та зменшенню матеріальних втрат. Дефект потоку, який виникає в поршневому штифті, має поганий вплив на міцність та тертя роботи поршневого штифта. Тому важливо передбачити та запобігти дефекту на ранній стадії розробки процесу. Найкращим способом, який може усунути дефектоутворення, є використання способів регулювання кінематики процесу на основі рухомих інструментів. Це дослідження пропонує нові процеси, які можуть запобігти появі дефекту. Потім результати порівнюються з результатами експериментів для верифікації. Ці результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними результатами.

Штампування конічної передачі має декілька переваг у порівнянні зі звичайним формуванням зубців за допомогою процесу різання. Наприклад, він знижує матеріальну втрату та виробничий строк, а також має перевагу у поліпшенні якості використання матеріалу в потоці пластикових матеріалів у зубцях передач. Загалом, штампування передач має послідовність технологічних процесів, що включає попереднє і кінцеве формування внаслідок геометричної складності профілю зуба. Останнім часом існує багато дослідницьких підходів для пошуку оптимального процесу та дизайну, а також для отримання інформації, пов'язаної з якістю, після

формування з моделювання за допомогою МСЕ. Для отримання складнопрофільованих деталей типу конус у дослідженні Y. K. Lee [130] на основі побудови тривимірної моделі встановлені особливості дефектоутворення у вигляді незаповнення кута інструменту (рис. 1.14). Для усунення дефекту незаповнення використовувалися зміни геометрії інструменту в процесі комбінованого видавлювання. Розроблена та застосована ефективна система генерації сітки для генерування початкової шестигранної структури сітчастих елементів і для ремонту побудованої

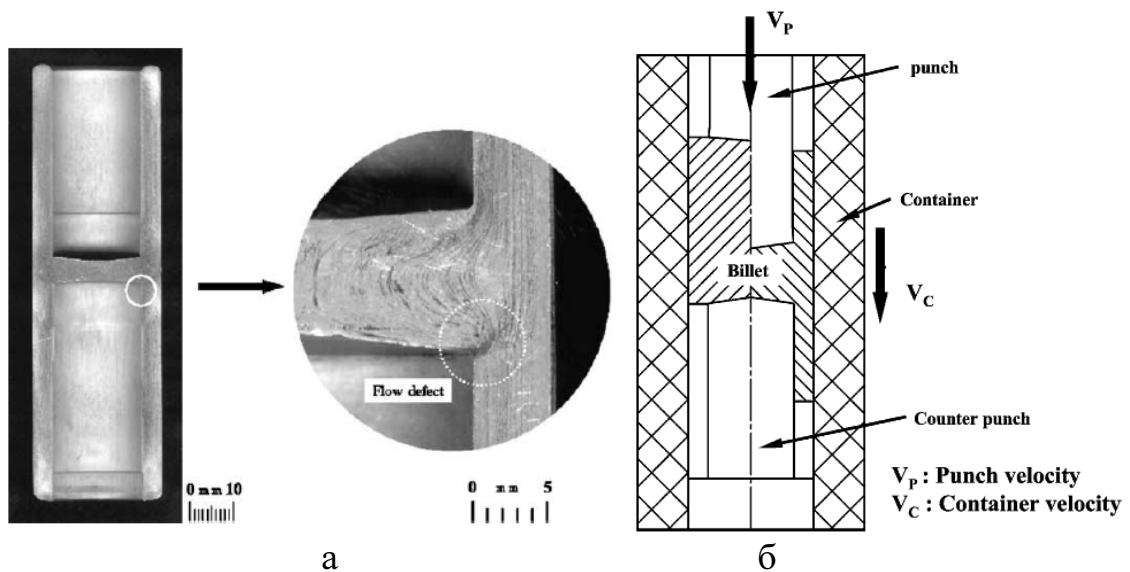


Рисунок 1.13 – Дефектоутворення при зворотно–прямому видавлюванні (а) та кінематичний спосіб для усунення дефекту (б)

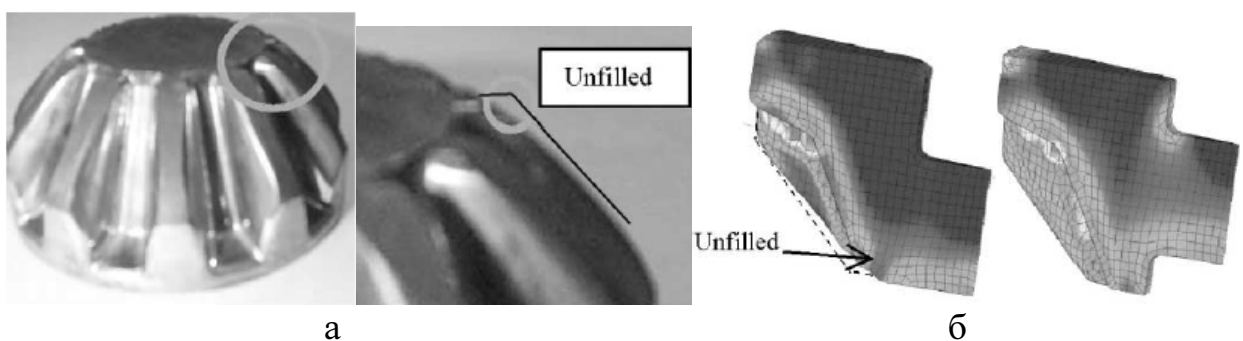


Рисунок 1.14 – Особливості формоутворення при видавлюванні конічних деталей з дефектоутворенням у вигляді незаповнення верхніх (а) та нижніх (б) кутів

шестигранної сітки, коли вона надмірно виражається протягом аналізу процесу формування. Отримана з симуляції схема зчеплення та перестановки виявилася ефективною для точного аналізу тривимірної проблеми штампування конічної передачі. З симуляції вихідного корпусу конструкції запропоновано модифіковану конструкцію із додатковим нижнім штифтом для поліпшення зубної щітки зуба. Обчислені результати нового дизайну порівнюються з початковим дизайном корпусу. Таким чином, було показано, що модифікований дизайн з додатковим нижнім штифтом забезпечує кращу зупинку зубної порожнини.

В роботі Da-wei ZHANG та співавторів [131] досліджено деформаційну характеристику в процесі формування перехресного клапану з алюмінію під багатошаровим навантаженням методом чисельного моделювання. Результати показують, що в процесі багатопоточного навантаження перехресного клапана існують чотири шаблони деформації, такі як форсування напруження, віддалене видавлювання, передня видавлювання та зворотне бокове видавлювання; один або кілька шаблонів виникають на різних етапах формування в залежності від шляху завантаження. Взагалі, головною формою деформації є видавлювання або зворотне видавлювання на початковому етапі; основна форма деформації – це віддалене видавлювання на проміжній стадії, а на кінцевій стадії відбувається відставання видавлювання та радіально-пряме видавлювання. Під час процесу формування на головній поверхні оброблюваної деталі виникають два дефекти, такі як обмерзання навколо перфоратора та коротке наповнення на навантаженні голови. Для поліпшення заповнення порожнини і зменшення утворення дефектів, деформація бокового видавлювання повинна бути збільшена на початковому та проміжному етапах, а деформація форвардного видавлювання на кінцевій стадії повинна бути зменшена або усунена.

У дослідженні Young Suk Kim та співавторів [132] застосовано моделювання скінченних елементів для аналізу силового режиму процесів прямого, радіально-прямого, зворотно-прямого і комбінованого

видавлювання для отримання різних виробів (рис. 1.15). При отриманні складнопрофільованих виробів виникає дефектоутворення та великі силові навантаження. Для усунення цих проблем запропоновано два види поліпшення процесу, звичайний та поліпшення. Першим варіантом для зниження сили деформування, на думку авторів, є зменшення об'єму заготовки. Проте такий спосіб є нераціональним у випадку отримання точних виробів. Більш раціональним поліпшенням є заміна традиційних способів видавлюванням на комбіновані.

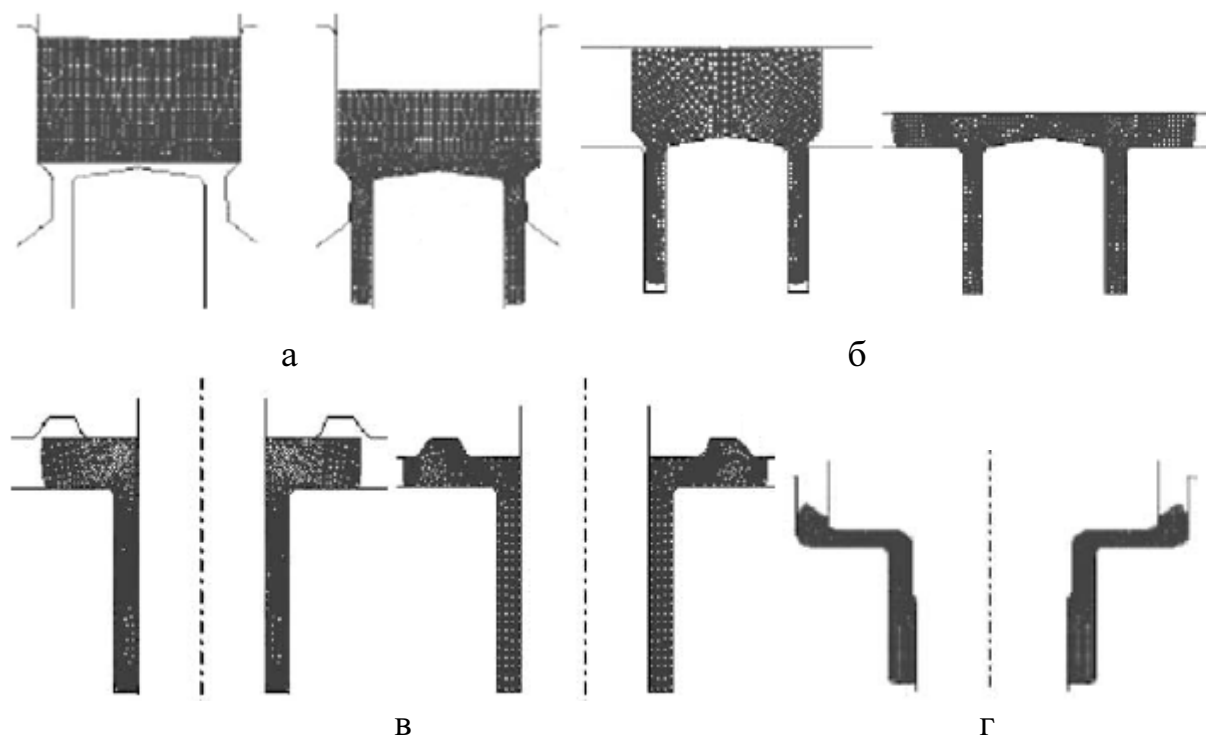


Рисунок 1.15 – Раціональні способи видавлювання складнопрофільованих виробів: пряме видавлювання (а), суміщене радіально–пряме видавлювання (б), комбіноване видавлювання на оправці (в,г)

Отримання складнопрофільованих виробів у плаваючих матрицях – ще один з можливих способів зменшення дефектів та сили процесу. В роботі [133] на основі результатів моделювання встановлено, що при формуванні деталей типу різнотовщинного стакану з фланцям (рис. 1.16) при звичайному

комбінованому видавлюванні спостерігається відділення частини деталі від заготовки. Застосування рухомих матриць дозволяє отримувати суцільні деталі без докладання більшої сили. Крім того, автори дають рекомендації зі швидкісного режиму для реалізації процесу.

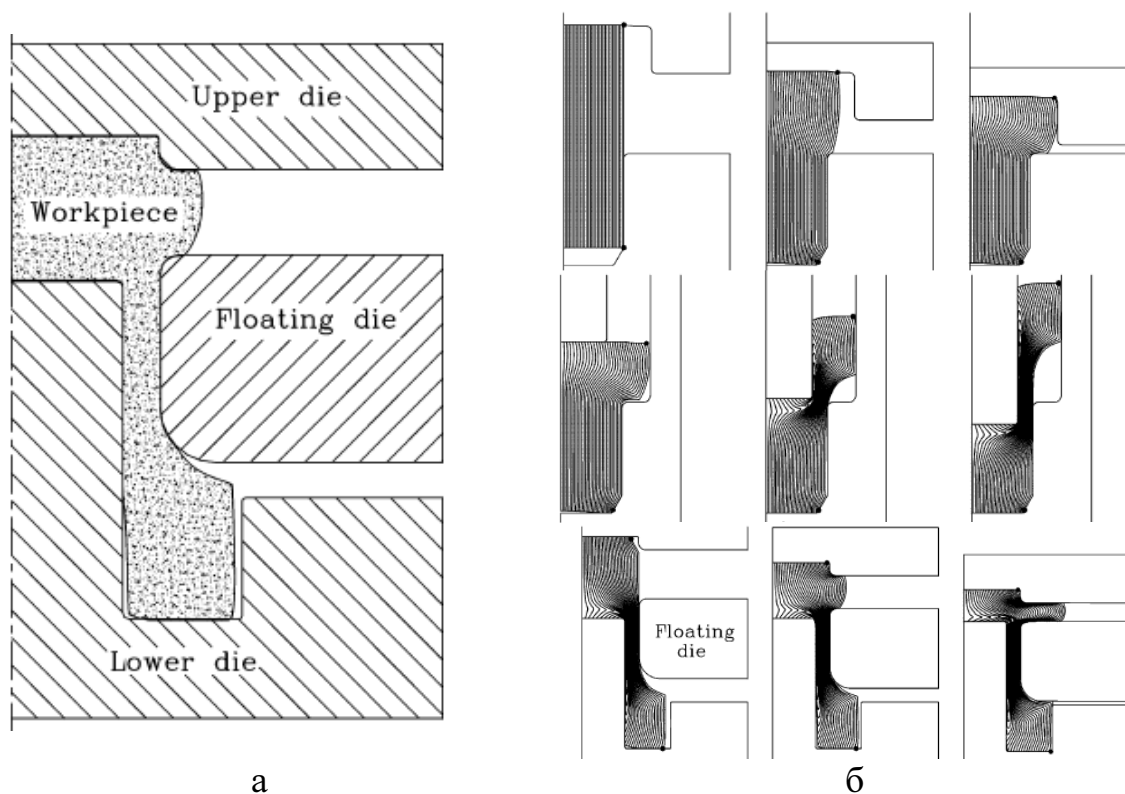


Рисунок 1.16 – Схема процесу комбінованого видавлювання (а) та поетапній формозміні заготовки в рухомому інструменті (б)

Застосування ізотермічного видавлювання для отримання кратнопрофільованих деталей за декілька переходів штамповки (рис. 1.17) розширює можливості об'ємного штампування та номенклатуру отримуваних виробів [134].

В роботі [135] автори проводили дослідження для отримання якісних виробів підвищеної складності в яких спостерігається дефектоутворення у вигляді утягнення, дають рекомендації щодо оптимальних технологічних параметрів для усунення дефекту (рис. 1.18) та показують хорошу узгодженість механічних та експлуатаційних властивостей.

В роботі Yanling Ma та інших [136] були досліджені порожнисті

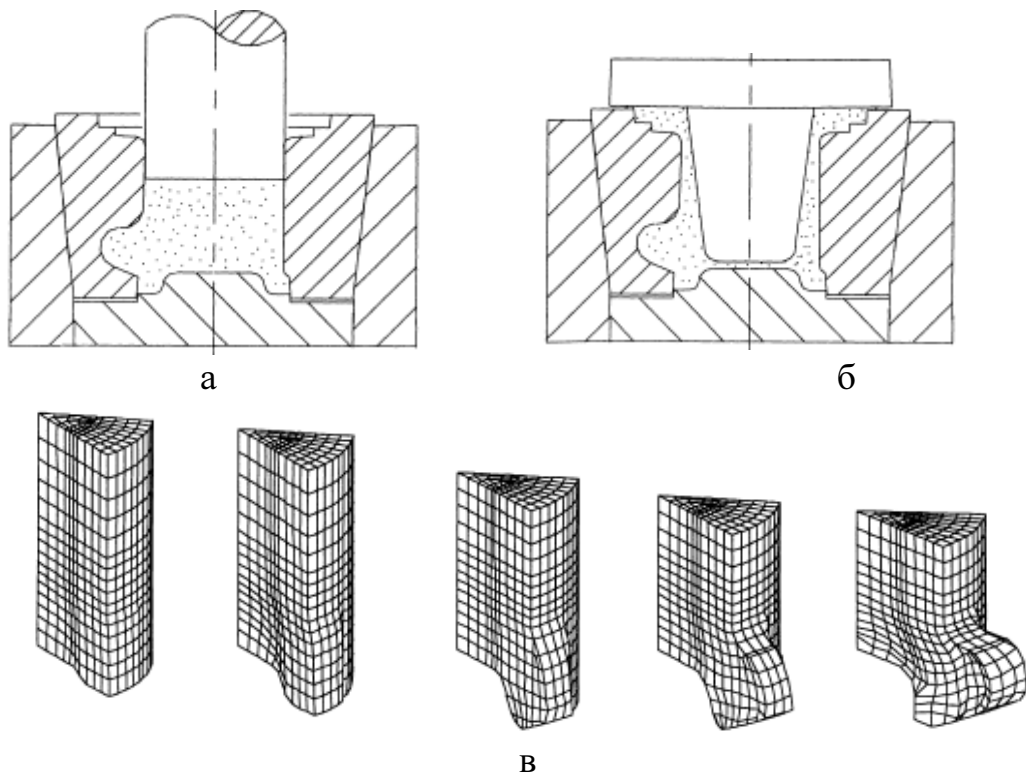


Рисунок 1.17 – Ізотермічне видавлювання деталей за перший (а), другий (б) переходи та поетапна формозміна заготовки (в)

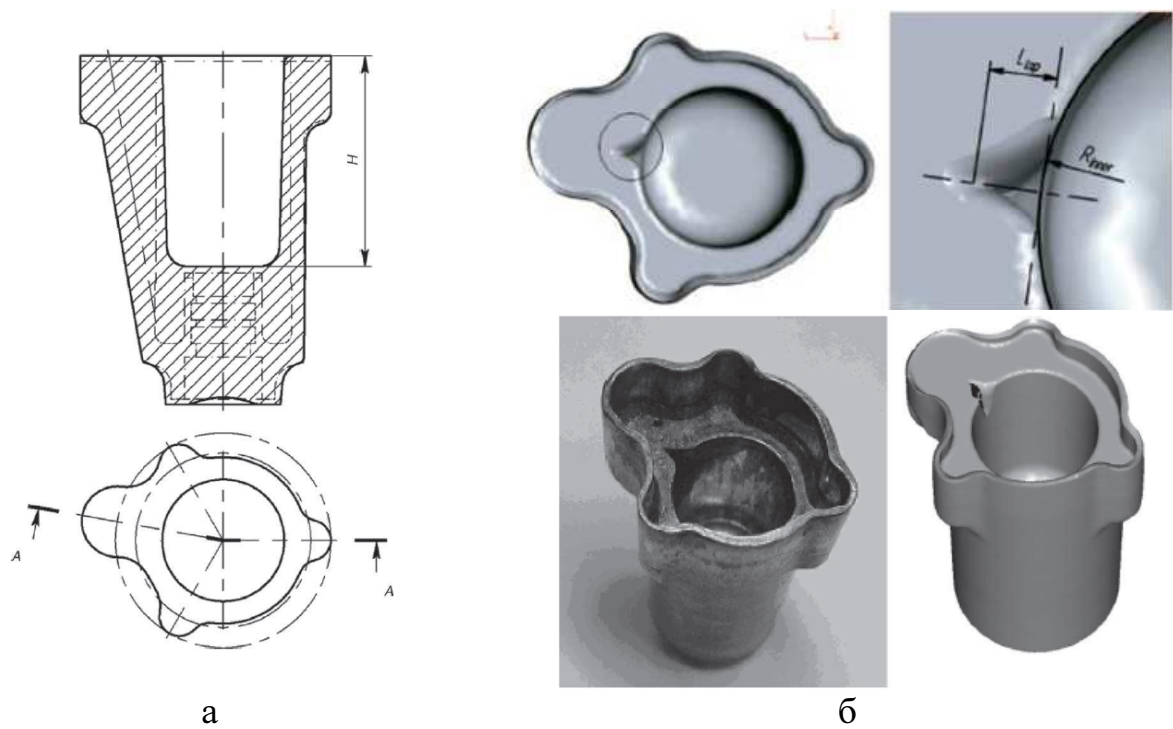


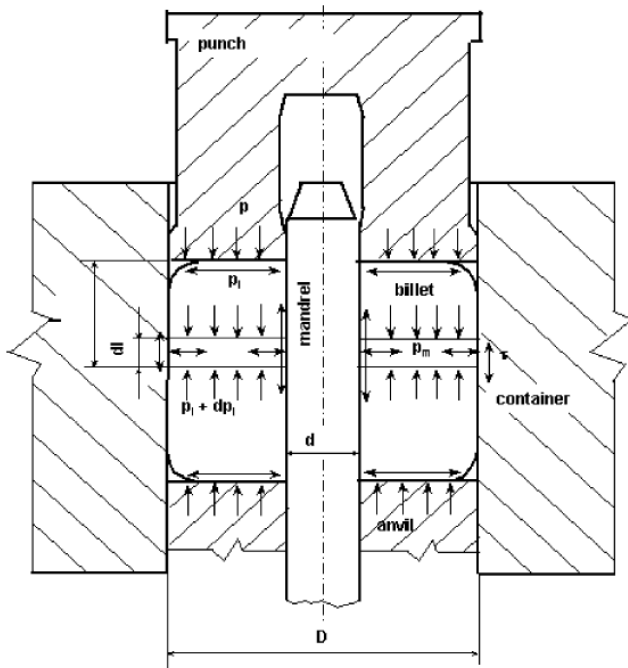
Рисунок 1.18 – Схема ізотермічного видавлювання деталей підвищеної складності (а) та поява дефектоутворення (б)

шестерні-вали сформовані з конфігурацією радіального видавлювання, що включає в себе використання полімерів. Процес був кваліфікований з визначенням лімітів формування, встановлених з посиланням на три типових шляхи завантаження (історії інжекції та тиску). Формування здійснювалося за допомогою кваліфікованих процедур та засобів, що підтримують герметичність. Твердий нітрil (гума) краще виконує роль середовища, що герметизує, для формування порожнинних шестерень, ніж поліетилен. Результати показали доцільність формування порожнистих шестерен-валів, ретельно розробленими та контрольованими. Проте на останньому етапі необхідний набагато вищий тиск, щоб забезпечити формування зуба. Застосування технології обробки може суттєво зменшити вартість виготовлення товстостінних трубчастих компонентів з порожнистими вторинними елементами, такими як фланці з геометрією зубів.

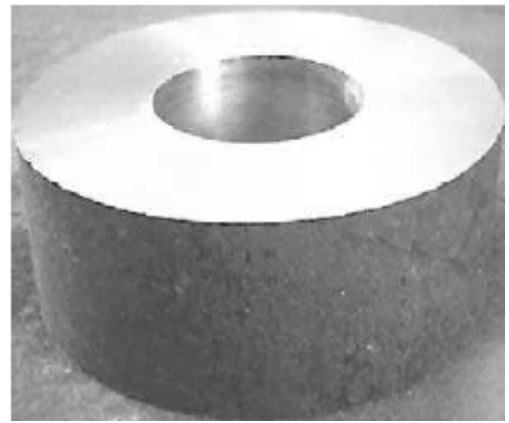
Ускладнення штампового оснащення є ще одним способом отримання деталей більш складної форми без дефектоутворення (рис. 1.19, а-в) [137]. Розроблена нова конструкція штампу дозволяє отримувати деталі типу шестерні методами закритого штампування. Схема штампового оснащення (див. рис. 1.19, г, д) може бути реалізована як в рухомих, так і стаціонарних матрицях.

У вітчизняній промисловості поширені деталі типу фланців. Такі деталі широко застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема в арматуробудуванні.

Номенклатура деталей типу фланців досить широка. Традиційним методом виготовлення таких деталей є штампування у відкритих штампах. Головні переваги цього методу - висока продуктивність і можливість отримання щодо точних поковок простої форми. Однак даний метод має ряд недоліків: - збільшення витрат металу через наявність облою і великих припусків і напусків (низький коефіцієнт використання металу). Через наявність облоя збільшується сила деформування і потребує додаткового обладнання для проведення операції обрізки; - дуже високі витрати при



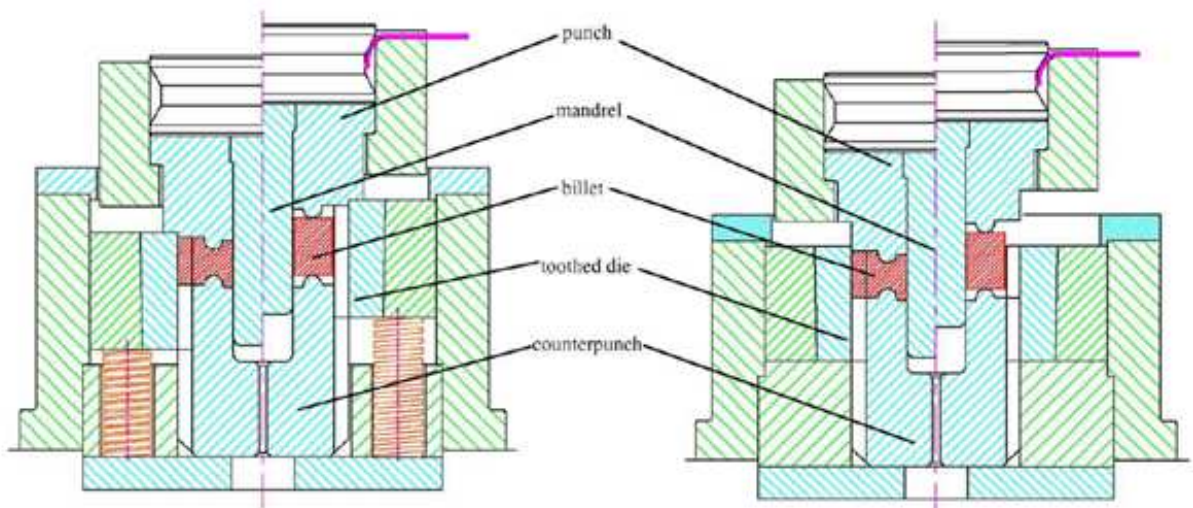
а



б



в



г

д

Рисунок 1.19 – Отримання деталей типу шестерня в закритих штампах: схема закритого видавлювання (а), заготовка (б), отриманий напівфабрикат (в), схема штампового оснащення з різною конструкцією (г,д)

виробництві деталей складної форми (типу хрестовин зубчастих коліс, суцільних і порожнистих маточин з периферійними елементами у вигляді ребер, відростків, виступів та ін.) через високу трудомісткість подальшої механічної обробки.

У роботі Jilai Wang та інших [138] було проведено експериментальні дослідження дефекту. У мікроформуванні якість мікрочастинок є однією з найважливіших проблем. Складання, викликане ненормальним потоком матеріалу, є одним з найбільш поширених дефектів, спричинених потоком процесу макроформування. Ідентифікований механізм формування дефектів, викликаних потоком в процесі макроформування, може впливати на так звані розмірні ефекти, коли розмір частини зменшується до мікро масштабу. Тому необхідно вивчити вплив розмірних ефектів на матеріал пластичного потоку та поведінку деформації в сценаріях багатоступеневої деформації. Для вивчення механізму формування дефектів, викликаних потоком, симуляція використовується для імітації процесу формування. З іншого боку, розроблено багатопшарове формування. Для вивчення взаємозв'язку ефектів дефекту та розмірів, що викликаються потоком, проводилося формування осесиметричних частин з фланцевими функціями та різними масштабами. Також виявлено поведінку мікроструктури та пластичного потоку деформованих частин. На підставі експериментальних результатів та результатів моделювання, дефекти в основному впливають на геометрію та розміри деформованих фланцевих деталей замість розміру зерен. Одиночно зерно зазнає більших напружень та обмежень, що накладаються сусідніми зернами. Для гарантування сумісності штамів індивідуальне зерно отримує більшу стійкість до матеріалу пластичного потоку, що у деякій мірі запобігає утворенню складання дефектів від процесу формування. Для матеріалів з дрібними зернами деформовані частини мають струми, які відповідають геометрії та структурі деталі, але неправильний металевий потік призводить до складання дефекту внаслідок перетину різних компонентів деталі. Для частин з грубими зернами немає видимих лінійних потоків через кілька

границь зерен у зоні деформації. Зменшення складних дефектів обумовлено великою деформацією, що переживає індивідуальне зерно, і межу зерна, що блокує поведінку потоку. У випадках використання матеріалу з грубими зернами складний дефект можна значно зменшити.

При розробці технологічних процесів в якості деталі-представника, що має фланець і розвинену втулкову частину, була обрана вентильна головка. Розрахункова схема і схема експериментального штампа наведена на рис. 1.20 [139].

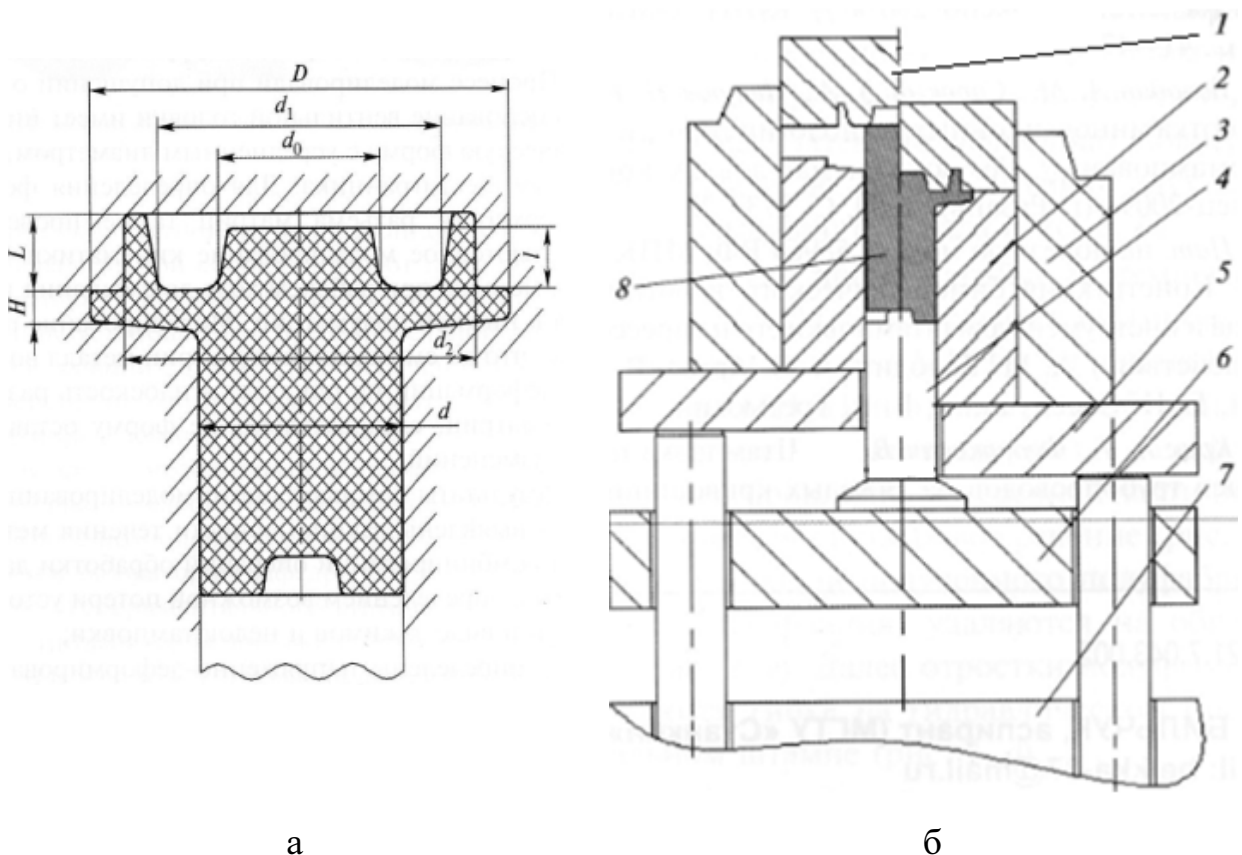


Рисунок 1.20 – Розрахункова схема (а) і схема експериментального штампу (б) для отримання деталей з фланцем: 1 і 2 – півматриці; 3 – бандаж; 4 – пуансон; 5 – плита; 6 – стіл пресу; 7 – нижній привід; 8 – заготовка

При русі верхньої півматриці 1 до змикання з нижньою 2 відбувається формоутворення фланцевої частини (поперечне видавлювання). Після щільного змикання півматриць починається їх подальший рух як єдиного інструменту, в результаті чого остаточно формується Втулкова частина з осьовим отвором в торці і фланцева частина поковки (поперечне і зворотне видавлювання).

Для визначення технологічних сил, необхідних для штампування поковки вентильної головки, використовували енергетичний метод верхньої оцінки [140].

Виявлено, що найбільші сили деформування і розкриття інструменту виникають на заключній стадії процесу при витісненні надлишку металу в компенсаційну порожнину. Тому досліджували саме цю стадію процесу.

Розглянута математична модель процесу течії металу дозволяє визначити силові параметри, необхідні для подальшого перевірного розрахунку при проектуванні штампового інструменту, а також істотно скоротити час на розробку технології та зменшити можливість помилки при розрахунку.

Завдання комп'ютерного моделювання полягало у визначенні геометрії робочих поверхонь штампів і якості заповнення металом порожнин штампів. Вихідні дані при моделюванні: матеріал – мідь МІ (так як в базі даних QForm немає латуні, для моделювання використаний найбільш близький матеріал – мідь); температура нагріву заготовки – 850°C ; температура попереднього нагрівання інструменту – 300°C .

На основі проведених досліджень і розрахунків спроектований штамп для штампування розглянутих поковок. Закрита висота штампів – 450 мм; хід пуансона – 150 мм; хід нижньої півматриці – 30 мм. Відмінною особливістю конструкції штампів є його універсальність, тобто, він може бути використаний для штампування всіх однотипних поковок, що мають схожу форму і розміри в межах габаритних розмірів розглянутих поковок, при цьому його конструкція не змінюється, а заміні підлягають тільки півматриці.

Математичне моделювання в рамках енергетичного методу дозволило отримати аналітичні залежності для визначення технологічних сил на найбільш навантажувальній стадії деформування. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання дозволив оцінити напружено-деформований стан заготовки при складному перебігу металу, встановити можливі дефекти формоутворення і внести в конструкцію робочого інструмента корективи для їх усунення.

Застосуванням методу скінченних елементів виникає можливість не тільки виявити дефект, але й поспостерігати механізм його утворення та еволюцію [141]. Встановлено, що в основному потік металу у складній формі деталі впливає на утворення такого дефекту як незаповнення (рис. 1.21).

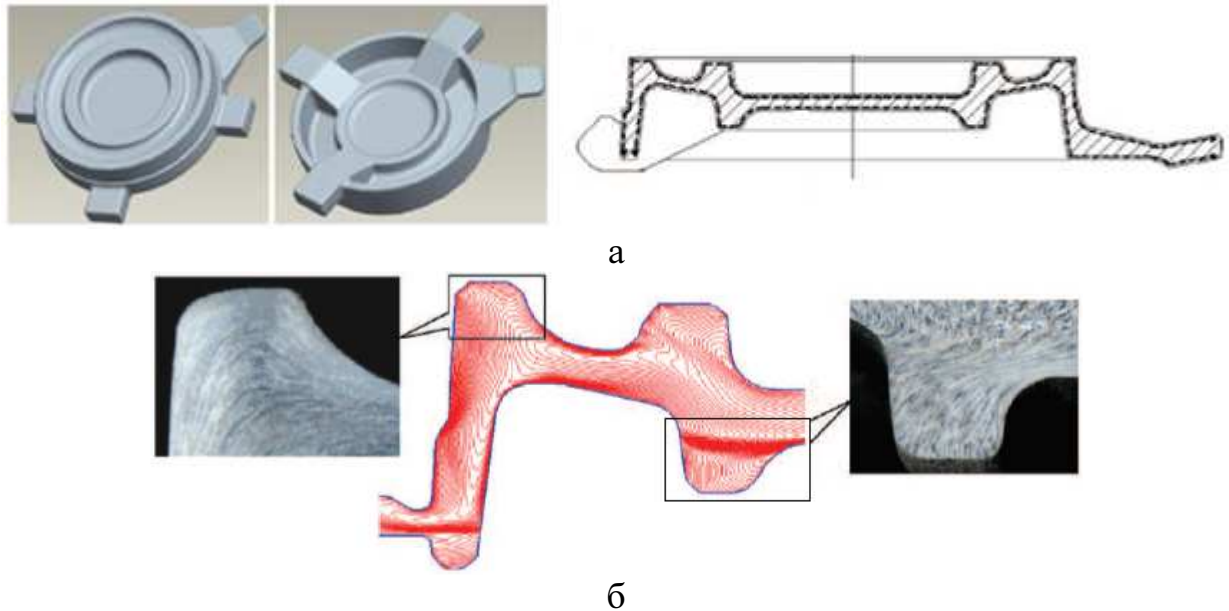


Рисунок 1.21 – Схема деформування складнопрофільованого виробу (а) та дефектоутворення у вигляді незаповнення кутів (б)

Радіальна течія дозволяє легше заповнити контури деталі, ніж при осьовій подачі металу. Розрив волокна головним чином викликаний надто великим надлишковим металом, що швидко переміщується у радіальному напрямку на пізній стадії видавлювання. Врешті – рещт, пропонуються деякі заходи для оптимізації течії металу заготовки. Підвищуючи ступінь осьової деформації та тертя на контактних поверхнях на стадії осадження заготовки, можна отримати деталі з оптимальними радіальними деформаціями. Ефективний заходом щодо зменшення опору течії металу в радіальному напрямку являється зміна форми та розміру заготовки, щоб зменшити кількість надлишкового металу на кінцевому етапі деформування.

У роботі [149] за допомогою скінченно-елементної системи QForm 2D досліджений комбінований процес видавлювання порожнистих напівсферичних деталей з фланцем.

Деталі типу «Корпус кульової опори» виготовляють для автомобільної промисловості, де потреба в них становить 2...3 млн. шт. на рік. Для забезпечення конкурентоспроможності цих деталей необхідно знижувати їх собівартість за рахунок впровадження нових технічних рішень.

На рис. 1.22 наведені схеми досліджуваних технологічних процесів виготовлення заданої деталі. У першому випадку (див. рис. 1.22, а) спочатку формується конічна частина деталі, а в другому (див. рис. 1.22, б) - фланець.

Розширенню номенклатури деталей сприяє різноманітність схем штампування. Деталі типу «Корпус кульової опори» проведено скінченно-елементне моделювання, яке дало можливість знижувати собівартість виробів за рахунок впровадження нових технічних рішень [143-145]. Результати МСЕ дозволили відшукати такі значення деформації і кінематику течії металу при рівній товщині стінки і дна, при яких робота деформування буде найменшою, а так само дозволило оцінити фізико – механічний стан деформованого металу в кожній точці осередку деформації.

Параметри технологічних переходів перенесли в скінченно-елементну систему QForm 2D. Це дозволило визначити такі значення ступеню деформації і кінематичних параметрів течії металу (при рівній товщині стінки і дна), при яких робота деформування буде найменшою, а також дає можливість оцінити фізико-механічний стан деформованого металу в кожній точці осередку деформації. Аналіз результатів моделювання показав, що для отримання деталі «Корпус кульової опори» в умовах серійного виробництва краще використовувати схему 2. Це обумовлено тим, що при видавлюванні півсфери на останньому переході отримують строго задані креслярські розміри без додаткових силових витрат на калібрування виробу.

При використанні схеми 1 задані розміри півсфери можуть змінитися під час комбінованого видавлювання, що спричинить за собою підвищення сили штампування на наступних переходах, а також швидке зношування формотворного інструменту. Подібну схему можна використовувати для отримання порожнистих напівсферичних деталей без фланця.

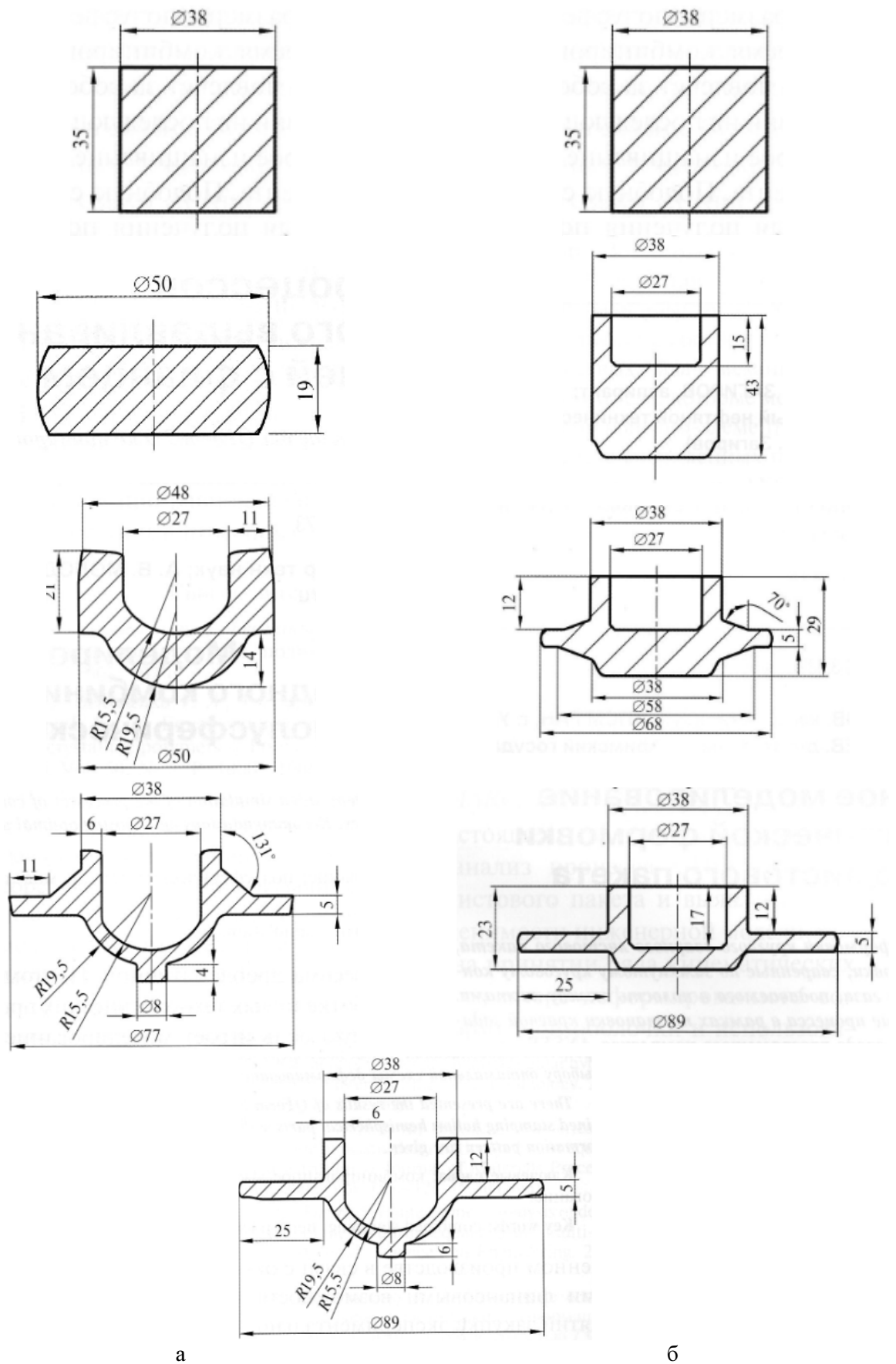


Рисунок 1.22 – Схеми 1 (а) та 2 (б) технологічного процесу отримання деталі «Корпус кульової опори»

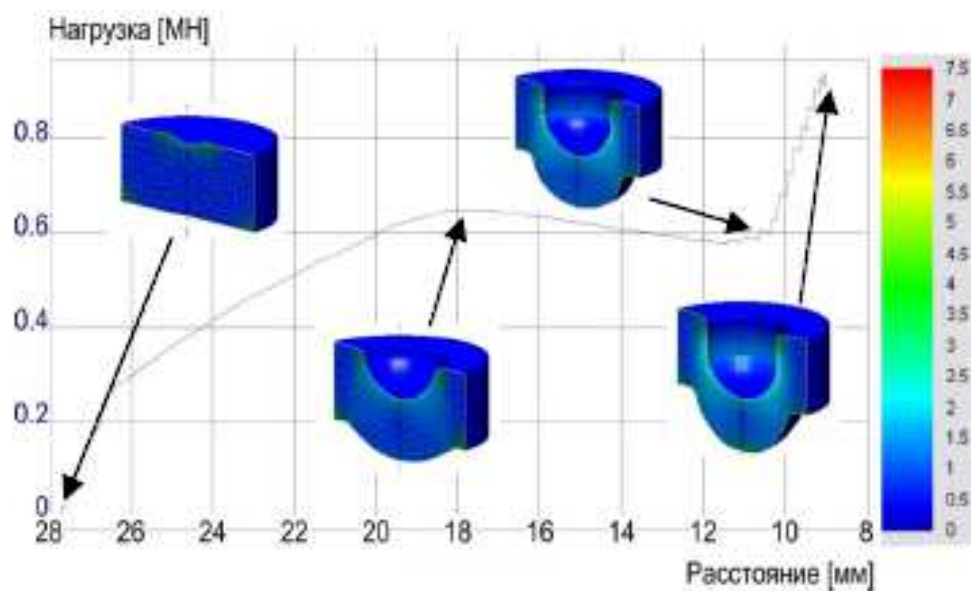
На рис. 1.23, а – показані результати моделювання технологічного процесу, де в першу чергу з циліндричної заготовки формується півсфера. Така технологія складається з чотирьох переходів: осадки заготовки, пряме видавлювання півсфери, комбіноване видавлювання, висадка фланця. Матеріал заготовки Сталь 10, коефіцієнт тертя 0,1, температура навколишнього середовища і заготовки на кожному переході 20° С. Деформація проводиться в механічному пресі силою 6,3 МН [142].

Показані результати моделювання технологічного процесу (див. рис. 1.23, б) де в першу чергу формується фланець деталі, а напівсферична форма видавлюється в останню чергу. Така технологія складається з чотирьох переходів: калібрування отвору, комбіноване видавлювання, висадка фланця, видавлювання півсфери. Матеріал заготовки Сталь 10, коефіцієнт тертя 0,1, температура навколишнього середовища і заготовки на кожному переході 20° С. Деформація проводиться в механічному пресі силою 6,3 МН.

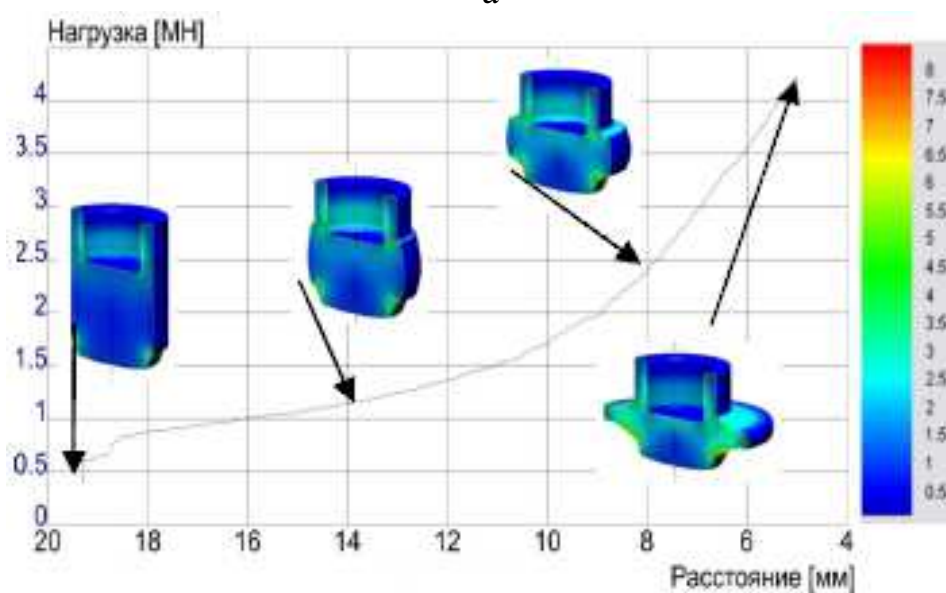
При застосуванні технології (див. рис. 1.23, а) точний розмір півсфери може змінитися під час комбінованого видавлювання, що спричинить за собою підвищення сили штампування на наступних переходах, а також швидкий знос інструменту. Принцип такої технології підійде для отримання порожнистих напівсферичних деталей без фланця.

Критеріями, що визначають вибір оптимального технологічного процесу холодного об'ємного штампування, зокрема для деталі типу «ексцентрик», є величини технологічних сил і деформації при формоутворенні різних ділянок досліджуваної деталі, що жорстко пов'язані з механічними характеристиками застосовуваного матеріалу.

На рис. 1.24 представлений розроблений процес зворотного і комбінованого видавлювання деталі «ексцентрик». На першому технологічному переході здійснюється відрізка заготовки з прутка діаметром 24 мм. На другому переході при прямому видавлюванні нижньої частини заготовки доцільно формувати циліндричну порожнину пуансоном, що



а



б

Рисунок 1.23 – Варіанти моделювання процесів штампування

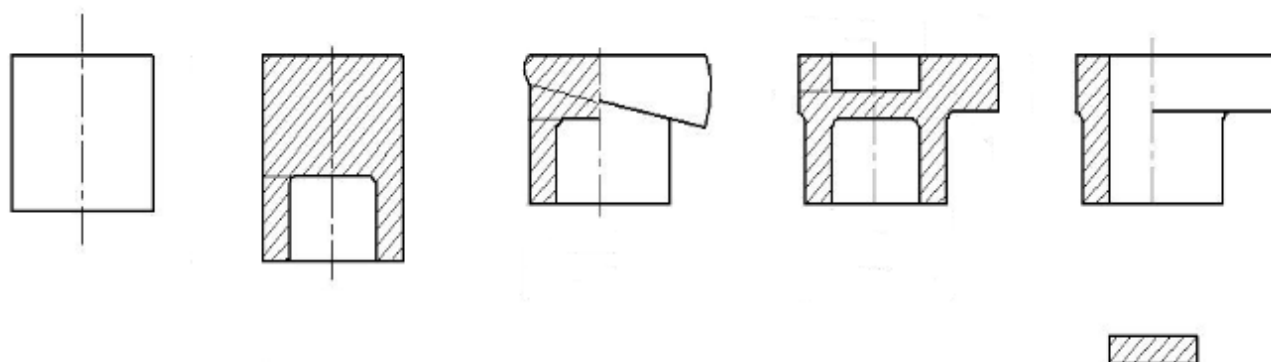


Рисунок 1.24 – Технологічний процес холодного об'ємного штампування деталі «ексцентрик»

знаходиться в нижній частині штампового оснащення. Такий підхід дає можливість отримання правильних геометричних розмірів майбутньої деталі без подальшої механічної обробки. На третьому переході відбувається попередній набір об'єму металу в майбутній фланець деталі. На четвертому переході відбувається процес комбінованого видавлювання, що включає в себе остаточне формоутворення зовнішньої поверхні деталі з заданими геометричними розмірами. На останньому переході відбувається прошивка технологічної перемички [146].

Пропонований технологічний процес холодного комбінованого видавлювання дає наступні переваги в порівнянні з чинним технологічним процесом отримання деталі методом різання: економія використовуваного металу, більш сприятливе формоутворення геометрії деталі, виняток типових дефектів, що виникають в процесах холодного об'ємного штампування (утягнення, простріли, не повне заповнення порожнин).

На моделях, наведених на рис. 1.25, видно, що в процесі видавлювання спостерігається течія металу, як в зворотному, так і в прямому напрямку. Оптимальним на даному переході є неповне заповнення стрижневої частини заготовки одночасно з кінцевим формуванням внутрішньої порожнини. Для досягнення найкращого формоутворення були промодельовані кілька варіантів форми пуансона і матриці для попереднього і остаточного переходів.

Виходячи з даних результатів напружено – деформованого стану та кінематики течії металу, отримані при моделюванні, можна сказати, що для забезпечення розмірів відповідних кресленню «корпусу заряду» положення і геометричні розміри формотворного інструменту мають відповідати тим, що показано (див. рис. 1.25, а, б).

Встановлено, що при переході на холодне об'ємне штампування при виробництві корпусу заряду можливо підвищити КВМ на 40...60%, поліпшити механічні характеристики і значно знизити кількість механообробки. При холодному штампуванні відбувається зміцнення

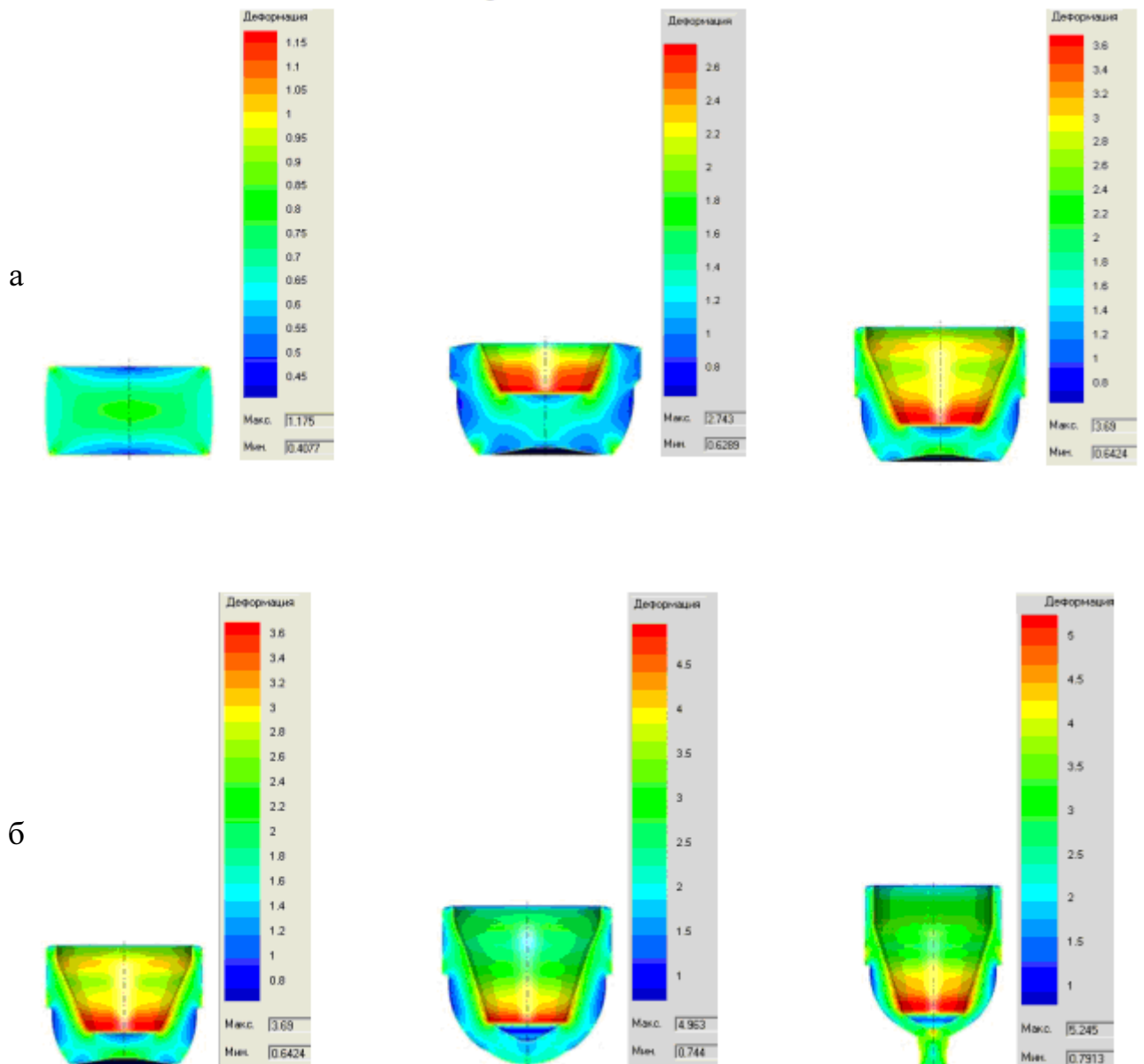


Рисунок 1.25 – Моделювання процесу отримання деталі «корпус кумулятивного заряду» в скінченно – елементній системі QForm – 2D: а – попередній формувальний перехід (зворотне видавлювання); б – на остаточному переході формується внутрішня порожнина, зовнішня і стрижнева частина заготовки (комбіноване видавлювання)

матеріалу, що дозволяє зробити перехід зі Сталі 35 на Сталь 10 без втрати необхідних механічних характеристик заготовки [147].

У цьому документі D.J. Kim та співавтори [148] запропонували нову методику застосування штучної нейронної мережі в процесах формування

металів. Використовується тришарова нейронна мережа, а для тренування мережі використовується алгоритм зворотного поширення. Вона визначається застосуванням наближення функції нейронної мережі до вихідних заготовок, які задовольняють мінімуму неповного заповнення порожнини матриці. Геометрія штампу для циліндричних шківів розроблена таким чином, щоб відповідати умовам дизайну кінцевого продукту. Запропоновані схеми були успішно адаптовані для визначення початкового розміру заготовки для осесиметричного продукту та для проектування геометрії для циліндричного шківу. Нейромережа може зменшити кількість симуляції скінченних елементів для проектування штамів, і надалі вона буде корисно застосована до багатоетапного процесу планування, може передбачати незаповнені обсяги деяких аспектих співвідношень, які не виконуються при моделюванні скінченних елементів.

У роботі J.-H. Song [149] було досліджено конструкцію процесу для закритого штампування конічної передачі за допомогою тривимірних моделей скінченних елементів. Процесні змінні закритого штампування конічної передачі були вибрані як тиск видавлювання і діаметр заготовки. Крім того, при проектуванні наборів штамів, включаючи штамп і вставний штифт, було проведено експеримент холодного штампування конічної передачі для оцінки ефективності розробленого процесу. З експериментів було встановлено, що конічна зубчаста передача з повним утворенням зубів була отримана без виникнення дефектів формування, а руйнування перфоратора відбулося через невелику різницю в штампуванні під час формування. Завдяки порівнянню результатів між експериментами та симуляціями, було оцінено зв'язок між силою видавлювання та силами розширення, і було встановлено, що додатковий затискний пристрій, що збільшує силу затискача, має бути необхідним для поліпшення безпеки виробу. З цього дослідження було очікувано, що спроектований процес може бути ефективно використаний у формуванні конічної передачі для практичного використання у відповідній галузі.

При холодному видавлюванні порожнистих виробів використовують схеми видавлювання з одночасним прикладанням розтягувальної сили до стінки заготовки та видавлювання з роздачею, які дозволяють зменшити силу і питомі сили видавлювання та підвищити стійкість деформуючого інструменту [150, 151]. В роботі [152] показана можливість виготовлення порожнистого виробу заданої форми з необхідними властивостями здеформованого металу з використанням операцій холодного об'ємного та листового штампування. На першому переході (рис. 1.26) холодним комбінованим видавлюванням отримують напівфабрикат з кінцевими розмірами донної частини та відповідним пропрацюванням структури металу холодною пластичною деформацією в ній. На другому переході витягуванням зі стоншенням виготовляють кінцеву форму та розміри виробу. Методом скінченних елементів встановлені параметри видавлювання, які забезпечують одночасну течію металу в двох напрямках та формоутворення напівфабрикату при знижених силових режимах. Встановлено, що найбільше пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією відбувається у стінці виробу де отримані найбільші величини інтенсивності деформацій (рис. 1.27, а). При цьому ступінь використання ресурсу пластичності досягає значення $\psi=0,9$ (див. рис. 1.27, б).

З урахуванням накопичених деформацій після видавлювання проведене моделювання другого переходу витягування з потоншенням в трьох послідовно розташованих матрицях. Встановлена залежність сили витягування від переміщення пуансону, розподіл інтенсивності деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності у стінці виробу.

У роботі Y.S. Lee та співавторів [153] формування центрального вузла радіального видавлювання кількісно аналізується методом скінченних елементів. Вид факторів, таких як діаметр оправки, радіус шару кута і коефіцієнт тертя застосовуються в моделюванні. Вплив цих факторів проектування на максимальне навантаження під час операції формування та тиск на інструмент, такий як удар і оправка, досліджуються та

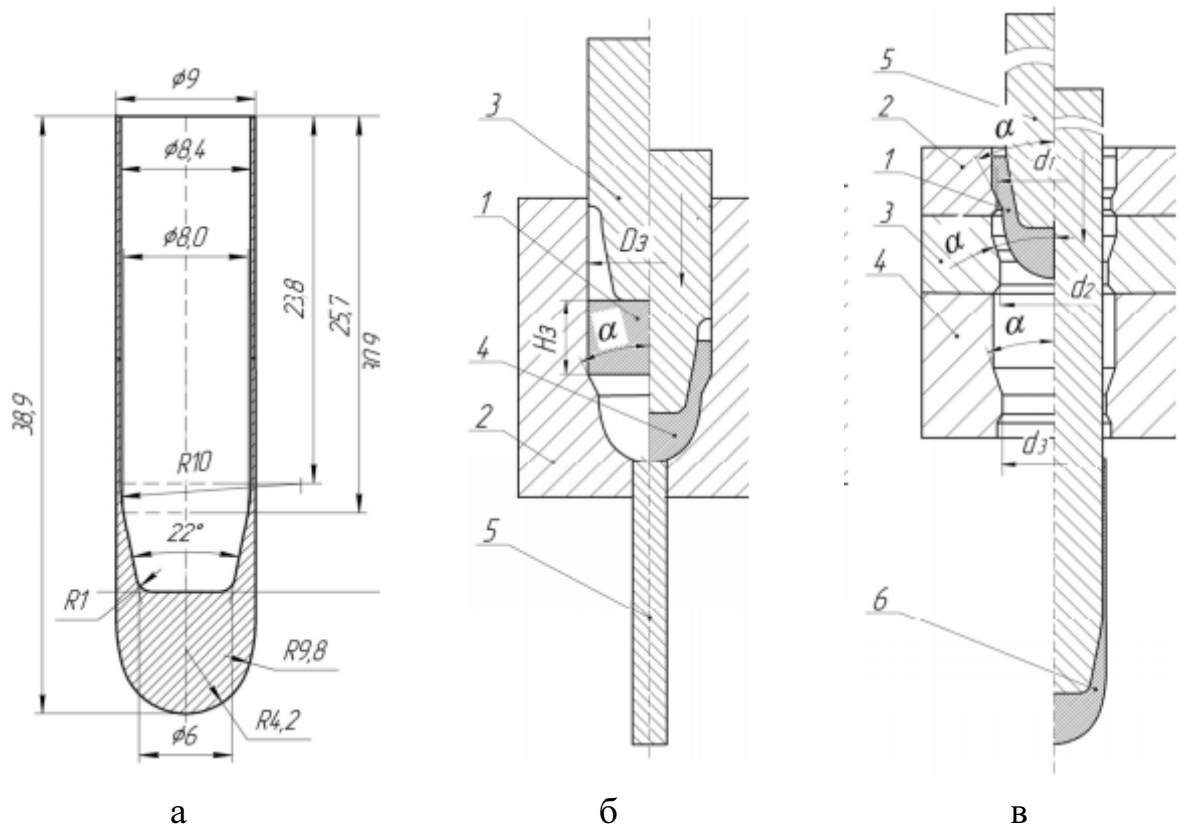


Рисунок 1.26 –Ескіз виробу (а) та можливі переходи його штампування:
б – перший перехід комбіноване видавлювання, в – другий перехід витягування зі стоншенням

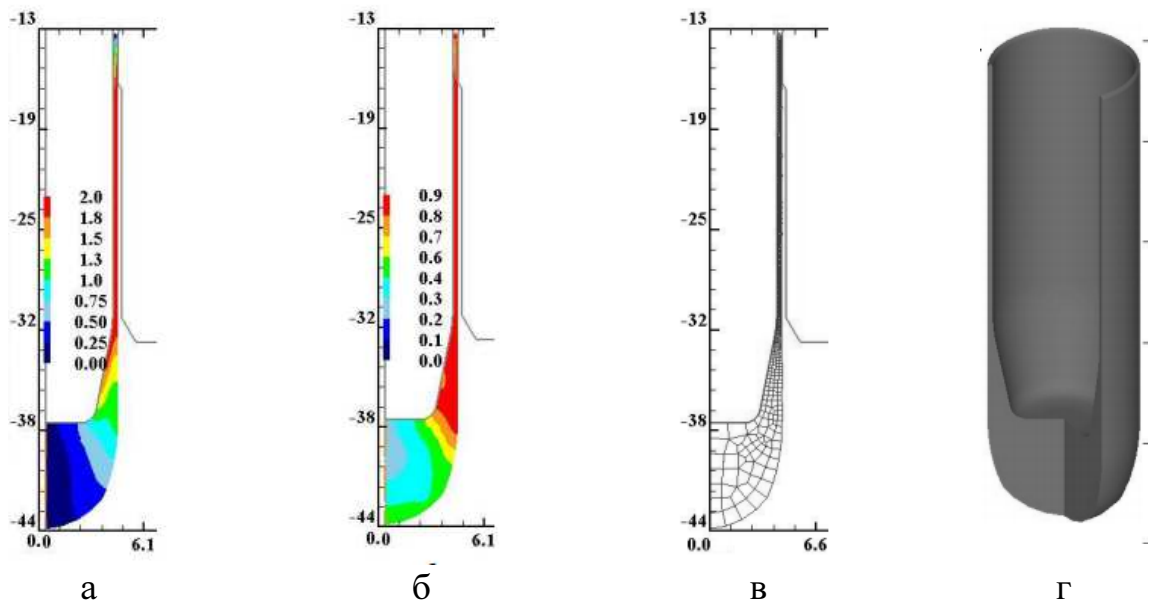


Рисунок 1.27 –Розподіл інтенсивності деформацій (а), ступеню використання ресурсу пластичності (б), скінченно-елементна модель (в) та загальний вигляд виробу в розрізі (г)

узагальнюються в термінах максимальної сили формування. Виконано скінченно елементний аналіз радіально-прямого видавлювання процесу для певного діапазону діаметрів оправки, умов тертя та радіусів. Результати моделювання порівнюються з експериментальними даними з посиланням, щоб перевірити корисність моделювання. Виходячи з результатів моделювання, робиться висновок, що максимальне формуюче навантаження збільшується, оскільки збільшується діаметр трубки або радіус кута. Крім того, діаметр оправки серед конструктивних факторів найбільше впливає на формуючі навантаження при радіально-прямому видавлюванні процесі. Проте радіус кутового кута має незначний вплив на ударні навантаження. Основні результати проведеного дослідження:

- коефіцієнт тертя не сильно впливає на ударні навантаження. Однак навантаження на оправу сильно впливають на коефіцієнт тертя в порівнянні з навантаженням на інструмент;

- максимальне навантаження збільшується у міру збільшення діаметра оправки або коефіцієнта тертя;

- максимальне навантаження лише трохи зменшується, оскільки збільшується радіометр;

- діаметр оправки найбільше впливає на максимальне формуюче навантаження серед трьох факторів проектування у дослідженні. Радіус майже не впливає на максимальне навантаження;

- потужність оправки показує постійний пропорційний зв'язок з параметрами проектування, тоді як сила демонструє майже постійні значення у всіх випадках. Тому діаметр оправки або ширина зазору мають незначний вплив на навантаження;

- навантаження та оправки демонструють подібну тенденцію під час процесів радіального видавлювання. Однак вони різко зростають на початку процесу прямого видавлювання. Крім того, навантаження оправки збільшується більш різко в порівнянні з пробивним навантаженням.

1.5 Особливості конструювання штампів з роз'ємними і рухомими матрицями

Технологічні схеми деформування в роз'ємних матрицях характеризується орієнтуванням площини роз'єму матриці по відношенню до осі пуансона, числом площин роз'єму матриці, числом переходів штампування і т.д.

Вибір варіанту розташування площини роз'єму матриці визначається формою поковки, її розмірами, умовами виштовхування з півматриці і технологічністю виготовлення матриці [59, 154, 155].

Стабільність і ефективність процесу видавлювання в значній мірі залежать від конструкції використовуваного штамп.

Штampi з роз'ємними матрицями містять ті ж основні функціональні частини, що і звичайні штampi для поздовжнього видавлювання. Головна відмінність полягає в тому, що штampi з роз'ємними матрицями забезпечені вузлами замикання, призначеними для виконання нової функції затиску півматриць, що утворюють при змиканні робочу порожнину. Функціональний аналіз штампів і вузлів затиску показує можливість генерування безлічі варіантів їх конструктивного виконання [59, 117, 154-158].

На основі аналізу форм поковок і особливостей формозміни металу в роботах [115, 116] виділені основні схеми штампування в роз'ємних матрицях. Характерними ознаками прийняті орієнтування площини роз'єму по відношенню до осі деформуючого пуансону, коли площина роз'єму розташована в напрямку руху пуансону або перпендикулярно руху пуансону [117].

Системний підхід до проектування нових технологічних процесів штампування в штампах з роз'ємними матрицями вимагає їх класифікації, яка дозволила б оцінити технологічні можливості і конструктивні особливості вибору типу штамп.

Спроби класифікувати кінематичні різновиди штампів по розташуванню площини роз'єму були зроблені в роботах А. М. Смурова, А. В. Кузнєцова та О. В. Протопопова [117, 159].

За характером передачі сил розкриття на повзун преса в роботі [159] розрізняють дві системи стиснення частин роз'ємної матриці: активну, яка транслює сили затиску на повзун, і реактивну - не передати. З безлічі можливих схем штампів з реактивним стисненням роз'ємної матриці по площині роз'єму виділені вертикальна і горизонтальна площини роз'єму.

За орієнтування площини роз'єму матриці до осі пуансону в роботі [117] штампи розділені на: штампи з поздовжнім роз'ємом, площа якого паралельна осі головного деформуючого пуансона; штампи з поперечним роз'ємом, площа якого перпендикулярна осі головного деформуючого пуансона; штампи зі змішаним поздовжньо-поперечним роз'ємом.

Область застосування штампів з поздовжнім роз'ємом штампування (переважно гаряча) поковок типу кутників, з відростком під прямим і непрямым кутом до осі стрижня, [156, 160] вилок карданних шарнірів, [159] поковки з відростками, розташованими в різних рівнях і інші поковки, за умовами видалення з штампа яких роз'єм доцільно виконати поздовжньо.

Штампи з поперечною площиною роз'єму знайшли застосування при гарячому і холодному об'ємному штампуванні деталей з відростками або потовщеннями, перпендикулярними осі поковки. В таких штампах здійснюються процеси радіального і бічного видавлювання хрестовин карданних шарнірів, фланців карданних валів і диференціалів [157].

Подальше ускладнення форми штампованих деталей призводить до застосування штампів зі змішаним роз'ємом, з додатковими площинами роз'єму часто перпендикулярними один одному. Типовим прикладом такого штампу служить штамп для виготовлення велосипедної втулки [154].

Класифікація А. В. Кузнєцова і О. В. Протопопова [117] є найбільш вдалою з усіх розглянутих, так як вона найбільш детально охоплює можливі варіанти роз'єму матриць в штампах з роз'ємними матрицями.

За кількістю деформуючих пуансонів розрізняють штампи для одно, двох, трьох і чотирьох пуансонного штампування [115, 117]. За кількістю переходів розрізняють одноперехідне і двохперехідне штампування. За послідовності роботи пуансонів - одночасне і послідовне штампування [115, 159, 161].

Основні обмеження у використанні штампів з роз'ємними матрицями пов'язані з складностями одночасного забезпечення затиску півматриць і їх розкриття при зворотному ході повзуна преса [59, 117, 154-159, 159, 161]. Тому крім відомих вимог до штампів (надійність, довговічність, простота налагодження, висока продуктивність), штампи з роз'ємними матрицями повинні забезпечувати щільне стиснення півматриць протягом всього деформування, швидке і вільне розмикання при зворотному ході.

З огляду на розглянуті вище критерії класифікації штампового оснащення, конструктивні рішення, що забезпечують затиск півматриць, що застосовуються в сучасних штампах для видавлювання в роз'ємних матрицях, можна згрупувати за наступними напрямками: застосування замикаючих пристроїв, вбудованих в штамп [117]; застосування пристроїв (схем деформування), що дозволяють використовувати для затиску півматриць технологічну силу [161]; створення спеціальних пресів подвійної дії та штампів для них [162-164].

Великі технологічні можливості мають штампи з поперечним роз'ємом матриць розглянуті в роботах І. С. Алієва та ін. [61, 165-167]. І. С. Алієвим була запропонована конструкція штампу для виготовлення порожнистих і стрижневих деталей з потовщеннями або фланцем на зовнішній поверхні [169]. В роботі [59] запропоновано конструкцію штампу з поперечною площиною роз'єму для штампування хрестовин карданного шарніру. Існують також конструкції штампів, які містять важільні і клинові механізми замикання півматриць. Відома конструкція штампу, в якому замикання півматриць проводиться за допомогою пневмоприводу [169, 170]. А. М. Литвинов запропонував штамп з роз'ємними матрицями для

штампування зірочок [155], з метою зниження передачі сил на повзун преса існують штампи з пружинно-важільними механізмами затиску матриць, показані [171]. Існують конструкції штампів, в яких застосовується так званий «самозатиск» півматриць. Перевагою штампів з самозатиском є замикання сил розкриття матриці в штамповому блоці без передачі на повзун преса. До недоліків відносяться складності з розмиканням замикаючих пристроїв.

Для успішного освоєння розглянутих вище технологічних процесів і оснащення необхідно вирішити такі завдання дослідницького і проектно-конструкторського характеру:

- розробка технологічних схем і дослідження режимів деформування в роз'ємних матрицях, що дозволяють скоротити кількість переходів штампування за рахунок інтенсифікації формозміни;

- розробка конструктивних схем штампового оснащення з роз'ємними матрицями, що дозволяють отримати складнопрофільні деталі за рахунок вибору схеми роз'єму і затиску півматриць і системи виштовхування, що забезпечують необхідну точність і надійність роботи штампів.

Технологічна надійність і ефективність процесів ковальсько-штампувального виробництва багато в чому залежить від стійкості деформувального інструменту, умови роботи якого, як правило, посилюються пропорційно зростанню складності і вимог до якості і точності одержуваних виробів [172, 173].

Удосконалення конструкції з метою підвищення стійкості штампу вимагає аналізу всієї конструкції і, особливо, деформувального і формотворного інструменту. При освоєнні процесів деформування конструкторсько-технологічні рішення необхідно направляти на зниження контактного тиску і поліпшення умов роботи інструменту [172, 173].

Поліпшити умови роботи можливо зниженням контактного тертя шляхом нанесення на робочі поверхні інструменту плівкових покриттів. В даний час плівкові покриття знайшли своє застосування в металообробному виробництві, а саме в операціях обробки металу різанням [174-177].

Нанесення покриттів на інструментальні матеріали дозволяє значно знизити силу контактного тертя, причому цей ефект посилюється як для найбільш термодинамічно стійких покриття у вигляді оксидів деяких металів, так і для покриттів, що мають багатофазні структури [176]. Зміна складу покриттів складних типів дозволяє в значних межах варіювати силу тертя і, таким чином, регулювати фрикційні властивості інструментального матеріалу [175-177].

Висновки:

1. Процеси точного об'ємного штампування є сучасним рішенням в отриманні деталей з підвищеною якістю та точністю. У порівнянні з іншими способами закритого видавлювання в роз'ємних матрицях має найбільші технологічні можливості. Застосування таких схем деформування дозволяє розширити номенклатуру отримуваних виробів суцільних та пустотілих, осесиметричних та неосесиметричних виробів. Тому є тенденція до збільшення практичного освоєння подібних процесів.

2. Актуальною проблемою, над якими працюють фахівці в області об'ємного деформування, є розширення технологічних можливостей процесів обробки тиском видавлюванням за рахунок регулювання кінематики формоутворення заготовок. Для вирішення даної проблеми ведеться пошук і розробка нових високоефективних схем деформування на основі розвитку наукової бази, математичних моделей і удосконалення процесів деформування з регулюванням кінематики формозміни.

3. Існуючі теоретичні рішення не задовольняють потреб сучасного виробництва. Розширення можливостей відомих способів точного штампування видавлюванням у роз'ємних матрицях та створення нових вимагає створення математичних моделей, які дозволяють визначати силовий режим деформування і розкриття з урахуванням кінематики руху

інструмента та пластичного формозмінення заготовки, що забезпечують отримання якісних бездефектних деталей.

4. Недостатня вивченість питання дефектоутворення у вигляді утягнення, прострілів і зажимів знижує ефективність пластичного деформування. Варто приділити увагу розробці рекомендацій з бездефектного формоутворення деталей, що базується на сучасного методі скінченних елементів з варійованими кінематичними параметрами процесу деформування і розвитку шляхів побудови рішень з урахуванням особливостей їх використання.

5. Незважаючи на наявність теоретичних рішень щодо визначення силового режиму і напружено-деформованого стану для процесів комбінованого та суміщеного видавлювання залишається актуальним питання уточнення цих рішень. А також потрібні дослідження силового режиму розкриття матриць, енергосилового режиму штампування та оцінки ресурсу пластичності і формозміни.

6. Розробка та удосконалення штампового оснащення є актуальною. Створення довговічних в експлуатації конструкцій штампів з роз'ємними матрицями можливе за рахунок поліпшення кінематичних і силових характеристик, надійності, продуктивності і гнучкості технологічного оснащення та обладнання. Поліпшення умов експлуатації складно-навантаженого інструменту є резервом у підвищенні надійності процесу і зниженні технологічних помалок.

Зважаючи на викладене, науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування на основі розвитку наукової бази, математичних моделей і удосконалення процесів деформування з регулюванням кінематики формозміни є актуальною і сучасною. На основі проведеного аналізу сформульовано *мету* та *задачі* роботи, що викладені у вступі дисертації.

2 ВИБІР НАПРЯМІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір напрямів дослідження

Розширення номенклатури отримуваної продукції, що нерозривно пов'язано з підвищенням якості готових деталей, є основним напрямом розвитку промисловості. Дотримання таких тенденцій дозволяє підвищити конкурентоспроможність продукції на ринках не лише України, а й за її межами.

На сучасному етапі розвитку вітчизняного машинобудування, зокрема штампувального виробництва, отримувана продукція не задовольняє деяким вимогам по фізичним та механічним властивостям. Це стосується складнопрофільованих симетричних та несиметричних деталей всіх галузей промисловості об'ємного штампування деталей з чорних і кольорових металів, що пов'язано з недостатньо високою якістю вихідних заготовок та складною конфігурацією необхідного оснащення. Низька ефективність реалізованих технологічних процесів комбінованого, суміщеного та поздовжнього бокового видавлювання має місце фізичне і моральне старіння обладнання. Для підвищення якості продукції існують різні технічні рішення. Одне з них – придбання сучасного обладнання, але для цього необхідні високі матеріальні витрати. Цим шляхом не можуть піти багато підприємств в силу обмежених матеріальних ресурсів і оборотних коштів.

На більшості підприємств виникає необхідність реалізовувати необхідні технології з мінімальними витратами і в мінімально короткі терміни. У таких ситуаціях для кожного конкретного прийнятого рішення необхідний високий ступінь наукової обґрунтованості, для чого потрібне проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень. Підвищення ефективності в ресурсозберігаючих процесах об'ємного штампування супроводжується дослідженням не тільки самих процесів, але й відповідного йому устаткування, попередніх і подальших процесів.

Деталі типу стрижень з фланцем, деталі з симетричними та несиметричними відростками, деталі з боковими відростками типу «перо», порожисті деталі типу стакан зі змінною товщиною стінки і т.п., на машинобудівних підприємствах складають велику частину номенклатури. Дані способи видавлювання досить широко відомі, але обмеженість в технологічних рекомендаціях щодо здійснення способами закритого об'ємного штампування викликає ряд труднощів. Основні труднощі полягають в прогнозуванні різного виду дефектів та заходів щодо усунення їх, прогнозування формоутворення та уточнення силового режиму процесів.

Незважаючи на те, що об'ємне штампування видавлюванням має безліч кінематичних схем, дослідження цих схем практично не ведеться, особливо не звертається увага на регулювання кінематики руху інструменту для досягнення бездефектного формоутворення деталей. Це обумовлено труднощами математичного моделювання технологічних режимів формозміни при об'ємному штампуванні. Формулювання напрямків регулювання кінематики пластичного формозмінення дозволяє спростити виявлення та рішення з розширення області застосування схем деформування (рис. 2.1). Зміна кінематики руху інструменту, зокрема одно- та двостороння подача металу в осередок деформування, сприятливо впливає на усунення дефектів та отримання нових типів деталей. Рішення даного завдання нерозривно пов'язане з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень.

Комплексний підхід в реалізації основних заходів стосовно нових та удосконалення існуючих способів об'ємного штампування базується на вдосконаленні діючих технологій в напрямку підвищення якості холодноштампованих деталей при одночасній мінімізації питомих матеріальних та експлуатаційних витрат. Крім того важливу роль відіграє виявлення технологічних можливостей і пред'явлення конкретних вимог до процесів та обладнання для холодного штампування деталей з фланцем, розробка науково обґрунтованих вимог щодо підвищення якості деталей

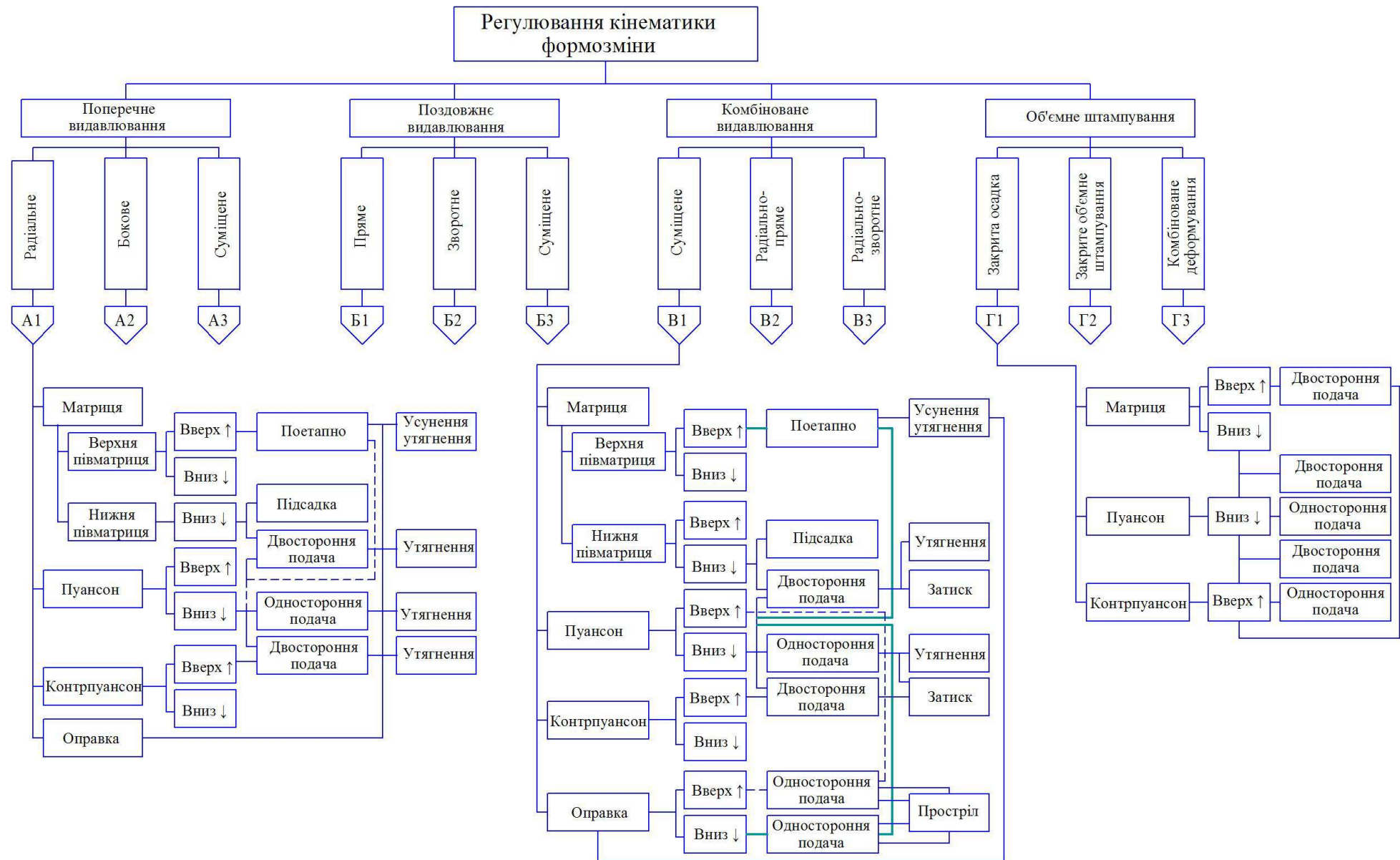


Рисунок 2.1 – Напрямок регулювання кінематики формозміни

машин з точки зору подальшої термомеханічної обробки, докладний розгляд технологічних можливостей вже існуючого обладнання, в тому числі технологічних схем видавлювання, і розробка рекомендацій по діапазонах їх найбільш ефективного використання.

Якщо розглядати питання щодо розширення номенклатури, підвищення якості та зниження собівартості холодноштампованих виробів з наукової точки зору необхідно: забезпечити подальший розвиток уніфікованих методів дослідження для порівняльного аналізу різних технологічних і конструктивних схем, що підвищить ступінь наукової обґрунтованості отриманих результатів; уточнити вихідні дані, розширити і вдосконалити методи розрахунків як для збільшення обсягів наданої інформації, так і для підвищення ступеня її достовірності; розробити чисельні математичні моделі різного рівня складності, які будуть відрізнятися по точності інформації, що надається, часу реалізації, трудомісткості, при цьому кожна з отриманих моделей буде використана для конкретного випадку; розробити рекомендації щодо вдосконалення технології стосовно до конкретного механічного обладнання; сформулювати і вирішити завдання з автоматизованого проектування технологічних режимів і механічного устаткування.

Наукові дослідження пов'язані з трудомісткістю і великими термінами їх реалізації. Для зниження зазначених показників доцільно застосовувати теоретичні методи аналізу, які засновані на розробці і чисельній реалізації математичних моделей, які в достатній мірі повно відображають реальні фізичні процеси.

Фізичні (експериментальні) моделювання потрібно проводити ще на стадії проектування технології і обладнання. Їх використання дозволяє розширити об'єм інформації, диференційовано оцінити ступінь впливу кожного окремого конструктивного або технологічного параметра, визначити ряд локальних характеристик, а також комплексно оцінити основні показники якості готових виробів [178-181].

2.2 Методика проведення теоретичних досліджень

Для моделювання силового режиму і формозміни у процесах пластичного деформування використовуються різні теоретичні і експериментально–аналітичні методи.

Для процесів точного об'ємного штампування видавлюванням потрібна розробка математичних моделей, які дозволили б оцінити не тільки поетапний розвиток енергосилового режиму, що включає активне деформуюче навантаження, але і прогнозувати характер і особливості заповнення порожнини, наростання розмірів і формування контуру штампованої деталі. Розробка і оптимізація процесів видавлювання вимагає аналізу великої кількості їх можливих варіантів, в тому числі і нових способів, з визначенням кінематики течії, послідовності формоутворення, силових режимів в залежності від форми інструменту, контактних умов та інших технологічних параметрів.

Одним з ефективних методів вирішення подібних завдань пластичного деформування є енергетичний метод (ЕМ) [178, 179].

Перевагою енергетичних методів балансу потужностей і верхньої оцінки слід вважати їх наочність, гнучкість, оперативність, можливість ефективного застосування ЕОМ для вибору відповідних функцій і змінних параметрів, що описують кінематику течії [178, 179]. Привабливою особливістю методу є те, що він дозволяє використовувати і досвідні дані для уточнення граничних умов, кінематичних полів швидкостей, розмірів і форми зон інтенсивної деформації [179, 183]. Ця властивість робить обґрунтованим застосування комплексного підходу до дослідження технологічних режимів процесів видавлювання, що включає проведення попередніх настановних експериментів, необхідних для отримання вихідних даних і розробки математичних моделей процесів деформування, адекватність яких згодом також перевіряється досвідними результатами.

Згідно енергетичного методу в заготовці, що деформується, виділяють ряд пластичних зон – кінематичних елементів. Для кожного елемента знаходять кінематично можливе поле швидкостей (КВПС) і на його основі повну потужність деформування, мінімізація якої дозволяє оптимізувати параметри процесу деформації і уточнити оцінки силового режиму і картин пластичної течії [44, 184–185].

Допущення, характерні для енергетичного методу: матеріал, не зміцнюється, пружними деформаціями нехтують; матеріал ізотропний; швидкість руху інструменту постійна; напруження тертя на контакті постійні і задані наперед (за законом Зібеля).

Умови та обмеження, характерні для методу: умова нестисненості (умова сталості об'єму); кінематичні граничні умови; умова суцільності матеріалу – умова нерозривності нормальних компонентів швидкостей течії.

Основне для ЕМ рівняння енергетичного балансу потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на КВПС пов'язує потужність зовнішніх активних сил $N_a = p \cdot F \cdot V_0$ з потужністю внутрішніх сил:

$$p \cdot F \cdot V_0 = \sum N_{di} + \sum N_{Tj} + \sum N_{Ck}, \quad (2.1)$$

де N_{di} – потужність сил деформування,

N_{Tj} – потужність сил тертя,

N_{Ck} – потужність сил зрізу.

$$p \cdot F \cdot V_0 = \iiint_V \sigma_s \cdot \dot{\epsilon}_i dV + \iint_{F_T} \tau_k \cdot [V_k] dF_T + \iint_{F_c} \tau_s \cdot [V_c] dF_c \quad (2.2)$$

З рівняння енергетичного балансу потужностей, отримано значення тиску видавлювання p :

$$p = \frac{\sum N_{oi} + \sum N_{Tj} + \sum N_{ck}}{F \cdot V_0}, \quad (2.3)$$

Для простоти розрахунків тиск деформування приведемо до безрозмірної величини, тобто до приведеного тиску $\bar{p}$:

$$\bar{p} = \frac{p}{2k} = p/\sigma_s; \quad (2.4)$$

де σ_s – межа текучості матеріалу, МПа;

k – постійна пластичності, МПа, $k = \sigma_s / \sqrt{3}$.

Потужності, що входять в рівняння балансу, визначаються за інтегральними залежностями [44].

Потужність сил деформування N_o

$$N_o = \iiint_{V_o} \sigma_s \dot{\varepsilon}_i dV_o, \quad (2.5)$$

де σ_s – напруження текучості, МПа;

$\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформування;

V_o – об'єм пластичної зони;

dV_o – нескінченно малий об'єм деформування.

Для процесів осесиметричного деформування інтенсивність швидкості деформації визначається по залежності [44]:

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\dot{\varepsilon}_z^2 + \dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\theta^2 + \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{rz}^2 \right)}, \quad (2.6)$$

де $\dot{\varepsilon}_z = \frac{dV_z}{dz}$, $\dot{\varepsilon}_r = \frac{dV_r}{dr}$, $\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r}$, $\dot{\gamma}_{rz} = \frac{dV_r}{dz} + \frac{dV_z}{dr}$ – малі відносні лінійні і

кутові швидкості деформацій.

При цьому повинна виконуватися умова нестисненності матеріалу:

$$3\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta = 0. \quad (2.7)$$

Для спрощення обчислень при визначенні потужності сил деформування проводять лінеаризацію інтенсивності швидкостей деформації $\dot{\varepsilon}_i$. Якщо при обраному розподілі швидкостей в пластичній зоні можливо встановити найбільший з компонентів швидкостей деформацій, то з деякою похибкою можна використовувати лінеаризований вираз [44]:

$$\dot{\varepsilon}_i = 1,08 |\dot{\varepsilon}_{\max}|, \quad (2.8)$$

де $\dot{\varepsilon}_{\max}$ — максимальний за абсолютною величиною компонента швидкості деформації.

Потужність сил зрізу N_c

$$N_c = \iint_{F_c} \tau_s [V_c] dF_c, \quad (2.9)$$

де τ_s — напруження текучості при зсуві, МПа; $\tau_s = k = \sigma_s / \sqrt{3}$;

$[V_c]$ — відносна швидкість зрізу на межах двох сусідніх зон (величина розриву швидкості);

F_c — площа поверхні зрізу;

dF_c — нескінченно мала площа зрізу.

Потужність сил тертя N_T :

$$N_T = \iint_{F_k} \tau_k V_k dF_k, \quad (2.10)$$

де τ_k — контактне напруження, МПа; $\tau_k = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \mu_s$,

μ_s — коефіцієнт тертя за Зібелем ($0 \leq \mu_s \leq 0,5$);

V_k – відносна швидкість руху заготовки уздовж контакту з інструментом;

F_k – площа контактної поверхні;

dF_k – нескінченно мала площа контакту.

Приведений тиск є критеріальною величиною, що дозволяє розрахувати незалежно від марки матеріалу для певної схеми деформації величину тиску деформування p і силу деформування P :

$$p = \bar{p} \cdot \sigma_s, \text{ МПа}; \quad (2.11)$$

$$P = p \cdot F, \text{ Н} \quad (2.12)$$

де F – площа перерізу активного деформуючого інструменту [44].

Значення напруженості течії матеріалу заготовки для урахування деформаційного зміцнення [178, 179] можна отримати з діаграм зміцнення для використовуваних матеріалів в залежності від середнього ступеня деформації за Р. Хіллом [179]:

$$\dot{\epsilon}_i = \bar{p}, \quad (2.13)$$

Підвищенню оперативності енергетичного методу, зниженню трудомісткості обчислень технологічних режимів зіставляються схемами або по етапам деформування може служити модульний підхід, заснований на підборі і використанні уніфікованих кінематичних модулів (елементарних полів швидкостей) [185, 187], призначених для опису переважаючих схем деформацій в пластичних зонах.

2.2.1 Метод верхньої оцінки

Метод верхньої оцінки (МВО) є окремим випадком енергетичного методу. При вирішенні завдань за МВО об'ємна або осесиметрична задача

зводиться до плоского деформованого стану (ПДС). Осередок деформації розбивається на ряд жорстких зон. Деформація зводиться до переміщення цих зон (елементів) відносно один одного. Дотримання кінематичних граничних умов перевіряється побудовою годографу швидкостей.

Приведений тиск $\bar{p}$ розраховується за спрощеною формулою енергетичного балансу [179]:

$$\bar{p} = \frac{1}{2bV_0} [\sum l_{ij} V_{ij} + 2\mu_s \sum l_{ik} V_{ik}], \quad (2.14)$$

де b – довжина лінії контакту заготовки і активного інструменту (за перерізом);

l_{ij} , V_{ij} – довжина межі контакту і швидкість відносного руху блоків, між якими відбувається зріз. Величини l_{ij} , V_{ij} визначаються з прийнятого поля швидкостей і відповідного йому годографа швидкостей;

l_{ik} , V_{ik} – довжина кордону контакту і швидкість відносного руху інструмента і заготовки.

Оптимальне число жорстких елементів n , що дає мінімум верхньої оцінки питомої сили не постійне, а залежить від форми і розмірів осередку деформації.

З використанням годографа швидкостей може бути обчислений накопичений ступінь деформації зсуву γ_{ij} , проаналізовано наростання ступеня деформації по ходу течії і розподіл ступеня формозміни по перерізу деформованого зразка. Використовуючи відомості про напруження і деформації, можна оцінити ступінь витрати (використання) ресурсу пластичності [178], а також прогнозувати тепловиділення [179].

Головними перевагами методу є його оперативність, геометрична наочність і можливість визначення жорстких і пластичних зон. Можливість мінімізації верхньограничних значень зусиль і енергії деформування по варійованим параметрам оптимізації процесу, передбачені в МВО, є потужним інструментом оптимізації та уточнення технологічних рішень. Варіаційний

підхід в методах ЕМ і МВО дозволяє, використовуючи прості розривні поля швидкостей, прогнозувати характерні відхилення і дефекти типу утягнень, незаповнених порожнин і розривів суцільності [44, 178, 179, 188-190].

2.2.2 Застосування методу скінченних елементів для дослідження технологічних режимів об'ємного штампування видавлюванням.

Метод скінченних елементів (МСЕ) має широкі можливості і універсальність. МСЕ знайшов широке застосування для вирішення задач аналізу пружних деформацій штампів, пластичної деформації заготовок, розрахунку напружено-деформованого стану і температурних полів в технологічних завданнях обробки металів тиском [191, 193]. МСЕ – це узагальнення варіаційного методу. Його відмінність від варіаційного методу полягає в тому, що координатні функції вибирають у вигляді кусочно-лінійних функцій. Це розширює можливості методу і значно спрощує рішення задачі. Лінійність координатних функцій дозволяє звести рішення системи складних диференціальних рівнянь до системи лінійних рівнянь [191-193]. Метод дозволяє вирішувати як плоскі, і осесиметричні, так і об'ємні завдання пластичної течії. Результати чисельного аналізу можна уявити в зручному для сприйняття вигляді, наприклад, ліній струму частинок металу, ізоліній розподілу температур, деформацій, напружень. Знаючи ці результати можна прогнозувати утворення дефектів форми і появу зон передчасного руйнування [191, 194-196].

В даний час для моделювання процесу видавлювання МСЕ використовують як різні загально-інженерні пакети, так і програми, розроблені під реальну технологічну задачу.

В основі МСЕ лежить розбиття об'єму деформованого тіла на безліч простих геометричних елементів (плоскі і об'ємні елементи: прямолінійні і криволінійні, правильні і довільні трикутники і чотирикутники та ін.). Елементом в цілому і кожному вузлу зокрема надають певні ступені свободи, а кожен елемент має властивості матеріалу дискретизованого середовища

Для пружньопластичних матеріалів це, перш за все, механічні властивості середовища. Основні співвідношення МСЕ, стосовно до процесів ОМТ, засновані або на теорії пластичної течії, або на теорії пластичності [196].

Існує безліч спеціалізованих і загально-інженерних пакетів скінчено-елементного аналізу, для моделювання, розрахунку процесу формозміни при видавлюванні з великими деформаціями та для дослідження процесів об'ємного штампування в комбінації з іншими видами інженерного аналізу (тепловий, динамічний і т. д.) в основному, використовують спеціалізовані програми, такі як ANSYS, ABAQUS, QFORM [156, 157, 181], DEFORM та ін.

Процеси видавлювання характеризуються, як правило, великою величиною деформацій, наявністю застійних зон і значною неоднорідністю деформації за об'ємом заготовки. Для нових схем поперечного та комбінованого видавлювання характерна складність конфігурації штампованих деталей і наявність декількох ступенів свободи течії металу. Ці фактори ускладнюють моделювання за допомогою МСЕ в разі, якщо використовується підхід Лагранжа до опису руху матеріалу (Лагранжеве формулювання елемента) [193]. В цьому випадку в зоні осі симетрії, де величина осьового компонента деформації найбільша і елементи сильно стискаються або подовжуються, відношення сторін вихідного квадратного елемента збільшується в десятки разів. А на перехідних кромках і вихідних частинах матриці матеріал відчуває настільки велику і неоднорідну деформацію, що 4-х вузлові елементи, наприклад, фактично вироджуються в 3-х вузлові [193, 220]. У зоні радіусного переходу матриць порушуються і контактні умови. Таке викривлення форми елементів не дозволяє вважати результати розрахунків достовірними.

Один з методів усунення цього недоліку – адаптивна побудова сітки зі зменшеним характерним розміром елементів в зонах з передбачуваним значним градієнтом деформації (зони зі значною неоднорідністю деформації). Найбільш ефективним в цьому випадку є так звана *r*-адаптивна перебудова сітки з встановленим постійним характерним розміром елемента [220]. Істотним недоліком зазначеного способу є перестроювання в строго

певні моменти часу незалежно від поточного викривлення форми елементів. Модифікація методу зі встановленою чутливістю до форми елементів дозволяє усунути цей недолік [197]. В цьому випадку оцінювати адекватність параметрів СЕ моделі пропонується за деякими якісними та кількісними критеріями, що описують такі специфічні явища, як втрата стійкості процесу деформування і викривлення форми видавлюється напівфабрикату при наявності вільних поверхонь [197].

Таким чином, використання імітаційного моделювання процесів об'ємного штампування за допомогою МСЕ є реальною альтернативою експериментальному дослідженню і теоретичному аналізу і може бути досить ефективним при аналізі процесів холодного видавлювання і вирішенні поставлених завдань. Але, СЕ – моделі процесів видавлювання, як і всякі рішення, засновані на спрощених гіпотезах, вимагають остаточного підкріплення отриманих результатів досвідними даними [192, 198]. З іншого боку, немає суперечності і в тому, що вихідні дані для постановки завдань по МСЕ доцільно і корисно уточнити за допомогою фізичного моделювання [193, 197, 199, 200].

2.2.3 Планування експерименту

Помітне підвищення ефективності досліджень і інженерних розробок досягається використанням математичних методів планування експериментів. Використання математико–статистичних методів при постановці завдань, в процесі обробки отриманих даних істотно скорочує терміни рішення, знижує витрати на дослідження і підвищує якість отриманих результатів.

В якості незалежних змінних вибираються досліджувані параметри процесів ОМТ. Локальна область визначення факторів встановлюється з апріорних міркувань. Кожен із чинників варіюється на двох рівнях. Інтервали варіювання факторів і їх значення в натуральному масштабі на

основному, верхньому і нижньому рівнях вказуються в таблиці рівнів факторів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Рівні факторів

Фактори	X_1	X_2	X_3
Основний рівень (X_{i_0})	X_{1_0}	X_{2_0}	X_{3_0}
Інтервал варіювання (ΔX_i)	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3
Верхній рівень ($x_i = 1$)	$X_{1_0} + \Delta X_1$	$X_{2_0} + \Delta X_2$	$X_{3_0} + \Delta X_3$
Нижній рівень ($x_i = -1$)	$X_{1_0} - \Delta X_1$	$X_{2_0} - \Delta X_2$	$X_{3_0} - \Delta X_3$

Кодування значень (x_i) пов'язані з натуральними (X_i) співвідношеннями:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta X_i}, \quad (2.15)$$

Послідовність обробки результатів експерименту:

1. Розрахунок дисперсії досліду:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (2.16)$$

де y_{u_g} – результат g -го повторення u -го зразка;

$\bar{y}_u$ – середнє арифметичне значення n_u дублів u -го досліду;

$f_u = n_u - 1$ – число ступенів свободи при визначенні u -й порядкової дисперсії $S_{y_u}^2$.

Для перевірки однорідності ряду розраховується величина критерію Кохрена.

$$G^{расч} = \frac{S_{y_u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (2.17)$$

де $G^{расч} < G^{табл}$ – умова однорідності ряду дисперсій.

2. Розрахунок коефіцієнтів регресії. В даному випадку модель будується за такою залежністю

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_i \cdot x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq 4} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq l \leq 4} b_{ijl} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_l + b_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4, \quad (2.18)$$

Для розрахунків коефіцієнтів b використовується розширена матриця планування (табл. 2.2) і результати дослідів:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot y_u}{N}, \quad (2.19)$$

3. Перевірка статистичної значущості коефіцієнтів передбачає визначення дисперсії оцінок коефіцієнтів.

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N}, \quad (2.20)$$

Далі визначається довірчий інтервал коефіцієнтів регресії.

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (2.21)$$

Коефіцієнти, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу або більше його, слід визнати статистично значущими. Статистично незначущі коефіцієнти з моделі можна виключити.

4. Перевірка адекватності моделі: визначається дисперсія неадекватності.

$$SS_{неад} = n \cdot \sum_{u=1}^N (y_{u\text{ расч}} - \bar{y}_{u\text{ эксп}})^2, \quad (2.22)$$

Гіпотеза про адекватність моделі визначається за критерієм Фішера:

$$F_{f_2 f_1}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (2.23)$$

де $F_{f_2 f_1}^{расч} < F^{табл}$ – гіпотеза про адекватність моделі не відкидається.

Для планів типу B_k коефіцієнти регресійного рівняння можна визначити за такими формулами:

$$b_0 = C_1 \sum_{u=1}^N y_u - C_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad b_i = C_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (2.24)$$

$$b_{ij} = C_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad b_{ii} = C_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - C_2 \sum_{u=1}^N y_u, \quad (2.25)$$

де $C_1 \dots C_6$ – допоміжні константи.

Таблиця 2.2 – Розширена матриця плану

№ досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_1^2	x_2^2	x_3^2
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
10	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
11	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
12	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
13	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Рівняння регресії визначається залежністю:

$$y = b_0 + \sum_{u=1}^{14} b_i x_i + \sum_{u=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{u=1}^{14} b_i x_i^2. \quad (2.26)$$

2.2.4 Визначення напруженого стану. Оцінка вичерпання ресурсу пластичності

В процесі холодного пластичного деформування, поряд зі зміцненням металу, відбувається накопичення в ньому пошкоджень, що приводить до знеміцнення матеріалу і зниження показників залишкової пластичності. В результаті цього спостерігається погіршення службових властивостей виробів, аж до руйнування заготовок в процесі пластичної обробки або виробів при експлуатації. Тому забезпечення якості виробів при обробці методами ОМТ неможливо без оцінки здатності металів деформуватися без руйнування, при мінімальному вичерпанні ресурсу пластичності.

Головним фактором, що впливає на пластичність металів в умовах холодного деформування, є схема напруженого стану. Залежність пластичності від параметрів, що характеризують схему напруженого стану, називають діаграмою пластичності.

Найбільшого поширення набуло уявлення залежності пластичності від показника напруженого стану, запропонованого Г. А. Смирновим–Аляєвим:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (2.27)$$

де σ_0 – гідростатичне напруження;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – компоненти тензора головних напружень;

σ_u – інтенсивність напружень.

Показник η не враховує впливу третього інваріанта тензора напружень, тому діаграму пластичності в координатах ϵ_u – η неможна вважати єдиною для всіх можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформовності металів в різних технологічних процесах необхідно розташовувати «єдину» діаграму пластичності, яка описує їх пластичність при різних схемах напруженого стану. Випробування металів на пластичність в камері високого тиску різними методами показали різні результати, відповідні одним і тим же значенням показника напруженого стану [201]. Зокрема В. Л. Колмогоровим встановлено, що при розтягуванні в умовах $\eta=0$ пластичність вище, ніж при крученні. А. А. Богатов та ін. Показали, що результат випробувань виходить різний, при цьому яка характеристика більше, залежить від марки металу. В. А. Огородніков встановив, що при крученні, в разі створення в камері високого тиску умов з рівними значеннями показника напруженого стану, пластичність буде все ж нижче, ніж при стисканні.

Для виключення можливих розбіжностей при оцінці деформовності металів необхідно, щоб в досліджуваному технологічному процесі і експериментах з побудови діаграм пластичності дотримувалися умови ідентичності параметра Надаї–Лоде, що характеризує вид девіатора напружень.

$$\mu_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2.28)$$

Залежність пластичності від схеми напруженого стану може бути описана шляхом побудови повної поверхні пластичності в координатах $\varepsilon_u - \eta - \mu_{\sigma}$. Зазначена залежність запропонована С. І. Губкіним, однак її побудова пов'язана з цілим рядом труднощів експериментального характеру.

Вибір і обґрунтування інваріантів напруженого стану при вирішенні задач механіки матеріалів розглянуто в роботі А. А. Лебедева, В. М. Михалевича.

В роботі В. А. Огородніковим запропоновано будувати поверхню пластичності в координатах $\varepsilon_u - \mu - \chi$, де χ показник, що враховує третій інваріант тензора напружень

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (2.29)$$

Поверхню пластичності, побудовану в координатах " $\varepsilon_u - \mu - \chi$ ", можна визначити як об'ємну діаграму пластичності. Переріз поверхні площиною, перпендикулярній осі $\chi=0$, призводить до отримання діаграми пластичності в координатах $\varepsilon_u = \varepsilon_u(\eta)$. Для побудови діаграм пластичності за даною методикою необхідно проводити трудомісткі випробування в камері високого тиску. Це виключає можливість випробування пластичних матеріалів на стиск, а випробування на розтягнення призводять до неточностей результатів внаслідок появи шийки.

Сиваком І. О. розроблена методика побудови поверхонь $\varepsilon_p(\eta, \mu_\sigma)$ шляхом простих випробувань на розтяг, стиск, чистий зсув і випробувань на осадку циліндричних зразків в оболонках різної товщини.

При деформації, коли показник напруженого стану не залишається постійним, пластичність прийнято оцінювати на основі так званих критеріїв руйнування. Сутність критеріїв руйнування полягає в застосуванні моделі накопичення пошкодженості металу, що залежить від величини накопиченої деформації та напруженого стану [202-205].

Ступінь пошкодженості металу називають використаним ресурсом пластичності (В.А. Огородніков), який прийнято позначати буквою. Величину недеформованого металу приймають рівною нулю, а умова руйнування має вигляд $\psi=1$.

Використовуючи інформацію про ПДВ матеріалу і обґрунтовано застосувавши критерії руйнування, можна визначити величину використаного і залишкового ресурсів пластичності і прогнозувати якість виробів, вироблених методами локального деформування.

Результати розрахунків напружено-деформованого стану були використані для оцінки значень використаного ресурсу пластичності, який

визначали за формулою.

Головні напруження визначаються з рішення характеристичного рівняння, яке в загальному випадку є кубічним.

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (2.30)$$

де $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхню граничних деформацій;

$\mu_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ – параметр Надаї–Лоде.

$$\sigma^3 - I_1 \cdot \sigma^2 + I_2 \cdot \sigma - I_3 = 0, \quad (2.31)$$

де σ – шукані головні напруження;

I_1, I_2, I_3 – перший, другий і третій варіанти тензора напружень.

2.3 Методика проведення експериментальних досліджень

2.3.1 Визначення напружено–деформованого стану

Більшість експериментальних методик обчислення напружено–деформованого стану засновані на співвідношеннях теорії кінцевих деформацій [206-210]. Параметри деформованого стану визначаються із зіставлення кінцевої форми і розмірів осередку ділильної сітки з її вихідною формою і вихідними розмірами [208].

При цьому вводяться допущення про монотонне протікання процесу формозміни матеріальної точки, як умова існування зв'язку між напруженим і деформованим станом. Напрямний тензор дуже малої деформації завжди дорівнює відповідному за часом направляючому тензору напруженого стану цієї частки [209].

Для визначення напружено–деформованого стану (НДС) в даній роботі використовували метод координатних сіток [210, 211]. За вихідні і кінцеві напрямки головних осей приймаються напрямки, з якими в площині

нанесення сітки збігаються матеріальні волокна, які отримали найбільший і найменший ступінь деформації. Робиться припущення, що напрямки головних осей збігаються з напрямками одних і тих же матеріальних волокон тільки на даному етапі. Шлях деформування представляється ламаною лінією.

Послідовність розрахунку компонентів деформацій на послідовних етапах деформування приведена в табл. 2.3, розрахункова схема показана на рис. 2.2 і 2.3. Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану проводився з використанням ЕОМ.

Таблиця 2.3 – Розрахункові формули для визначення компонентів деформацій за методикою І.П.Ренне [212]

№	Етап	Формули
1	Введення вихідних даних	$X_0, Y_0, X_a, Y_a, X_c, Y_c,$ a_0, b_0, δ_0
2	Кути викривлення осередків	$\psi_1 = \arctg \frac{X_0 - X_a}{Y_0 - Y_a}$ $\beta_1 = \arctg \frac{Y_0 - Y_c}{X_0 - X_c}; \quad \delta_1 = \beta_1 - \psi_1$
3	Довжина сторони паралелепіпеда	$a_1 = \sqrt{(X_0 - X_a)^2 + (Y_0 - Y_a)^2}$ $b_1 = \sqrt{(X_0 - X_c)^2 + (Y_0 - Y_c)^2}$
4	Параметри до розрахунку головних деформацій	$A = a_0 \cdot b_0 \cdot a_1^2 \cdot \cos \delta_0 - a_1 \cdot b_1 \cdot a_0^2 \cdot \cos \delta_1$ $C = a_0 \cdot b_0 \cdot b_1^2 \cdot \cos \delta_0 - a_1 \cdot b_1 \cdot b_0^2 \cdot \cos \delta_1$ $B = a_0^2 \cdot b_1^2 - a_1^2 \cdot b_0^2$ $n_{1,2} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}$

№	Етап	Формули
5	Збільшення головних деформацій	$\Delta\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{b_1^2 + n_1^2 \cdot a_1^2 + 2 \cdot n_1 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \cos \delta_1}{b_0^2 + n_1^2 \cdot a_0^2 + 2 \cdot n_1 \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot \cos \delta_0}$ $\Delta\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{b_1^2 + n_2^2 \cdot a_1^2 + 2 \cdot n_2 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \cos \delta_1}{b_0^2 + n_2^2 \cdot a_0^2 + 2 \cdot n_2 \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot \cos \delta_0}$ $\Delta\varepsilon_3 = -(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2)$
6	Кути нахилу головних осей	$\varphi_1 = \arctg \frac{b_1 \cdot \sin \psi_1 + n_1 \cdot a_1 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \beta_1)}{b_1 \cdot \cos \psi_1 + n_1 \cdot a_1 \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \beta_1)}$
7	Зсувні деформації	$\Delta\tau_{rz} = (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2) \cdot \sin(\varphi_1)$
8	Приріст інтенсивності деформації	$\Delta\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot (\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3)^2 + \frac{1}{2} \cdot (\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1)^2}$
9	Приріст компонентів деформацій	$\Delta\varepsilon_z = \frac{1}{2} \cdot [\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 + (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2) \cdot \cos \varphi_1]$ $\Delta\varepsilon_r = \frac{1}{2} \cdot [\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 - (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2) \cdot \cos \varphi_1]$ $\Delta\varepsilon_\theta = -(\Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_r)$
10	Сумарне значення параметрів деформації	$\varepsilon_i = \sum \Delta\varepsilon_i$ $\varepsilon_z = \sum \Delta\varepsilon_z$ $\varepsilon_r = \sum \Delta\varepsilon_r$ $\varepsilon_\theta = \sum \Delta\varepsilon_\theta$

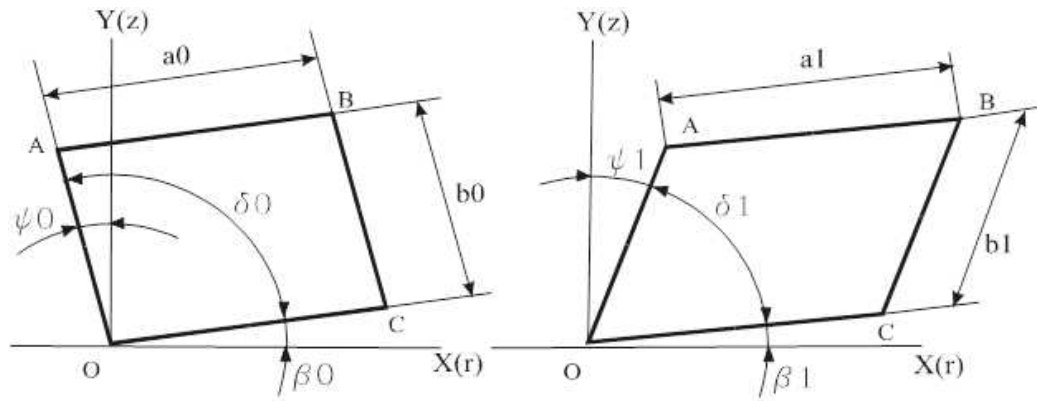


Рисунок 2.2 –Схема викривлення чарунки ділильної сітки для розрахунку компонентів деформацій

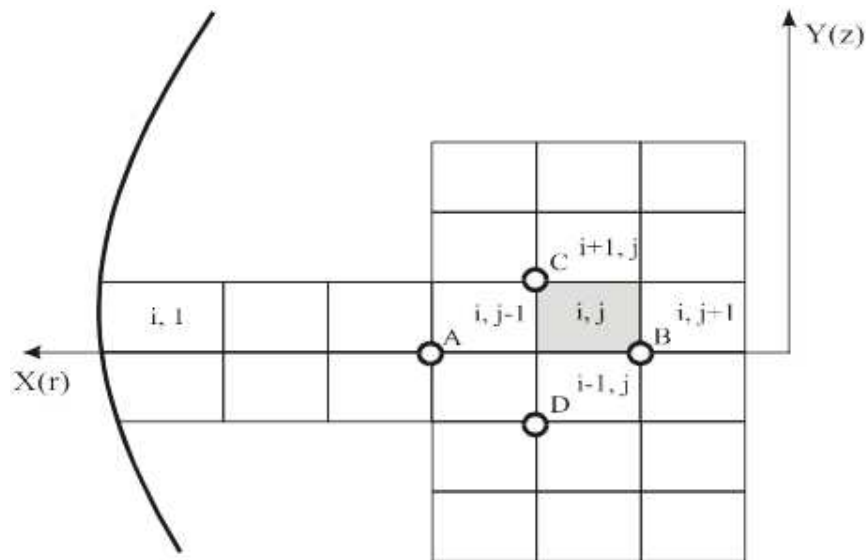


Рисунок 2.3 – Схема до розрахунку гідростатичного тиску

Обчислення проводяться в циліндричній системі координат r, q, z . В силу симетрії компоненти напружень не залежать від полярного кута q . Таким чином, тензор напружень можна записати в наступному вигляді:

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_r & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_{\theta} & 0 \\ \tau_{zr} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Рівняння рівноваги для осесиметричної деформації мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

При вирішенні системи вводиться припущення Хаара–Кармана про рівність окружного напруження одному з двох інших напружень.

При відомому тензорі деформованого стану, компоненти девіатора тензора напруженого стану обчислюються за співвідношеннями теорії течії зміцнюючого матеріалу.

Компоненти девіатора напружень:

$$S_r = \sigma_r - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_r, \quad (2.34)$$

$$S_\theta = \sigma_\theta - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_\theta, \quad (2.35)$$

$$S_z = \sigma_z - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_z, \quad (2.36)$$

Для визначення гідростатичного тиску інтегруємо одне з рівнянь рівноваги. Відповідно до першого з цих рівнянь

$$(\sigma_r)_B = (\sigma_r)_A \pm \int_A^B \left[\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{S_r - S_\theta}{r} \right] dr, \quad (2.37)$$

За другим рівнянням

$$(\sigma_z)_D = (\sigma_z)_C \pm \int_C^D \left[\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right] dz, \quad (2.38)$$

Виконуючи чисельне інтегрування за правилом трапецій для i, j чарунок можна записати в наступному вигляді:

$$(\sigma_r)_{i,j} = (\sigma_r)_{i,1} + \frac{(\tau_{rz})_{i+1,j} - (\tau_{rz})_{i-1,j}}{(b_z)_{i,j} + (b_z)_{i-1,j}} + \frac{(S_r)_{i,j} - (S_\theta)_{i,j}}{r_{i,j}}, \quad (2.39)$$

$$(\sigma_z)_{i,j} = (\sigma_z)_{i+1,j} + \frac{(\tau_{rz})_{i,j-1} - (\tau_{rz})_{i,j+1}}{(a_r)_{i,j} + (a_r)_{i,j-1}} + \frac{(\tau_{rz})_{i,j}}{r_{i,j}}, \quad (2.40)$$

де a_r, b_z – проекції параметрів чарунки на осі r і z , відповідно;
 $r_{i,j}$ – координата i, j чарунки.

Визначивши одне з напружень σ_r, σ_z , віднімаємо з нього відповідну компоненту діватора напружень, знаходимо гідростатичний тиск σ_0 . Додавши його до інших компонентів діватора, знаходимо відповідні їм нормальні напруження.

Якщо пластична зона має вільний від навантаження контур, то окружне напруження у цього контуру дорівнює:

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot (\varepsilon_\theta - \varepsilon_n), \quad (2.41)$$

де ε_n – головна деформація в напрямку нормалі до контуру

Отже, гідростатичний тиск і інші напруження можна визначити за формулами:

$$\sigma_0 = \sigma_\theta - S_\theta; \quad \sigma_r = \sigma_0 + S_r; \quad \sigma_z = \sigma_0 + S_z, \quad (2.42)$$

Ці напруження можуть бути використані як граничні умови

2.3.2 Обробка результатів експериментальних досліджень.

Обробку отриманих в ході роботи експериментальних даних і оцінку достовірності результатів теоретичних досліджень здійснювали на основі методів математичної статистики. Зокрема, адекватність розроблених математичних моделей перевіряли за допомогою точкових та інтервальних оцінок. При цьому відношення порівнюваних розрахункових (теоретичних) і експериментальних значень заснованих технологічних параметрів процесу штампування (P_T/P_E) розглядали як випадкові величини X_i , що характеризуються нормальним законом розподілу і отримані в результаті рівноточних вимірювань.

Оцінку істинного значення вимірюваної величини X проводили по середньоарифметичним значенням результатів декількох дослідів і довірчого інтервалу:

$$X = \sum_{i=1}^i \frac{x_i}{n}, \quad |a - \bar{x}| < t(P; K) \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.43)$$

де $t(P, K)$ – критерій Стюдента, що залежить від довірчої ймовірності оцінки і числа ступенів свободи, $K=n-1$;

n – кількість дослідів;

S – емпіричний стандарт, який визначається як

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}, \quad (2.44)$$

Довірча ймовірність оцінки P була прийнята рівною 0,95, а довірчий інтервал, що покриває величину α з надійністю P визначали наступним чином:

$$\bar{x} - \delta < \alpha < \bar{x} + \delta, \quad (2.45)$$

де δ – точність оцінки, яка характеризується виразом:

$$\delta = t(P, K) \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.46)$$

Оцінку точності вимірювань випадкових величин χ виробляли за величиною середньоквадратичного відхилення σ і довірчого інтервалу, що покриває його:

$$S(1 - q) < \sigma < S(1 + q), \quad (2.47)$$

де q – визначається за таблицями залежно від величин P і K .

Ступінь відповідності двох розподілів отриманих в результаті математичного моделювання і на основі обробки експериментальних даних, заснували за допомогою критерію Смирнова:

$$\Delta = \Delta\alpha = \sqrt{0,5 \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \cdot \ln \frac{2}{\alpha}}, \quad (2.48)$$

де n_1, n_2 – об'єми, що зіставляються з вибірок;

α – прийнятий рівень значущості ($\alpha=0,05$).

Безпосередньо регресійний опис результатів експериментальних досліджень здійснювали на основі стандартних програм інтерполяції, що реалізують метод найменших квадратів, а адекватність отриманих моделей $f(y)$ реального процесу оцінювали за критерієм Фішера:

$$F_{ppac} = \frac{S^2_{ad}}{S^2_{on}}, \quad (2.49)$$

де S^2_{on} – дисперсія дослідів;

S^2_{ad} – дисперсія адекватності:

$$S^2_{ad} = \sum_{i=1}^n \frac{[\bar{x}_y - f(y)y]^2}{n - k - 1}, \quad (2.50)$$

Адекватність математичної моделі вважали обґрунтованою в разі виконання співвідношення $F_{розр} < F_{табл}$, де табличне значення критерію Фішера визначається в залежності від прийнятого рівня значущості і кількості ступенів свободи:

$$K_1 = n - e_1, \quad (2.51)$$

$$K_2 = n - e_2, \quad (2.52)$$

де e_1 – кількості серій дослідів;

e_2 – кількості зв'язків, що накладаються функціями на вибірку, рівне кількості коефіцієнтів, що входять до відповідного аналітичного опису.

2.3.3.Схеми деформування, матеріали, обладнання та оснащення для проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії кафедри ОМТ з використанням випробувальних машин МС–2000 силою 2000 кН і МС–500 силою 500 кН (рис. 2.4).

Всі матриці і пуансони (рис. 2.5) виготовлені зі сталі Х12М, з загартуванням на HRC 56...60, робоча поверхня шліфувалася до R_a 0,4.

Для експериментального визначення форми і розмірів осередку деформації, напрямку течії металу були використані циліндричні зразки з свинцю С1 та алюмінієвого сплаву АД31.



а



б

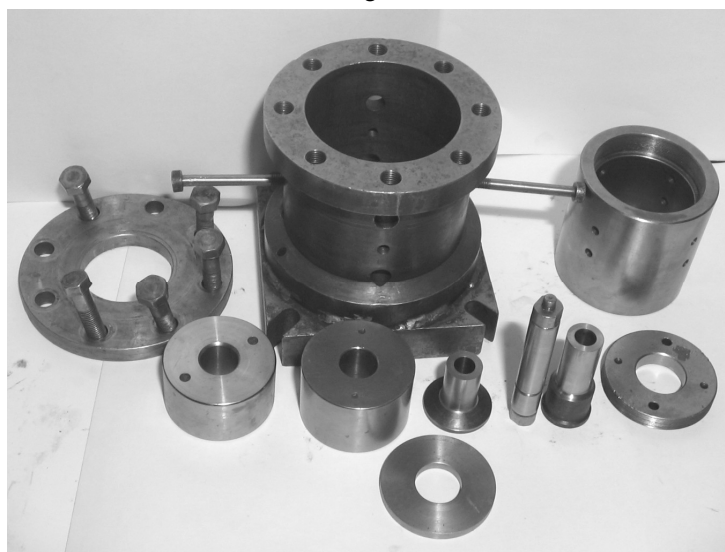
Рисунок 2.4 – Випробувальні машини МС–2000 силою 2000 кН (а) і МС–500 силою 500 кН (б)



а



б

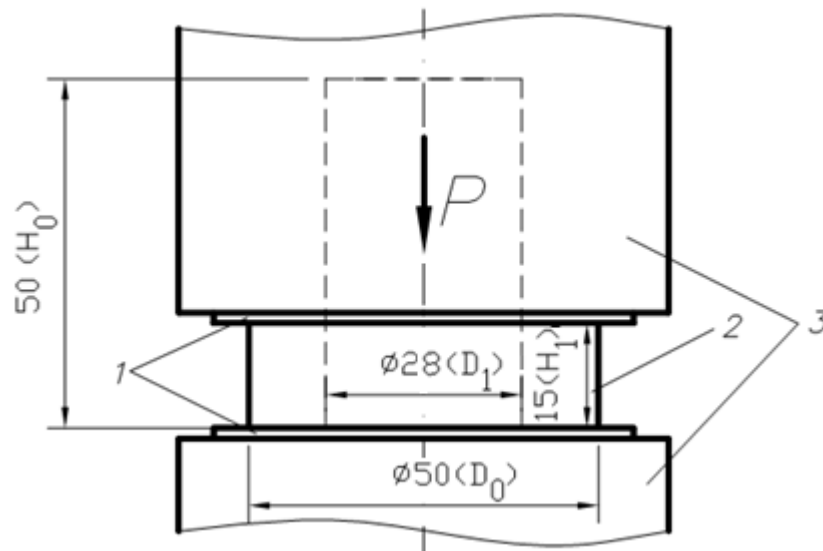


в

Рисунок 2.5 – Комплект матриць (а) і пуансонів (б), контейнерів, змінних центрувальних і перехідних кілець, опорних прокладок (в)

Всі свинцеві зразки виготовлялися методом лиття з подальшим пресуванням на необхідні розміри. Перед деформацією зразки змащувалися індустриальним маслом. Заготовки з АД31 отримувалися з круглого прокату звичайної точності з подальшим калібруванням на потрібний розмір. Побудова кривої зміцнення свинцю здійснювалася за такою методикою: 4 зразка діаметром 28 мм і висотою 50 мм осаджували до висоти 15 мм (що відповідало ступеню деформації 70%). Через кожні 5 мм ходу проводилися виміри сили.

Для виключення контактної тертя на торці заготовки укладалися фторопластові прокладки (рис 2.6). Дані наведені в табл. 2.4.



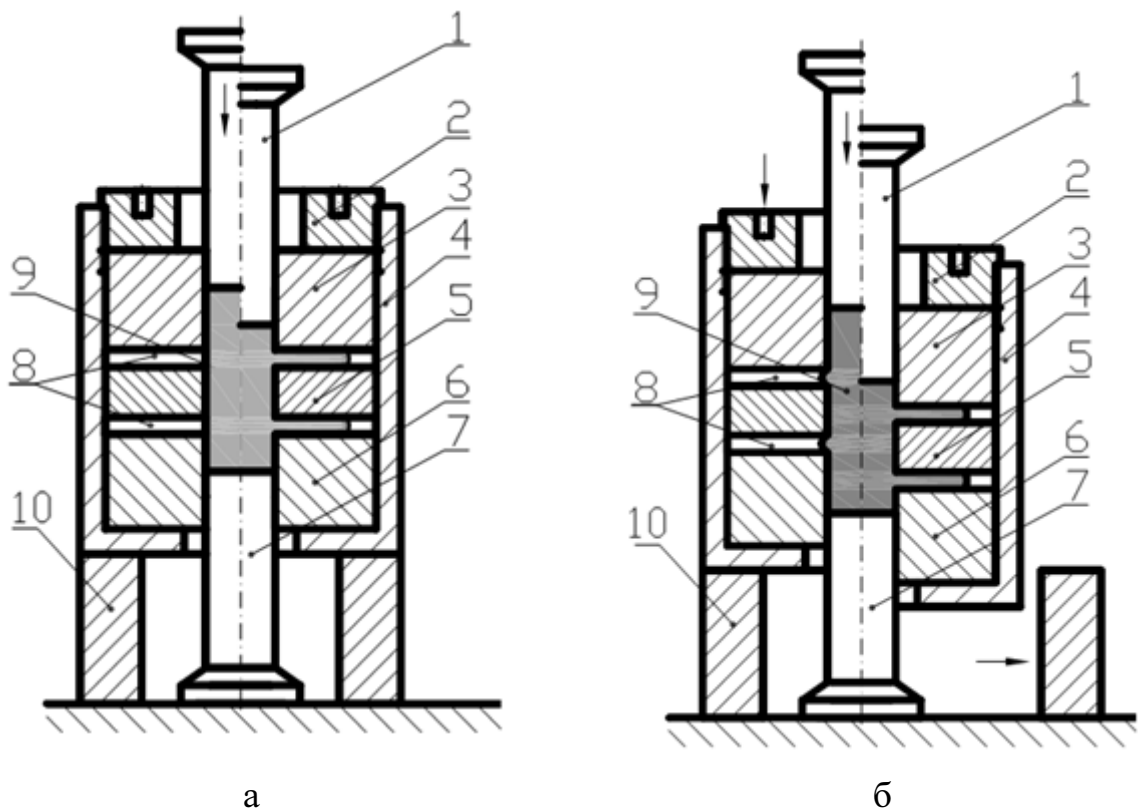
1 – фторопластові прокладки; 2 – зразок; 3 – плити

Рисунок 2.6 – Схема одноосового стиснення

Таблиця 2.4 – Результати вимірів

Хід, мм	Сила, кН			
	№ 1	№2	№3	№4
5	12	11	13	14
10	18	17	18	20
15	22	21	20	22
20	25	24	23	27
25	30	28	30	33
30	38	36	41	42
35	54	52	56	56

Експериментальні дослідження видавлювання деталей з відростками, розташованими на одній і на різних висотах, проводилися по наступних схемах (рис. 2.7, 2.8). Дослідження одностороннього та двостороннього бокового видавлювання деталей з відростками на різній висоті. Заготовка укладалася в експериментальний штамп (див. рис. 2.7), під контейнер встановлювався підпір, і здійснювалася однобокова подача металу. Одностороннє бокове видавлювання деталей з відростками на різній висоті з розворотом на 180° здійснювалося за схемою (див. рис. 2.8). Заготовка укладалася в порожнину експериментального штампа, і виконувалося почергове видавлювання спочатку однієї пари відростків, потім розворот на 180° і видавлювання іншої пари відростків. Даний процес здійснюється в цьому ж штампі, тільки передбачений розворот.



1 – верхній пуансон; 2 – притискне кільце; 3 – верхня матриця; 4 – контейнер;
5 – напівкільце; 6 – нижня матриця; 7 – нижній пуансон; 8 – сегментні
вставки; 9 – заготовка; 10 – упор

Рисунок 2.7 – Схема експериментального штампа для одностороннього (а) та двостороннього (б) бокового видавлювання деталі з відростками

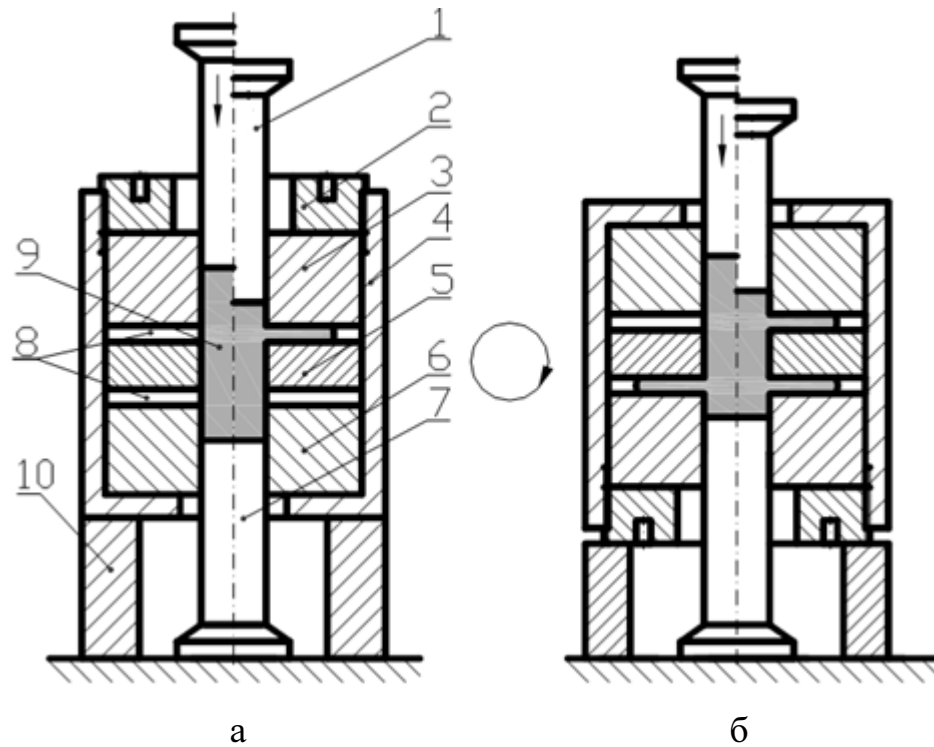


Рисунок 2.8 – Схема експериментального штампа для односторонньої (а) та з розворотом на 180° (б) бокового видавлювання деталі з відростками (позиції див. рис. 2.7)

Базовий варіант експериментального штампа для отримання деталей типу стакан зі змінною товщиною стінки дозволяє використовувати матриці з зовнішнім діаметром 110 мм. Внутрішній діаметр матриць обирається в діапазоні розмірів від 21 мм до 36 мм. Кромки матриць виконані з фасками $2 \times 45^\circ$ і з гострою кромкою. Діаметр пуансона обирається залежно від необхідної товщини стінки стакану. Робочий торець пуансонів виконаний у вигляді зрізаного конуса або плоским. Зовнішній діаметр пуансонів обирається в діапазоні розмірів від 10 мм до 30 мм. Експериментальний штамп, який встановлено на опорній плиті, представлений на рис. 2.9, складається з контейнера 1, розташованих в ньому рухомого контейнера 2, комплекту пружин 3, протипуансона 4, встановленого на месдозу 5. Рухомий контейнер 2 складається з матриці 6, розпірного кільця 7 і центрального кільця 8. Фіксація оснащення в рухомому контейнері здійснюється за допомогою гайки 9. Контейнер 2 приводиться в рух за допомогою ексцентрикової надставки, що складається з ексцентриків 10, осей 11, рами 12, яка закріплюється планками 13 і

важелями 14. Деформування заготовки 15 здійснюється пуансоном 16, який спирається на месдозу 17.

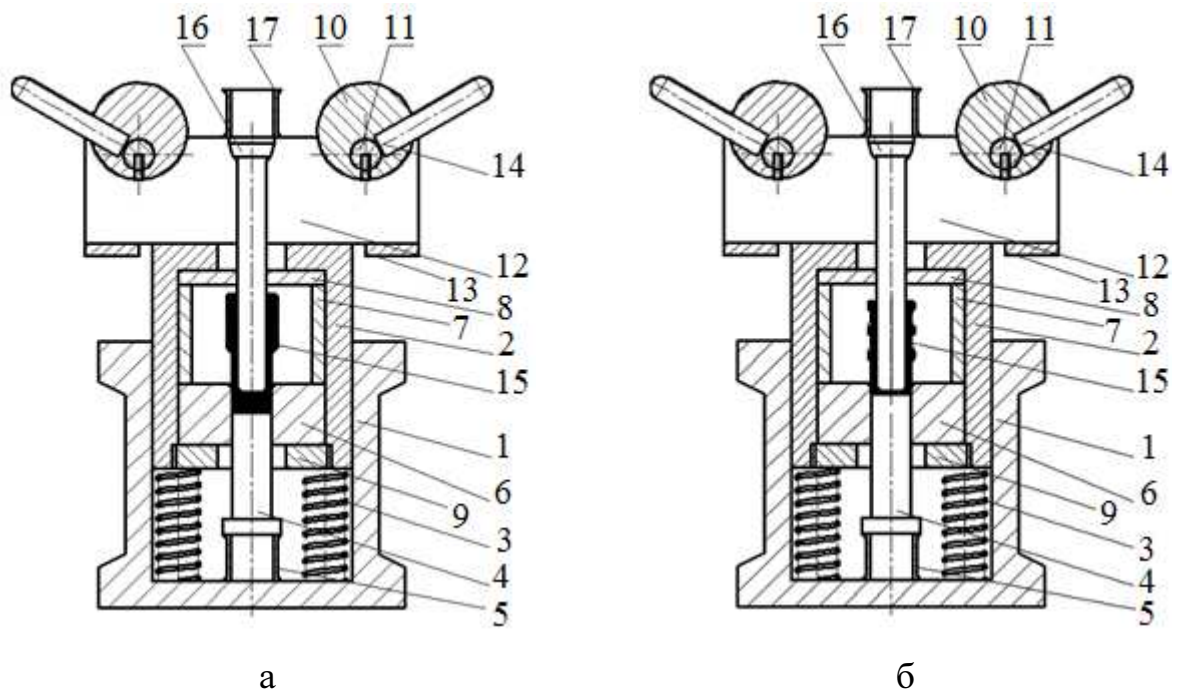
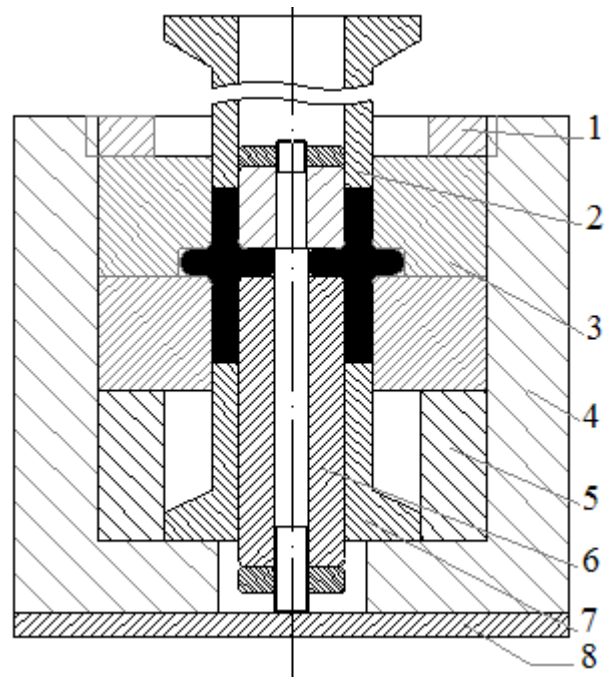


Рисунок 2.9 – Схема експериментального штампу для отримання деталей типу стакан з змінною товщиною стінки одноступінчата (а) та трьохступінчата (б)

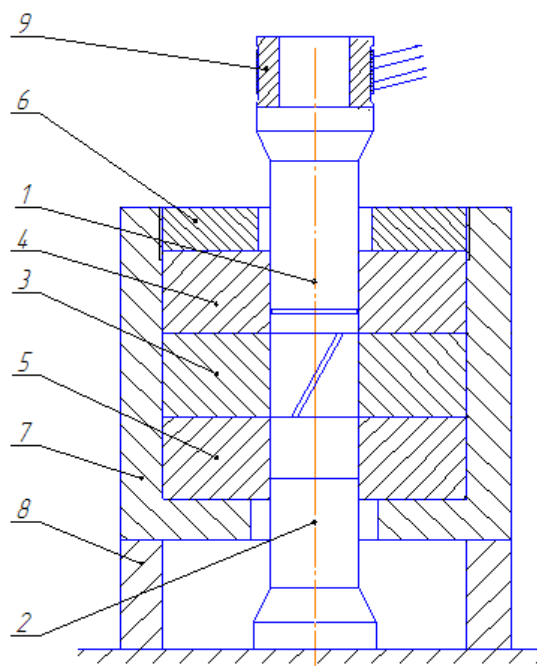
Для проведення експериментальних досліджень процесу суміщеного радіального та доцентрового видавлювання була розроблена конструкція штампового оснащення (рис.2.10). У штампі використовуються змінні матриці з зовнішнім діаметром $D_m=110$ мм. Внутрішні діаметри матриць вибиралися з ряду $D_0=45$ мм; 28 мм. Краї матриць в перехідній частині в поперечну порожнину виконувалися з радіусами заокруглень $r=5$ мм і фасками $f=1\dots 2$ мм. Застосовувалися оправлення суцільні $d=21$ мм; 15 мм і оправлення розбірне з можливістю регулювання товщини фланця h в межах $0\dots 20$ мм. Радіус заокруглення верхньої втулки оправки в робочій частині становить $r=4$ мм.

Експериментальне дослідження бокового видавлювання відростків типу «перо» проводилось в універсальному штампі, що показаний на рис. 2.11. Для забезпечення формування готової деталі розроблена зібрана матриця, що складається з декількох сегментів.

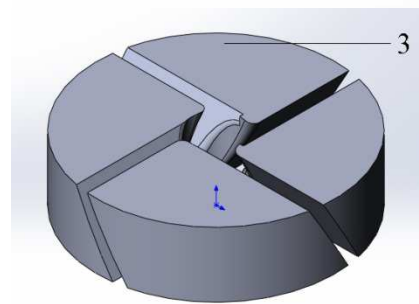
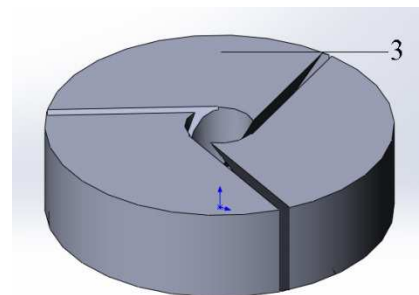


1 – кришка; 2 – пуансон; 3 – зовнішня матриця; 4 – корпус; 5 – підставка;
6 – внутрішня матриця; 7 – протипуансон; 8 – плита

Рисунок 2.10 – Схема експериментального штампу для суміщеного видавлювання



а



б

1 – пуансон; 2 – протипуансон; 3 – матриця; 4 – верхня матриця; 5 – нижня матриця; 6 – кришка; 7 – корпус; 8 – підставка; 9 – месдоза

Рисунок 2.11 – Схема експериментального штампу (а) та блок матриць (б) для бокового видавлювання відростків типу «перо»

Висновки:

1. Виконано та обґрунтовано вибір напрямку і методів дослідження процесів точного об'ємного штампування в роз'ємних матрицях для виготовлення осесиметричних та неосесиметричних виробів. Сформульовано напрямки розширення області застосування комбінованих та суміщених схем деформування на основі регулювання кінематики пластичного формозмінення. Застосування схем з регулюванням кінематики руху інструменту дозволяє розширити номенклатуру отримуваних деталей, підвищити якість та знизити собівартість холодноштампованих виробів при одночасній мінімізації питомих матеріальних та експлуатаційних витрат.

2. Для теоретичного аналізу ограновано вибір енергетичного методу балансу потужностей та його різновидність - метод верхньої оцінки, що засновані на балансі потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на кінематично можливих полях швидкостей (КМПШ), які дозволяють визначати активні і реактивні силові характеристики процесу.

3. Застосування сучасного методу скінченних елементів дозволяє провести імітаційний математичний експеримент на основі розробки математичних моделей для оцінки напружено-деформованого стану заготовки, характеру формоутворення деталі й в умовах неоднозначних пластичних течій.

4. Застосування методу скінченних елементів, з використанням математичного апарату методу планування експерименту, дозволяє проводити імітаційне моделювання і отримувати регресійні залежності силових параметрів і формозміни. Отримані результати дозволяють також провести визначення вичерпання ресурсу пластичності.

5. Для експериментального дослідження деформованого стану заготовок обраний метод ділильних сіток, що дозволяє вивчити закономірності формування характерних зон пластичної течії і розподілу ступеня деформації в заготовці. Проведення експериментальних досліджень проводилось на універсальному швидко переналагоджуваному оснащенні у умовах лабораторії.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАКРИТОЇ ОСАДКИ

3.1 Особливості процесу закритої осадки

При виконанні різних операцій точного об'ємного штампування (ТОШ) діаметральних розмірів поковок, що оформлюються однією робочою деталлю штампа, забезпечується точність сполучених розмірів 8...9 квалітетів. Вона залежить від характеристик матеріалу поковки, що деформується, робочої деталі штампа, а також умов контактного тертя.

Точність висотних розмірів, що оформлюються взаємним розташуванням рухомою і нерухомою робочих матриць штампу, на 3...5 квалітетів грубіше і визначається впливом великої кількості факторів: типом застосовуваного преса, особливостями технологічної операції, а також характером і величинами вихідних похибок.

Однак найбільш важливим фактором, що визначає той чи інший ступінь впливу всіх інших, є жорсткість штампованих поковок, що оцінюється швидкістю зростання їх опору деформації в кінцевий момент процесу штампування. Величина цього показника силового режиму залежить не тільки від характеристик матеріалу і розмірів поковки, але, перш за все, від особливостей тієї чи іншої технологічної операції.

З позиції впливу на точність висотних розмірів штампованих поковок, всі операції ТОШ діляться на дві групи: операції, в яких деформування вихідних заготовок виконується без збереження їх об'єму в робочій порожнині або між плитами штампа, і операції, в яких умова збереження об'єму виконується.

У першому випадку частина об'єму вихідної заготовки в процесі її деформування витісняється з робочої порожнини штампу у стрижень або стінку поковки, і тому похибки об'єму вихідної заготовки не впливають на висоту поковки. Жорсткість поковок при таких умовах відносно мала, іноді

на порядок менше сумарної жорсткості універсального кривошипного преса з штампом.

Для підвищення точності висотних розмірів подібних поковок застосовують спеціальні кривошипні преси для холодного видавлювання, жорсткість яких в 2..3 рази більше жорсткості універсальних кривошипних.

При виконанні операцій видавлювання домінуючий вплив на точність висотних розмірів поковок надає систематична постійна похибка налагодження, а також випадкові похибки, обумовлені розсіюванням механічних властивостей матеріалу поковок і можливою зміною умов контактного тертя в штампі.

Другу групу технологічних операцій представляють штампування в закритих штампах і осадка, різновид якого – калібрування, що відрізняється лише малим ступенем деформації поковок. У цих операціях збереження (сталість) об'єму вихідних заготовок призводить до того, що похибка їх об'єму викликає не тільки зміну висоти поковок (контрольований розмір), але і їх діаметра (компенсаційний розмір) при осадці.

При виконанні штампування в закритому штампі роль компенсаційного розміру виконують радіуси на кромках поковок в кутових елементах штампВ. Як в першому, так і в другому випадку, контрольований і компенсаційний розміри пов'язані умовою сталості об'єму.

Однак штампування в закритих штампах і осадку істотно відрізняють по величині жорсткості поковок, що обумовлено так само істотними відмінностями у відносній величині компенсаційного розміру, що визначає вільну поверхню поковок. У першому випадку – це радіус на кромках поковки, величина якого в 20...50 разів менше її діаметра або висоти. Жорсткість поковок, що штампуються в закритих штампах, може в деяких випадках на порядок перевищувати жорсткість універсальних кривошипних пресів. Компенсаційні можливості кутових елементів закритого штампа обмежені, і їх заповнення супроводжується різким зростанням деформуючих сил, тому похибка об'єму вихідних заготовок «компенсується» в основному збільшенням висоти поковок. Збільшення

жорсткості пресів для штампування в закритих штампах з метою підвищення точності висоти поковок неефективно. Тому доцільно застосування гідравлічних пресів. При практично однаковій точності висоти поковок гідравлічні преси позбавлені можливих перевантажень штампа і заклинювання, властивих кривошипним пресам.

Як уже зазначалося, осадку від штампування в закритих штампах відрізняє суттєво менша жорсткість штампованих поковок, і тому для підвищення точності висотних розмірів застосовують кривошипні преси.

Розробку системи послідовних калібрів, необхідних для отримання того чи іншого профілю, називають калібруванням. Калібрування є складним і відповідальним процесом. Неправильне калібрування може призвести не тільки до зниження продуктивності, а й до дефекту виробів. Чим більше різниця в розмірах поперечних перерізів вихідної заготовки і кінцевого виробу і чим складніше профіль останнього, тим більше число калібрів потрібне для його отримання. Розрізняють площинне і об'ємне калібрування.

Об'ємним калібруванням підвищують точність розмірів поковки в різних напрямках і покращують якість її поверхні. Калібрують в штампах з рівчачками, що відповідають конфігурації поковки.

Сутність калібрування зводиться до переміщення в отворі з натягом жорсткого інструменту. Розміри поперечного перерізу інструменту дещо більше розмірів поперечного перерізу отвору. При цьому інструмент усуває нерівності, похибки геометрії, зміцнює поверхню.

Практично процесу закритої осадки передуює відкрита або вільна осадка до моменту зіткнення металу з бічними стінками порожнини штампу.

Різний характер перебігу металу на торцях рухомого пуансона і нерухомої матриці, а також контактне тертя на бічній поверхні є причинами нерівномірності деформації, що викликає таку стадію, при якій залишаються незаповненими нижні кути (пасивні кути), тоді як верхні кути (активні кути) повністю оформлені. Це положення неодноразово підтверджено експериментами і виробничими дослідженнями штампування.

Дещо різними за характером формозміни є два різновиди закритої осадки:

а) осадка при вільному положенні торців;

б) осадка в умовах, коли кінець заготовки (або кінці) затиснутий в матриці, як наприклад, при штампуванні на горизонтальній кувальній машині, або коли заготовка кінцем зафіксована на ділянці рівчака діаметром в результаті застосування вихідного прутка такого ж розміру або наявності стадії відкритого видавлювання .

У першому випадку діаметри торців можуть збільшуватися по мірі осадки заготовки і кожному моменту часу буде відповідати певний утворений на периферії заповнюваного кута осередок деформування. У другому випадку протяжність осередку деформації в значній мірі обумовлена співвідношенням розмірів елементів поковки.

Встановлено, що найбільша точність розмірів і форми видавлених деталей, досягається застосуванням процесів закритого штампування. Недоліком цього процесу є значне зростання сили деформування і розкриття на заключній стадії заповнення рівчака матриці.

3.2 Моделювання напружено-деформованого стану заготовки і кінематика течії металу в процесі закритої осадки

Для дослідження напружено–деформованого стану та силового режиму заготовки (теоретичного аналізу) виконане математичне моделювання процесів закритої осадки за допомогою методу скінченних елементів, що реалізований у програмі QForm 2D/3D.

Для моделювання процесу закритої осадки обрано такі параметри: крива істинних напружень для матеріалу АМцМ описується рівнянням $\sigma_s(\varepsilon) = 188,4 \varepsilon^{0,15}$, межа текучості $\sigma_{0,2} = 105$ МПа, модуль Юнга $E = 75000$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$ і коефіцієнт тертя між матеріалом заготовки і інструментом $\mu = 0,05 \dots 0,3$ (закон Зібеля).

Метою дослідження є аналіз напружено–деформованого стану на основі поетапного дослідження напружень та деформацій за перерізом напівфабрикату (рис. 3.1). Досліджувався вплив різних співвідношень висоти заготовки до її діаметру на напружено–деформування стан.

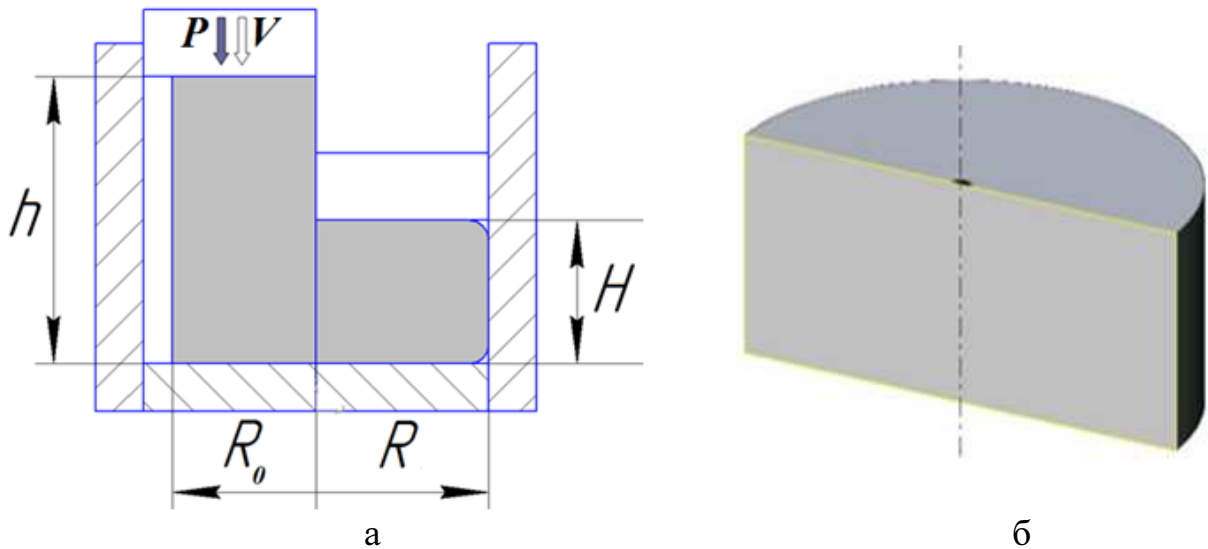


Рисунок 3.1 – Схема процесу закритої осадки заготовки (а) та одержуваний напівфабрикат (б)

Для моделювання процесу закритої осадки обрано такі співвідношення параметрів, які представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні та кінцеві дані для моделювання процесу закритої осадки

Вихідні дані	Кінцеві дані
$h/d=0,6$	$H/D=0,35$
$h/d=1,0$	$H/D=0,575$
$h/d=1,4$	$H/D=0,8$
$2R_0 = d = 30 \text{ мм}$	$2R = D = 36 \text{ мм}$

Результати моделювання процесу при різних геометричних параметрах та відносному ході процесу представлені на рис. 3.2, В1 та В2 (Додаток В).

На початкових стадіях вільної осадки спостерігається класичне бочкоутворення, що призводить до появи пасивних (незаповнених) кутів матриці.

Осередок деформації за перерізом заготовки має хрестоподібну форму, утворюючи застійні зони на межі контакту заготовки з інструментом. Збільшення висоти заготовки призводить до зменшення пропрацювання центральної частини заготовки.

Значення максимальної інтенсивності деформацій і напружень були отримані на кінцевих стадіях деформування в момент зіткнення металу з вертикальною стінкою матриці.

У цей момент спостерігаються наступні значення параметрів: відносної висоти заготовки $h/d = 0,6$ і $S/R_0 = 0,35$ при $\varepsilon_i = 0,5$, $\sigma_i = 170$ МПа (див. рис. 3.2), $h/d = 1,0$ і $S/R_0 = 0,575$ при $\varepsilon_i = 0,55$, $\sigma_i = 170$ МПа (див. рис. В.1), $h/d = 1,4$ і $S/R_0 = 0,8$ при $\varepsilon_i = 0,45$, $\sigma_i = 165$ МПа (див. рис. В.2).

Для моделювання силового режиму в процесі закритої осадки необхідно дослідити незаповнення кругової порожнини кутів матриці при певних відносних розмірах заготовки.

Це дозволить прогнозувати кінцеву форму і розміри готової деталі та дозволить запропонувати заходи щодо поліпшення течії металу в кути матриці.

На основі отриманих скінчено-елементних моделей побудовано графіки залежності сили деформування від відносного ходу процесу (рис. 3.3, В.3 та В.4) для певних значень $h/d = 0,6; 1,0; 1,4$ при різних коефіцієнтах тертя $\mu = 0,05; 0,15; 0,3$.

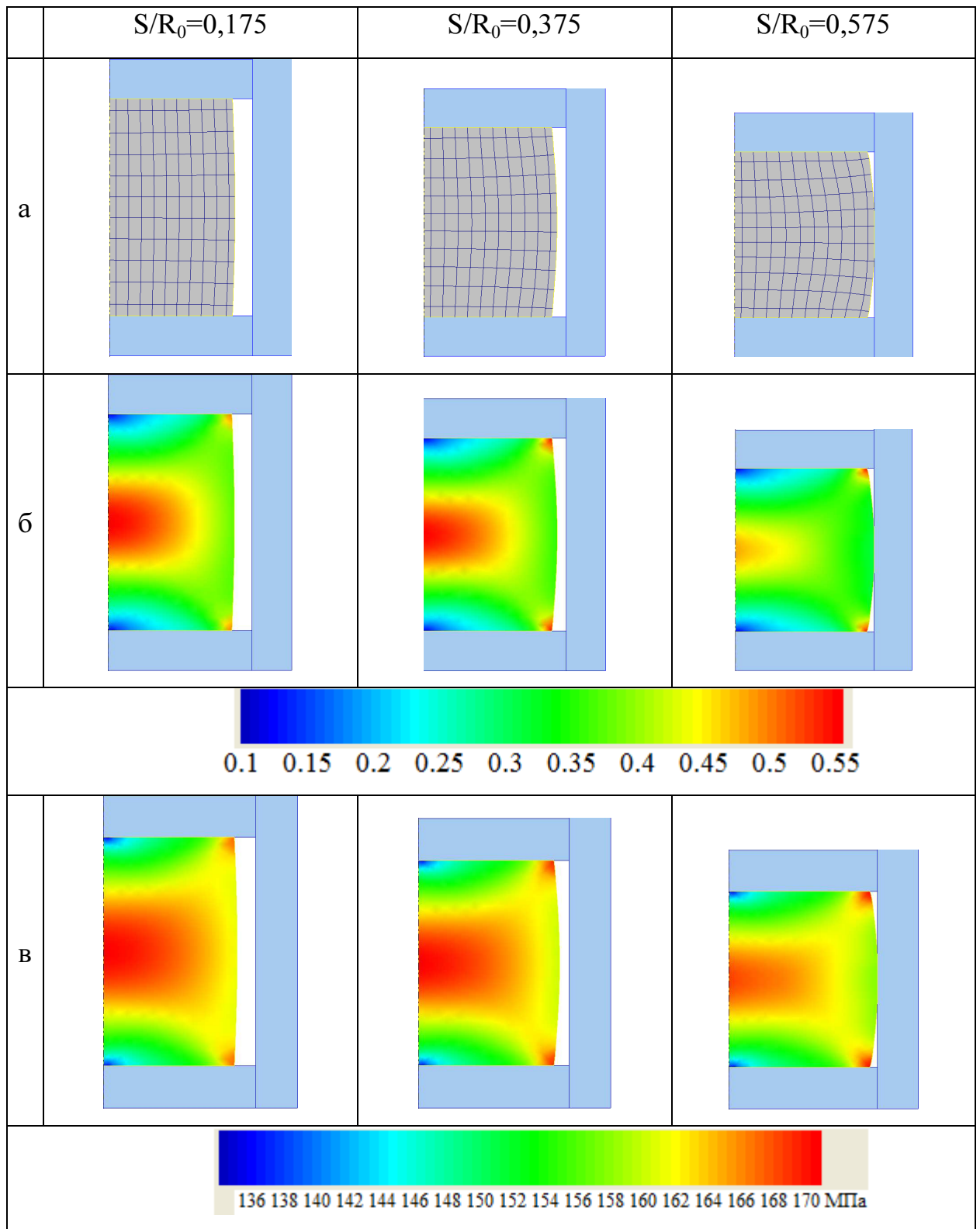


Рисунок 3.2 – Викривлення ділільної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій E_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування в процесі закритої осадки при $h/d = 1,0$

Наприклад, при коефіцієнті тертя $\mu=0,05$ (див. рис. А.3) до значення $S/R_0=0,27$ ($h/d=0,6$; $P=150$ кН), ($h/d=1,0$; $P=125$ кН) та ($h/d=1,4$; $P=110$ кН) сила плавно зростає і різко збільшується до $P=500$ кН (при $h/d=0,6$ і $S/R_0=0,38$), $P=525$ кН (при $h/d=1,0$ і $S/R_0=0,62$), $P=550$ кН (при $h/d=1,4$ і $S/R_0=0,87$).

Для $\mu=0,15$ (див. рис. 3.3) до значення певного відносного ходу процесу $S/R_0=0,25$ (крива 1) $P=150$ кН; $S/R_0=0,52$ (крива 2) $P=160$ кН; $S/R_0=0,68$ (крива 3) $P=170$ кН сила плавно зростає, потім різко збільшується до $P=980$ кН (крива 1, $S/R_0=0,38$), $P=990$ кН (крива 2, $S/R_0=0,62$), $P=1000$ кН (крива 3, $S/R_0=0,88$).

Для $\mu=0,3$ (див. рис. В.4) після позначки відносного ходу $S/R_0=0,3$ ($h/d=0,6$) $P=180$ кН; $S/R_0=0,55$ ($h/d=1,0$) $P=190$ кН; $S/R_0=0,76$ ($h/d=1,4$) $P=250$ кН сила різко збільшується до значень $P=1100$ кН (при $h/d=0,6$ $S/R_0=0,38$), $P=1150$ кН (при $h/d=1,0$ $S/R_0=0,62$), $P=1200$ кН (при $h/d=1,4$ $S/R_0=0,88$).

Поступове зростання сили по ходу процесу деформування пояснюється тим, що на даному етапі відбувається процес вільної осадки (див. рис. 3.3, В.3 та В.4).

В момент дотику заготовки до стінок матриці спостерігається різке зростання енергосилових характеристик, які стрімко збільшуються до кінця процесу осадки. Це пов'язане зі зміною напружено-деформованого стану заготовки та жорсткості системи.

Така зміна сили спостерігається для будь-якого значення коефіцієнта тертя. Крім того, збільшення коефіцієнта тертя від 0,05 до 0,3 призводить до зростання сили.

Було досліджено вплив коефіцієнта тертя $\mu=0,05$; 0,15; 0,3 на характер зміни сили осадки по ходу деформування при різних значеннях $h/d=0,6$ (рис. В.5), $h/d=1,0$ (рис. 3.4) та $h/d=1,4$ (рис. В.6).

На цих графіках видно, що сила при закритій осадці зростає монотонно, що пов'язане з мінімальною контактною поверхнею тертя між

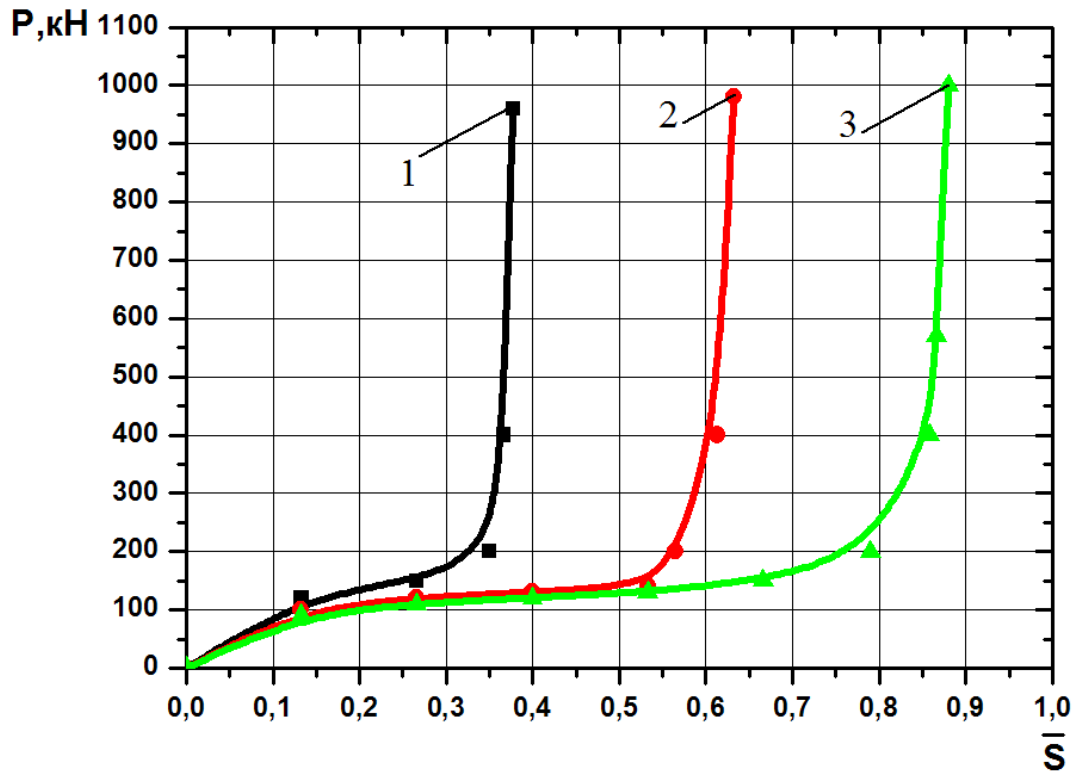


Рисунок 3.3 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $\mu = 0,15$ де 1 – $h/d = 0,6$; 2 – $h/d = 1,0$; 3 – $h/d = 1,4$

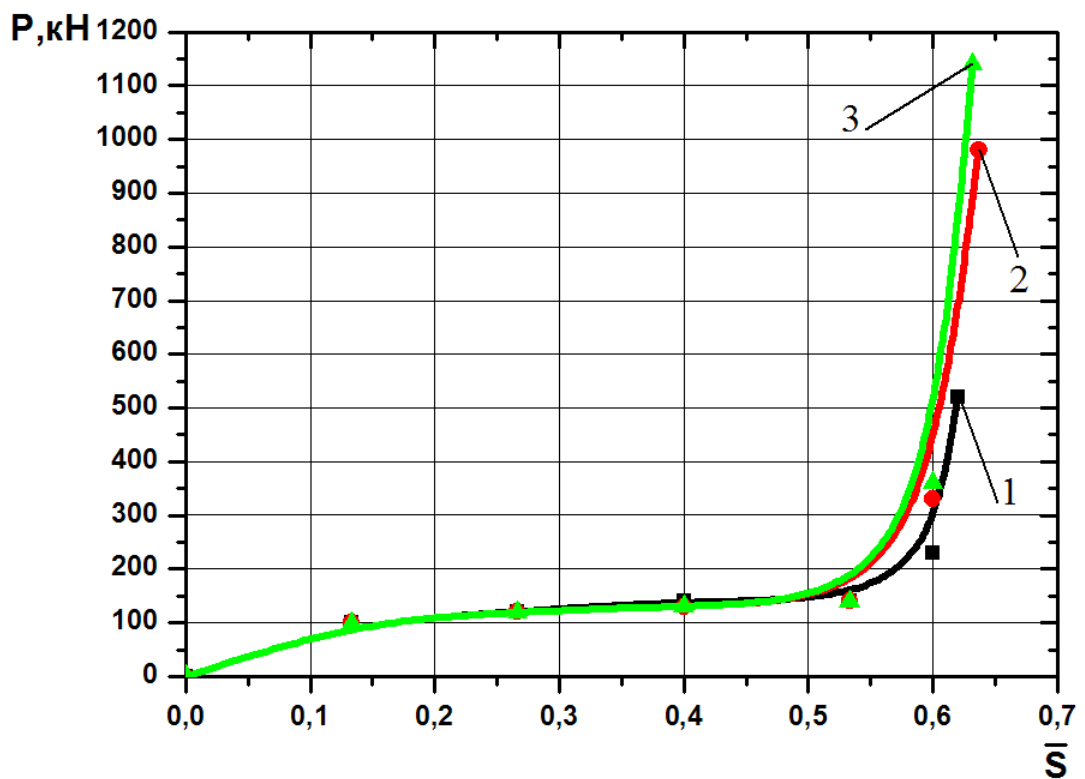


Рисунок 3.4 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $h/d = 1,0$ де 1 – $\mu = 0,05$; 2 – $\mu = 0,15$; 3 – $\mu = 0,3$

При відносному ході (див. рис. В.5) $S/R_0=0,35$ сила при $\mu=0,05$ досягає значення $P=320$ кН, при $\mu=0,15$ – $P=450$ кН, при $\mu=0,3$ – $P=590$ кН.

Досягаючи значень $h/d=0,6$: при $\mu=0,05$ максимальне значення сили при закритій осадці дорівнює $P=500$ кН, при $\mu=0,15$ – $P=960$ кН, а при $\mu=0,3$ – $P=1100$ кН.

При відносному ході $S/R_0=0,6$ (див. рис. 3.4) сила при $\mu=0,05$ дорівнює $P=300$ кН, при $\mu=0,15$ – $P=450$ кН, при $\mu=0,3$ – $P=500$ кН. Для $h/d=1,0$ при $\mu=0,05$ максимальна сила досягає значення $P=520$ кН, при $\mu=0,15$ сила досягає $P=990$ кН, а при $\mu=0,3$ – $P=1150$ кН.

При відносному ході (див. рис. В.6) $S/R_0=0,8$ сила при $\mu=0,05$ досягає значення $P=220$ кН, при $\mu=0,15$ – $P=300$ кН, а при $\mu=0,3$ – $P=350$ кН.

Для $h/d=1,4$ при $\mu=0,05$ сила при осадці досягає значення $P=550$ кН, при $\mu=0,15$ сила досягає $P=1000$ кН, а при $\mu=0,3$ сила $P=1200$ кН.

Це можна пояснити тим, що при збільшенні тертя збільшується опір заготовки по відношенню до інструменту. На етапі вільної осадки значення контактного тертя практично не впливає на характер зміни сили. Це відображається співпадінням кривих. Таким чином, можна зробити висновок, що тертя є одним з керуючих факторів, що дозволить поліпшити заповнюваність пасивних кутів кругової порожнини матриці.

На рис. 3.5 рис. В.7 та рис. В.8 приведено залежність заповнення верхнього (a_1) і нижнього (a_2) кутів біля плит від відносного ходу процесу для певних значень $h/d=0,6$; $1,0$; $1,4$ для заготовки при коефіцієнті тертя $\mu=0,08$. З графіків видно, що при відносних ходах $S/R_0= 0,38$; $0,62$; $0,87$ кут біля верхньої плити заповнюється помітно швидше, ніж у нижній. Це можна пояснити тим, що верхній кут знаходиться біля рухомого інструменту, що сприяє зниженню опору течії металу в заданому напрямку.

Було досліджено залежність заповнення верхнього (b_1) і нижнього (b_2) кутів під стінками матриці від відносного ходу процесу для значень $h/d=0,6$; $1,0$; $1,4$ при терті $\mu=0,08$. На графіках (рис. 3.6, В.9 та В.10)

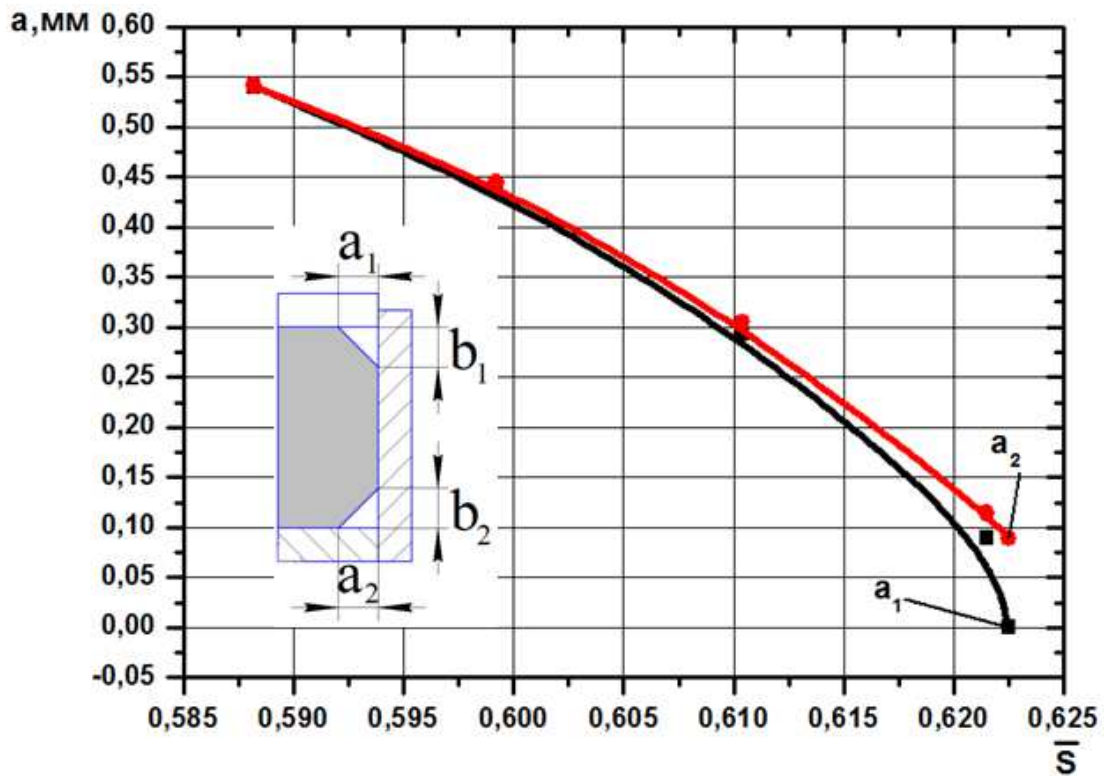


Рисунок 3.5 – Графік залежності заповнення кута біля плит від відносного ходу процесу закритої осадки при: $h/d=1,0$; $\mu=0,08$

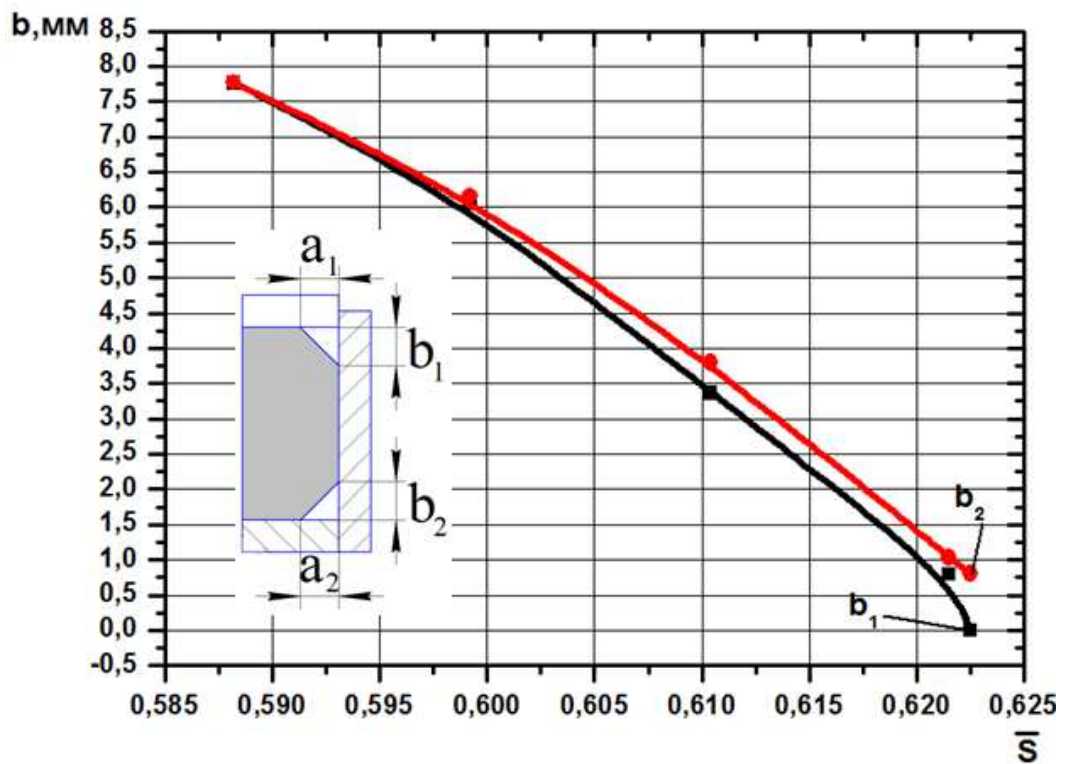


Рисунок 3.6 – Графік залежності заповнення кута біля стінки матриці від відносного ходу процесу закритої осадки при: $h/d= 1,0$; $\mu=0,08$

видно, що при відносних ходах $S/R_0 = 0,38; 0,62; 0,87$ кут у верхній частині матриці заповнюється швидше, ніж у нижній, що пояснюється відсутністю застійної зони за рахунок рухомого інструменту.

Досліджено залежність заповнення верхнього (a_1) і нижнього (a_2) кутів біля плит в залежності від сили осадки для певних значень $h/d = 0,6; 1,0; 1,4$ при терті $\mu = 0,08$.

На рис. 3.7, В.11 та В.12 видно, що чим вище заготовка, тим менша сила по закінченню осадки. Виходячи з цього видно, що при повній осадці сила для $h/d = 0,6$ $P = 680$ кН, для $h/d = 1,0$ $P = 650$ кН, і для $h/d = 1,4$ $P = 560$ кН.

На рис. 3.8, В.13 та В.14 наведено залежність заповнення верхнього (b_1) і нижнього (b_2) кутів під стінами матриці від сили осадки для певних значень $h/d = 0,6; 1,0; 1,4$ при $\mu = 0,08$.

Як видно (див. рис. 3.8, В.13 та В.14), для повної осадки необхідна сила для $h/d = 0,6$ $P = 680$ кН, для $h/d = 1,0$ $P = 650$ кН, і для $h/d = 1,4$ $P = 560$ кН. Із цього випливає, що чим вище заготовка, тим менша сила, що пов'язане зі зменшення ступеня деформування.

Для визначення напружено-деформованого стану в заготовці в процесі закритої осадки проведене скінчено-елементне моделювання в програмі QForm 2D (рис. 3.9).

Також представлені результати дослідження, що відображають зміни сили при осадці в залежності від відносного ходу процесу. Процес закритої осадки складається з трьох основних стадій. Перша стадія I, в якій відбувається початкове стиснення і розпресування заготовки; друга стадія II - відбувається поступове збільшення навантаження і заповнення порожнини матриці. Від I та II стадії степінь деформування може збільшитися до 30 %. На третій стадії III навантаження різко зростає на невеликому ході процесу, відбувається заповнення кутів порожнини матриці.

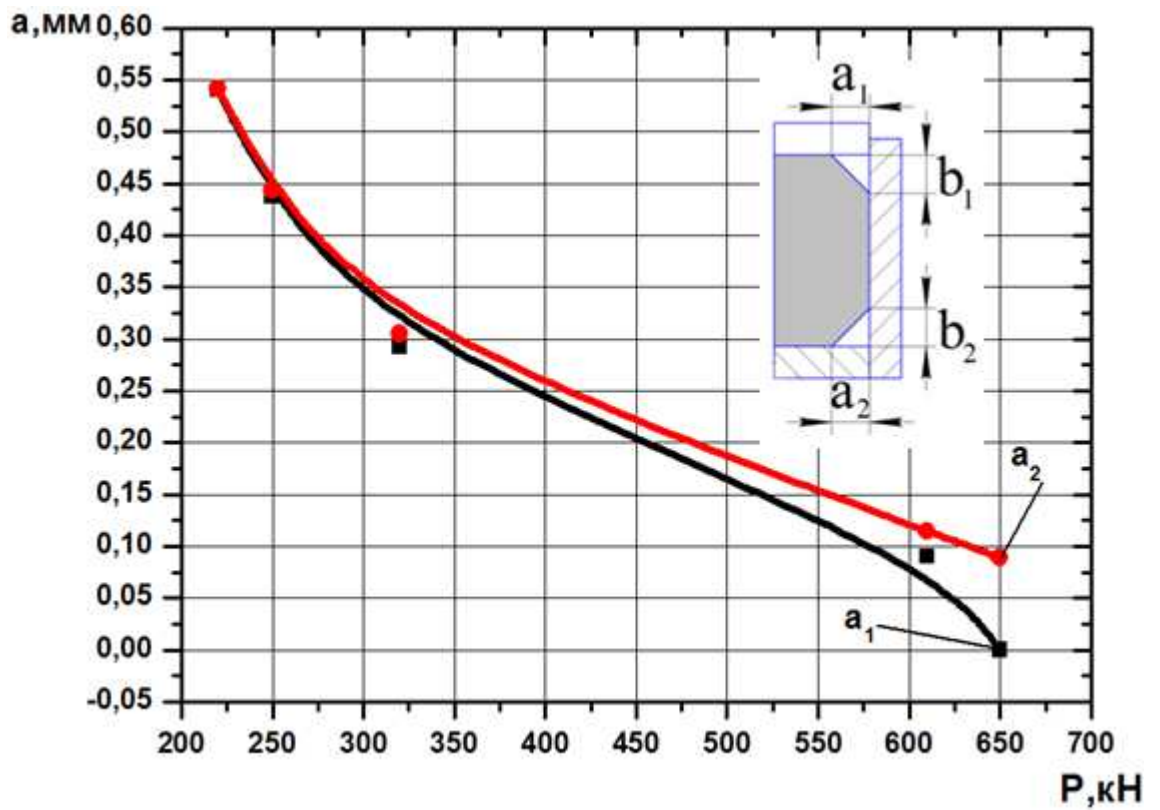


Рисунок 3.7 – Графік залежності заповнення кута біля плит від сили процесу закритої осадки при: $h/d=1,0$; $\mu=0,08$

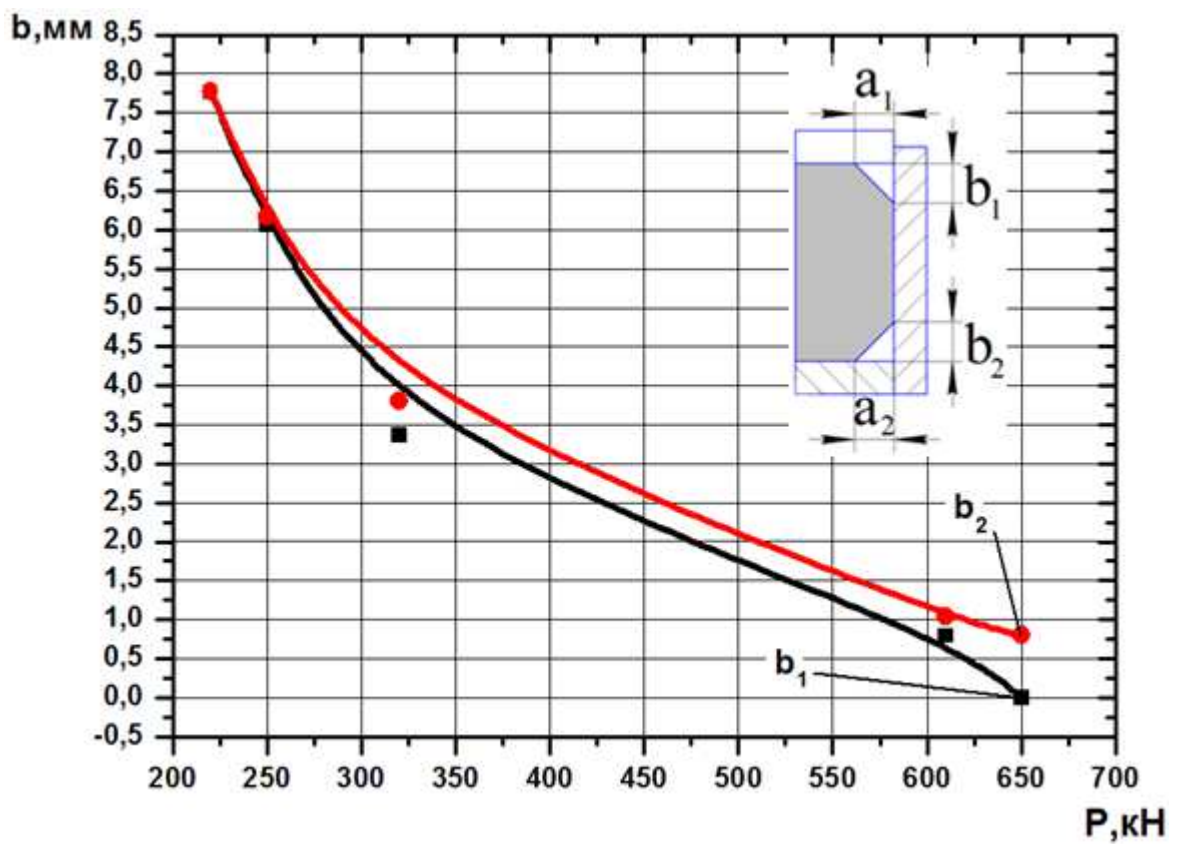


Рисунок 3.8 – Графік залежності заповнення кута під стінами матриці від сили процесу закритої осадки при: $h/d=1,0$; $\mu=0,08$

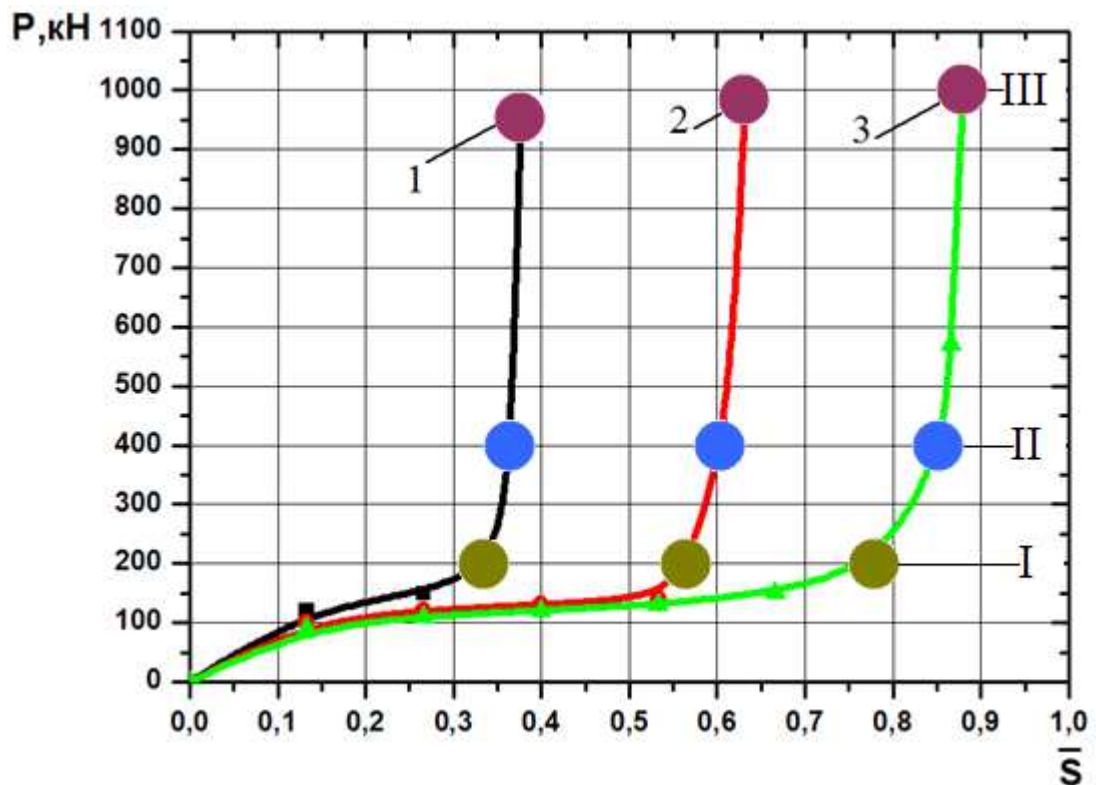


Рисунок 3.9 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $h/d=0,6$ (1), $h/d=1,0$ (2), $h/d=1,4$ (3) та $\mu=0,3$

На рис. 3.10 представлено спотворення ділильної сітки при закритій осадці заготовки з $h/d=0,6$ (а), $h/d=1,0$ (б), $h/d=1,4$ (в) та $\mu=0,3$. Помітно, що для більш низьких заготовок невеликі деформації мають місце і в центральній частині заготовок. Отримані результати спотворення ділильної сітки показані для двох досліджуваних етапів деформування: 1 – сила відповідає значенню $P=200$ кН; 2 – $P=400$ кН. В обраному діапазоні дослідження для всіх випадків спостерігається незаповнення кута матриці.

Аналіз інтенсивності деформацій (рис. 3.11) та інтенсивності напружень (рис. 3.12) для досліджуваних етапів деформування показав, що заповнення кутів, які утворюються матрицею та плитами, є більш рівномірним з двох сторін при силі 200 кН (стовбець 1). Однак при силі в 400 кН (стовбець 2) матеріал заготовки помітно повільніше переміщується по стінці матриці у верхній частині, що в свою чергу обумовлено допомогою течії металу по плиті активними силами тертя, тим самим уповільнюється рух по стінках матриці.

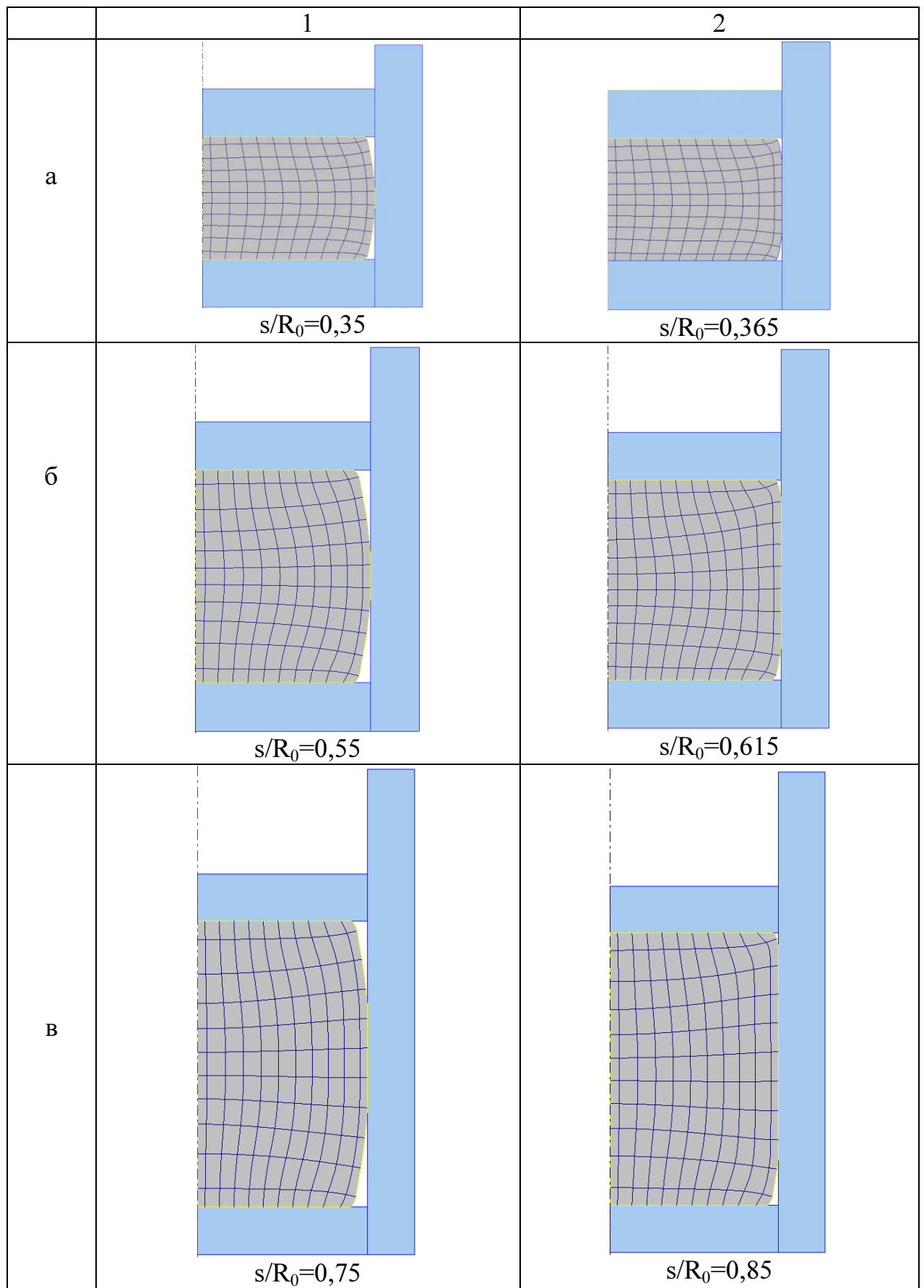


Рисунок 3.10 – Викривлення ділильної сітки при процесу закритої осадки з $h/d=0,6$ (а), $h/d=1,0$ (б), $h/d=1,4$ (в) і $\mu=0,3$

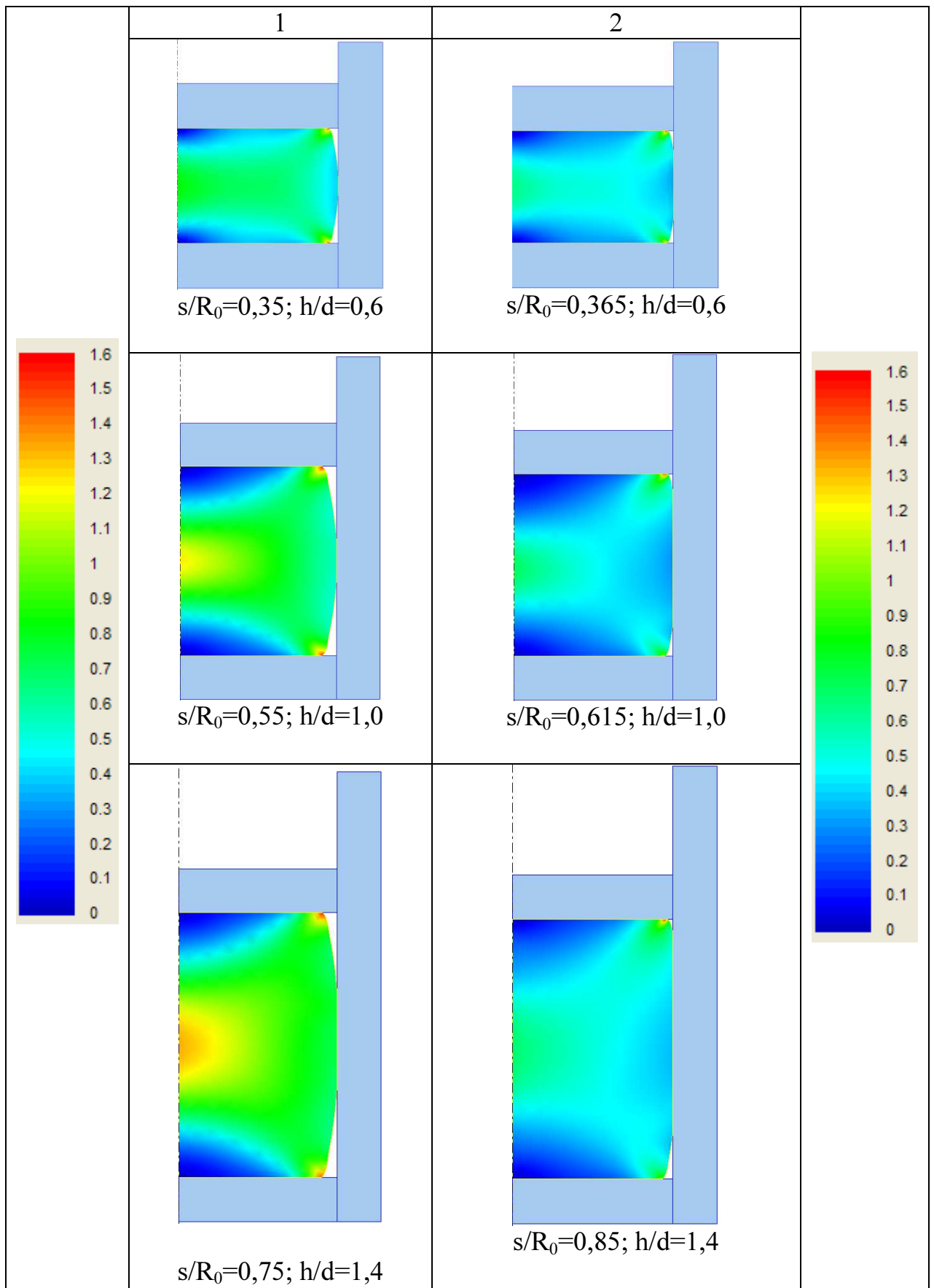


Рисунок 3.11 – Розподіл інтенсивності деформацій при процесу закритої осадки з різними значеннями h/d і s/R_0 при $\mu=0,3$

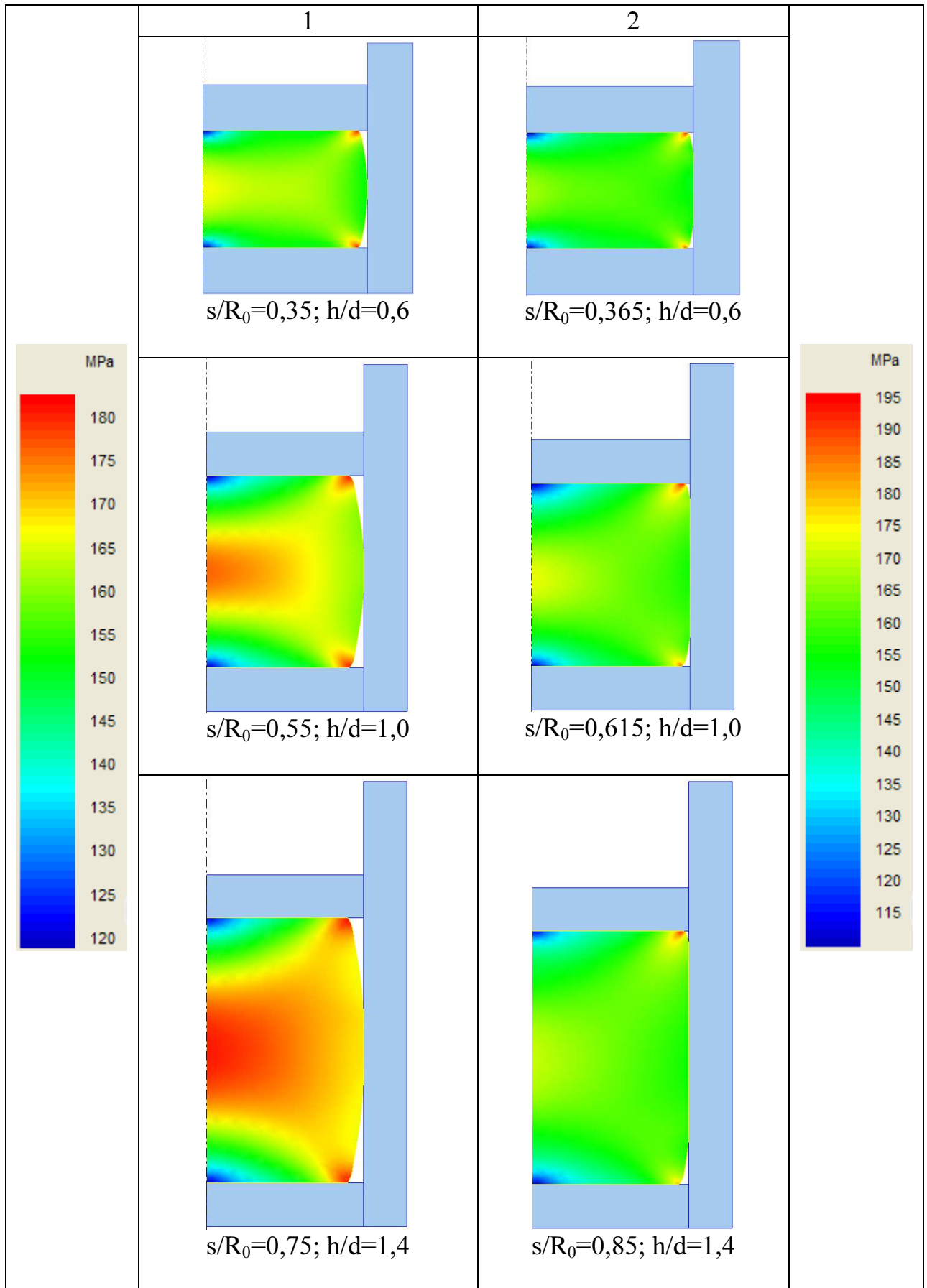


Рисунок 3.12 – Розподіл інтенсивності напружень при процесу закритої осадки з різними значеннями h/d і s/R_0 , $\mu=0,3$

Спираючись на результати розподілу інтенсивності деформацій (див. рис. 3.11) визначено, що максимальні значення деформацій зосереджені в центральній частині заготовки та на верхній і нижній частині периферії заготовки. Через те, що пасивні кути між поверхнею матриці та плитою, заповнюються останніми, що в даній частині заготовки отримує найбільші значення логарифмічних деформацій, які досягають значень 1,6. При збільшенні відносних розмірів s/R_0 та h/d протяжність застійної зони під плитами збільшується, що погіршує переміщення матеріалу в кути матриці.

Характер розподілу інтенсивності напружень σ_i (див. рис. 3.12) співпадає з розподілом деформацій. Максимальні значення $\sigma_i=195$ МПа досягаються в кінці процесу осадки. Для схеми з силою y 200 кН спостерігається більш нерівномірний розподіл значень σ_i .

В якості можливості прогнозування заповнення порожнин під стінками матриці і біля верхньої та нижньої плит від відносного заповнення кута кругової порожнини побудовані графічні залежності (рис. 3.13, 3.14). Отриманий розподіл значень наглядно показує, що спостерігається майже рівномірне заповнення як верхніх, так і нижніх кутів.

3.3 Регулювання кінематики руху інструменту при закритій осадці

Одним зі способом усунення незаповнення кутів є застосування кінематики руху інструменту (рис. 3.15, В.15 та В.16). Як було зазначено вище, при стандартній осадці з односторонньою подачею (див. рис. 3.15) спостерігається незаповнення верхнього кута В. При двосторонній подачі незаповнення спостерігається симетрично з двох сторін (див. рис. В.15 та В.16). Так як заповнення верхнього кута є найбільш складним процесом, передбачення компенсатора в нижній частині схеми є досить ефективним (рис. 3.16).

Встановлення певних розмірів компенсаторів дозволяють досягти заповнення кута біля верхньої плити при стандартній схемі деформування

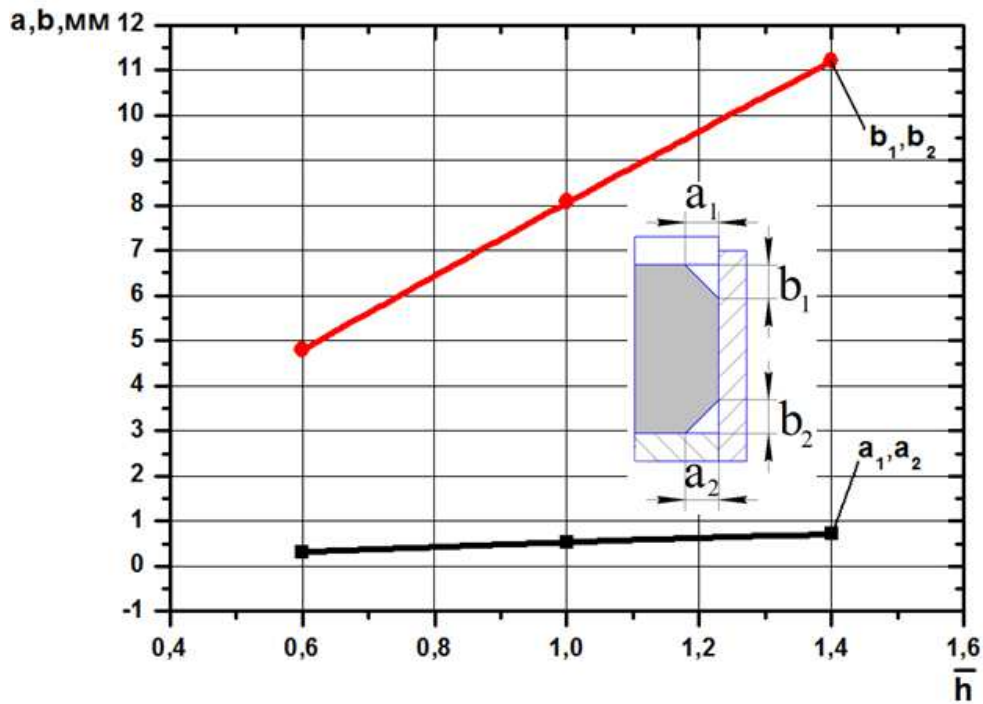


Рисунок 3.13 – Графік залежності розмірів порожнин під стінками матриці і біля верхньої та нижньої плит від відносної висоти заготовки при 200 кН і $\mu=0,3$

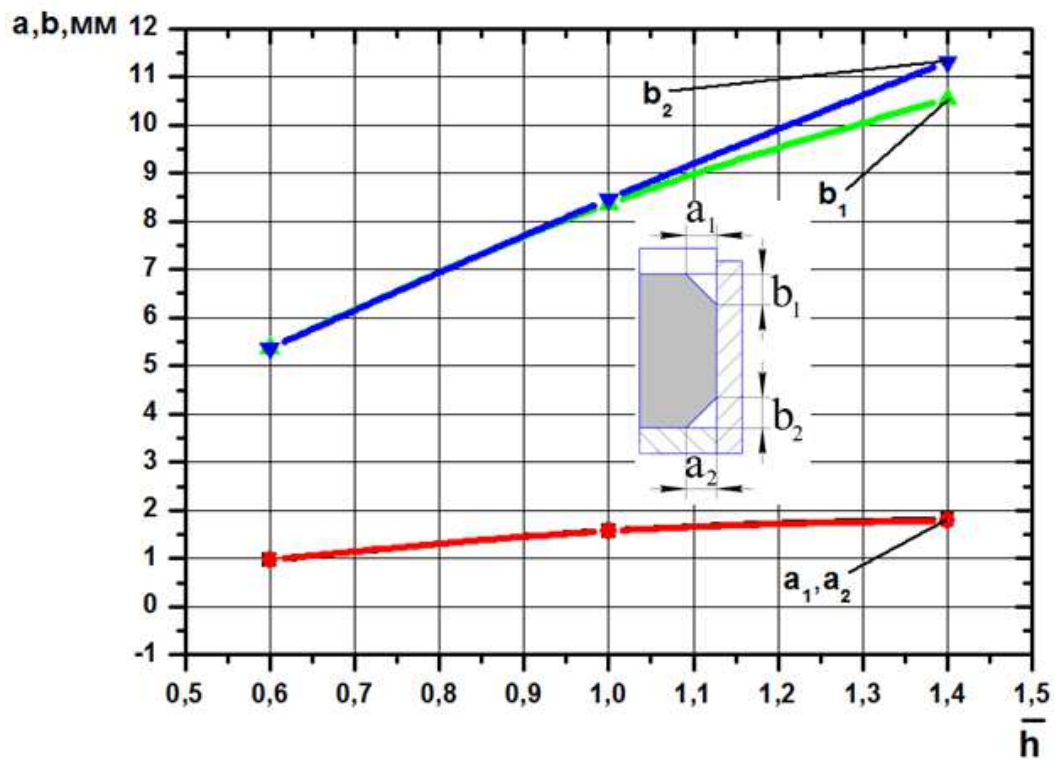


Рисунок 3.14 – Графік залежності розмірів порожнин під стінками матриці і біля верхньої та нижньої плит від відносної висоти заготовки при 400 кН і $\mu=0,3$

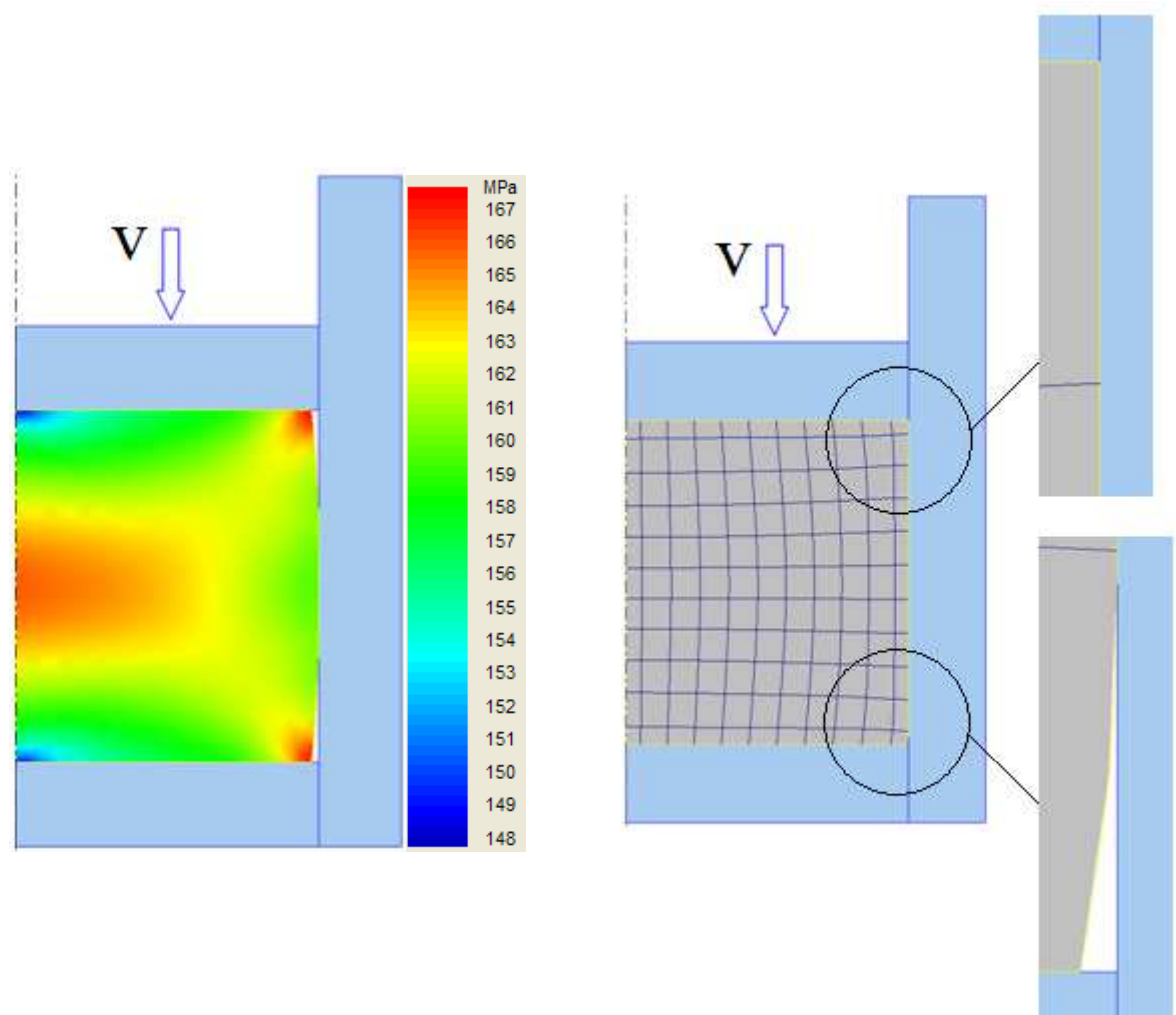
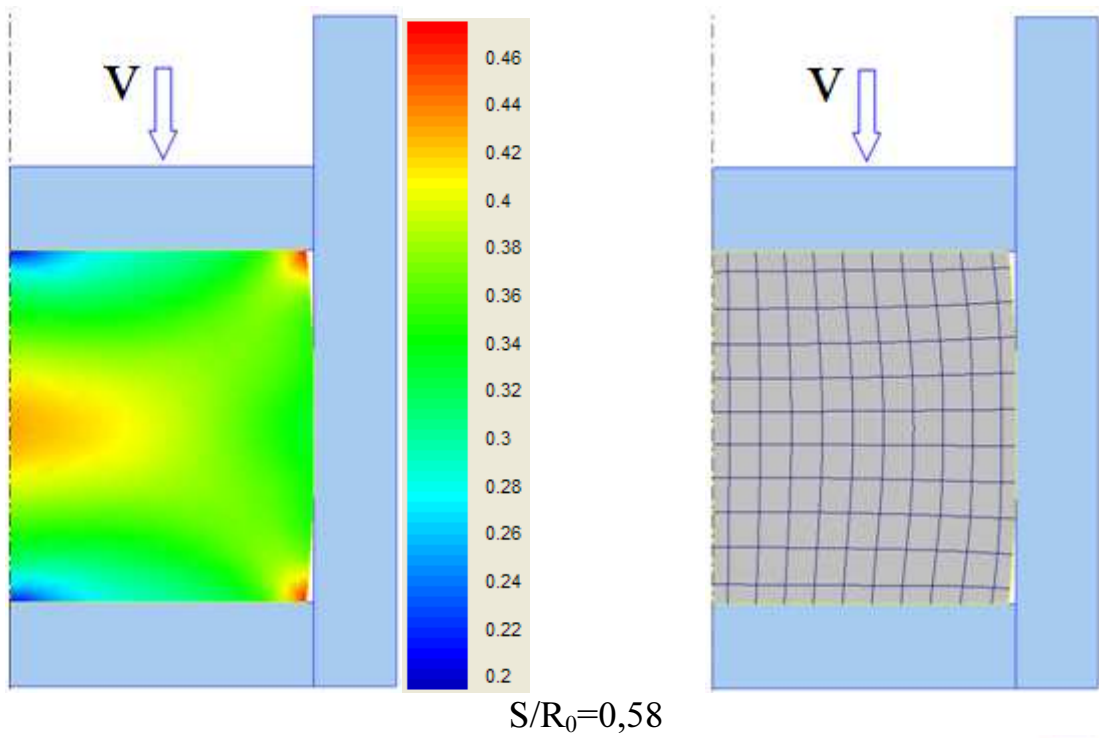


Рисунок 3.15 – Незаповнення кутів при процесі закритої осадки з односторонньою подачею: $R_0=15$ мм, $L=30$ мм, $R_1=18$ мм

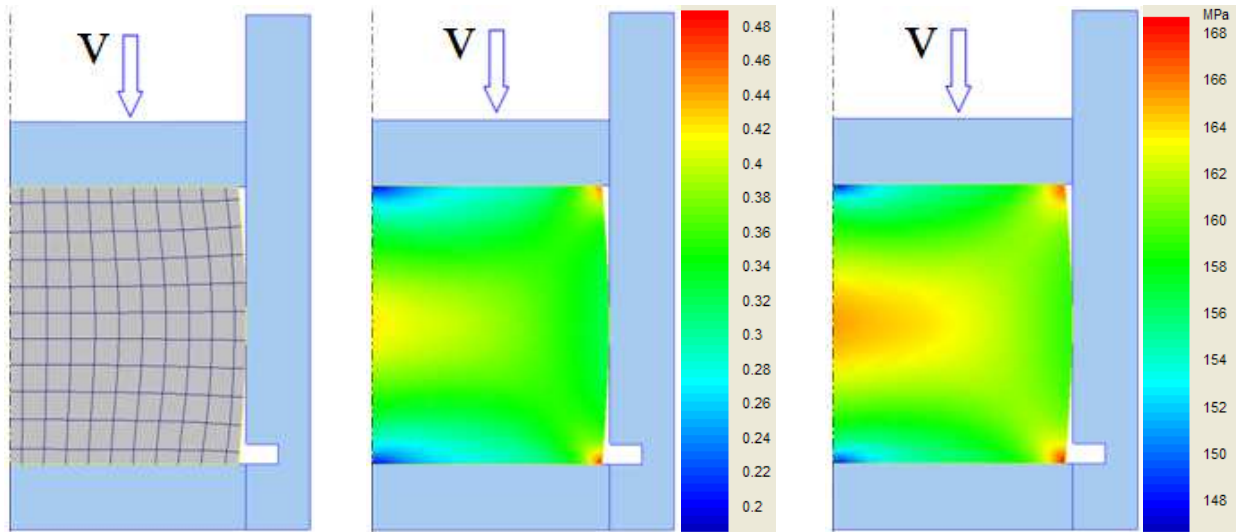
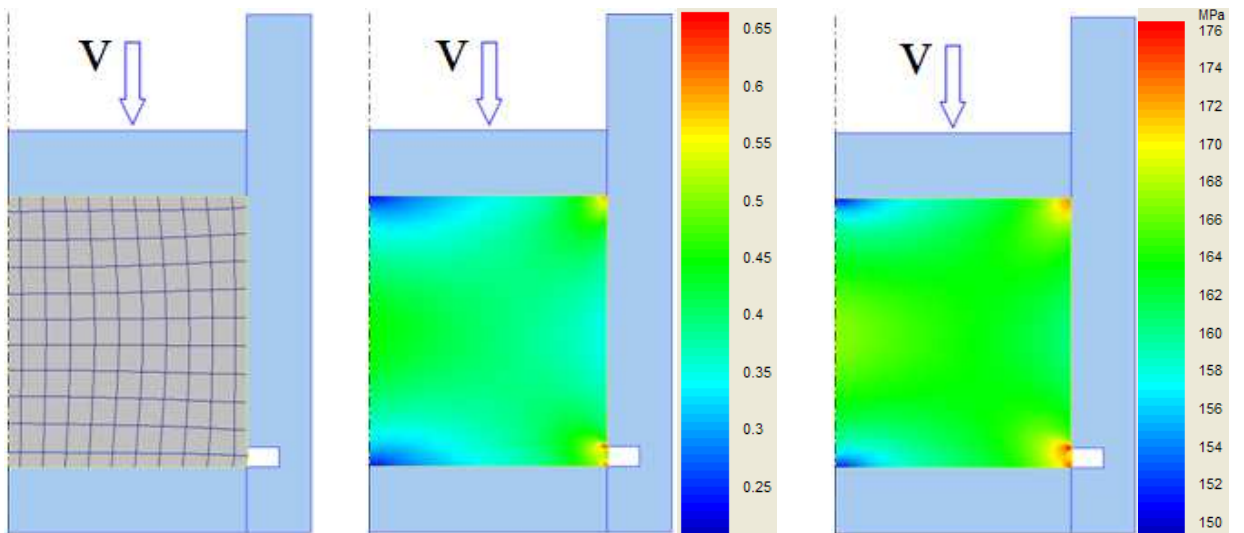
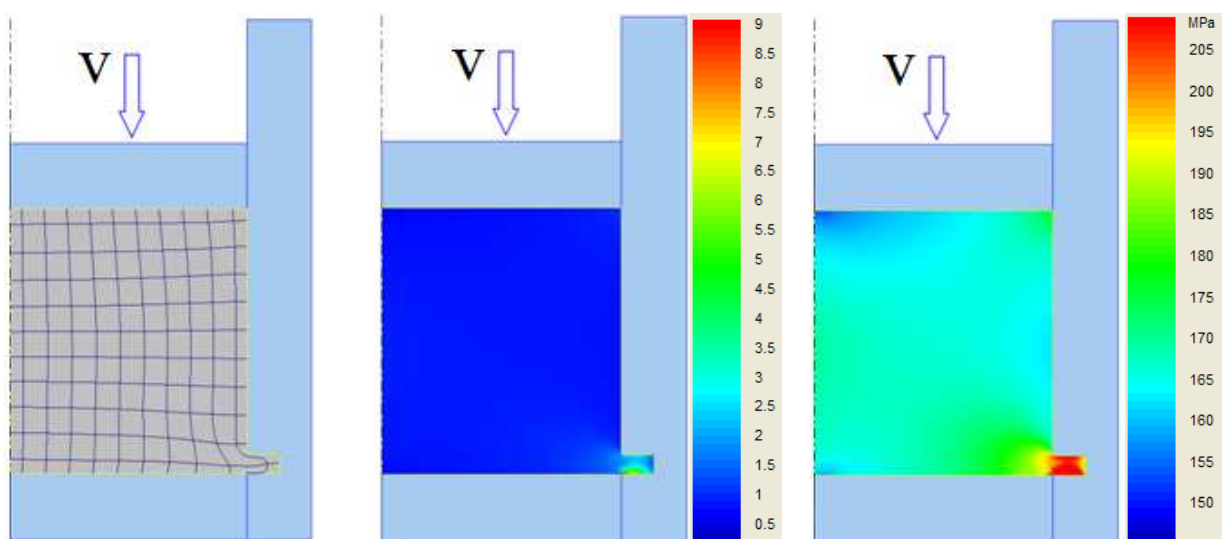

 $S/R_0 = 0.58$

 $S/R_0 = 0.62$

 $S/R_0 = 0.66$

Рисунок 3.16 – Викривлення діляльної сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень при процесу закритої осадки з компенсатором

(рис. 3.17). Проведені дослідження показують, що оптимальним значенням компенсатора для обраних геометричних параметрів схеми є $h_1=1,5$ мм. Збільшення h_1 не призводить до бажаного усунення відхилення форми. Вплив розмірів компенсаційної порожнини на силовий режим показано на рис. 3.18.

3.4 Моделювання впливу кінематики руху інструменту та геометричних параметрів процесу закритої осадки

В процесі дослідження напружено-деформованого стану заготовки при закритій осадці встановлено, що застійна зона під плитами є негативним фактором, що погано впливає на заповнюваність кругових порожнин. Тому для поліпшення течії матеріалу проведено моделювання даного процесу з заготовкою, що має порожнину на торці висотою t . Заготовка встановлюється плоским торцем до рухомої плити (рис. 3.19).

При порівнянні сили деформування (рис. 3.20) для трьох видів заготовки встановлено, що зі збільшенням висоти t значення зростають. Це пов'язано з необхідністю проведення процесу закритої осадки з більшими значеннями ходу, що призводить до більшого зміцнення матеріалу та вичерпання ресурсу пластичності. Проте при збільшенні значення t спостерігається підвищення течії матеріалу у нижню кругову порожнину.

За наявності порожнин в заготовці з двох сторін (рис. 3.21, а – б) сила процесу деформування (рис. 3.21, в) не збільшується, лише не значно зростає хід процесу. Отримані результати показують, що на заповнення пасивних кутів матриці впливає вибір форми заготовки.

Встановлені особливості переміщення матеріалу в кругові порожнини, що формуються стінкою матриці та плитою, показують, що заповнення нижніх кутів є найбільш складним через відсутності рухомого інструменту, як у випадку верхніх кутів, де переміщенню металу сприяє рухома плита. Тому раціонально не застосовувати ускладнену геометрію нижньої частини матриці (рис. 3.22, а – б).

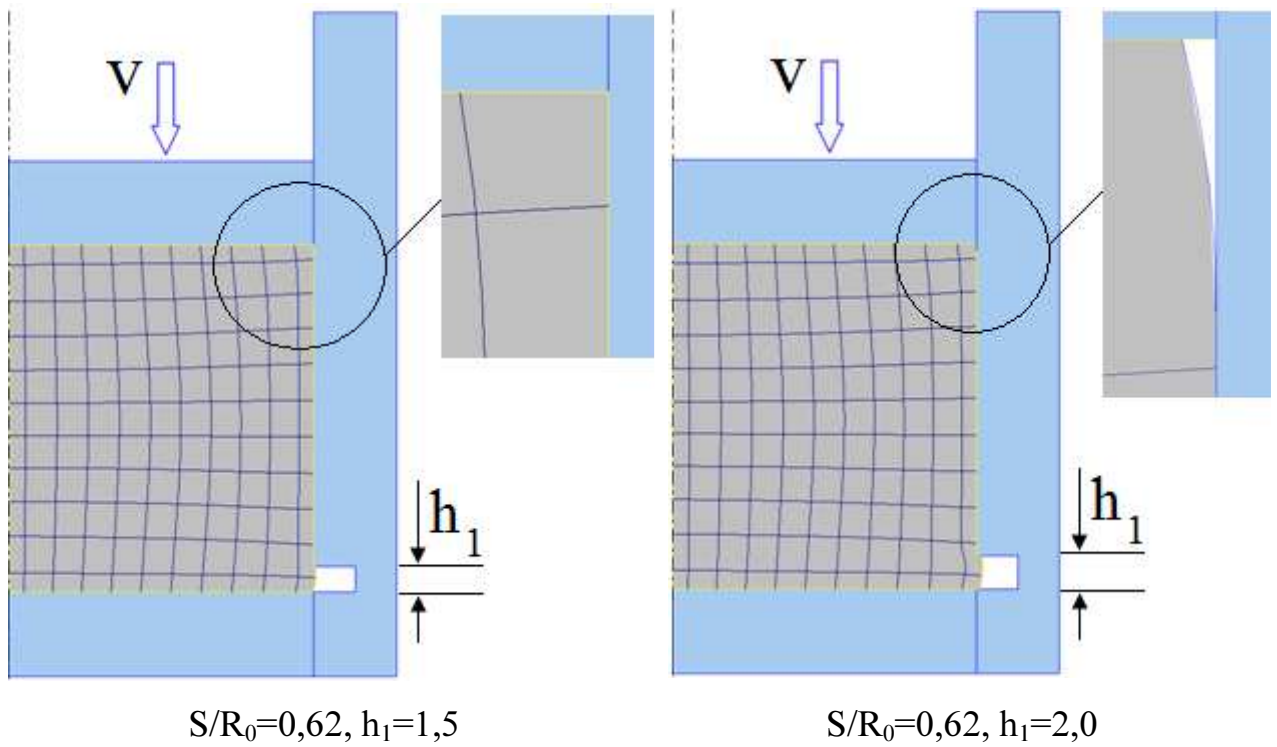


Рисунок 3.17 – Особливості заповнення кута при процесу закритої осадки з компенсатором при різних величинах компенсаційної порожнини

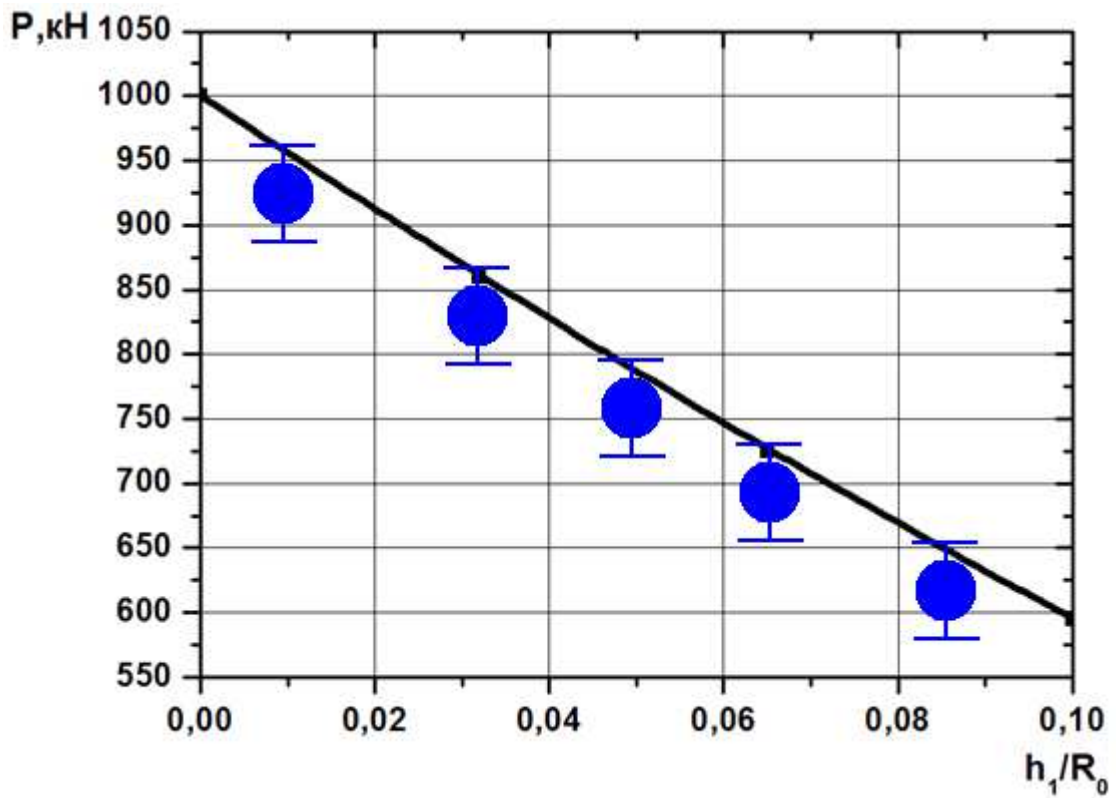


Рисунок 3.18 – Графік залежності сили деформування від величини компенсатора

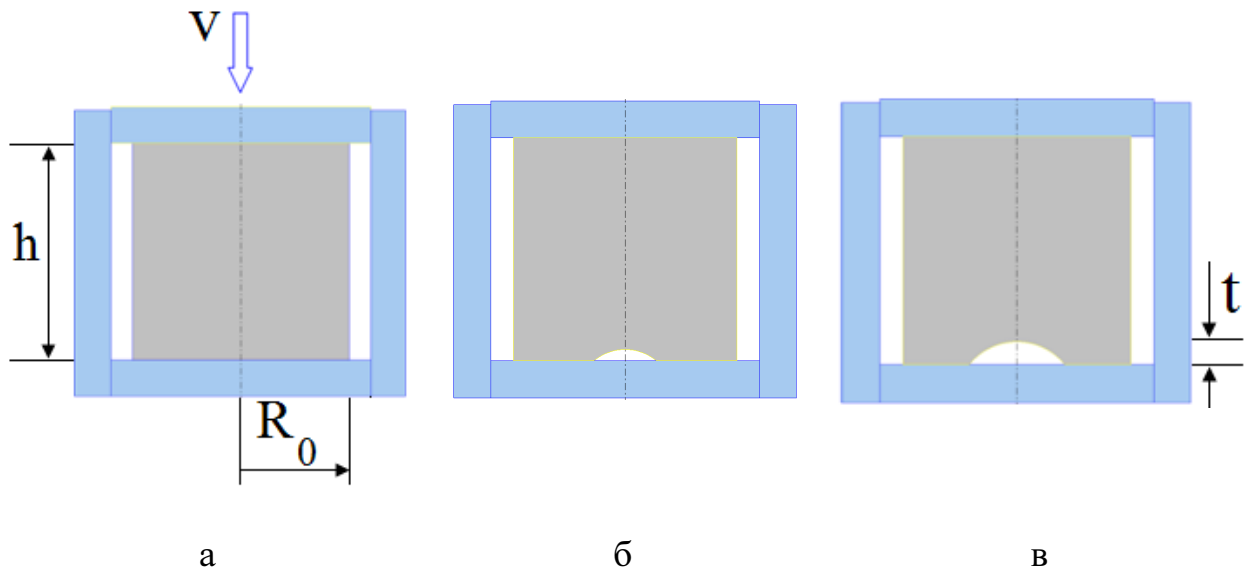


Рисунок 3.19 – Циліндрична заготовка $t=0$ мм (а), заготовки з порожниною на одному торці, де висота порожнини $t=1,5$ мм (б), та $t=3$ мм (в) при процесу закритої осадки, $h/2R_0=1,0$

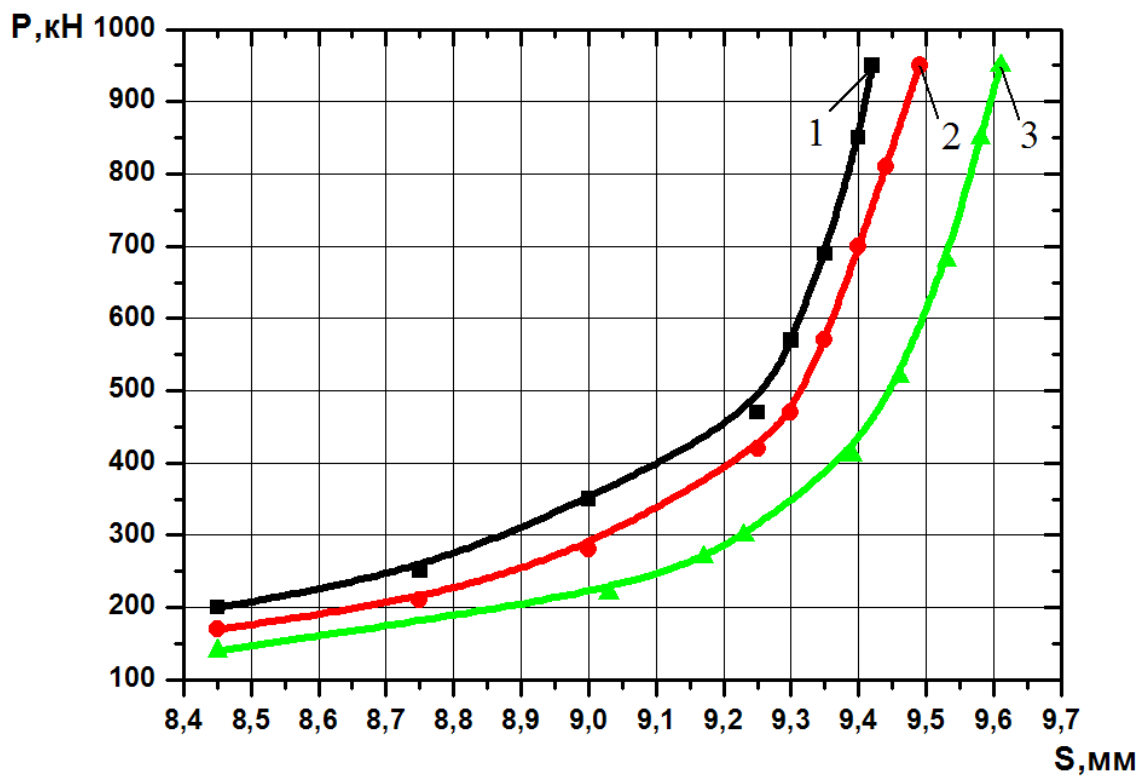


Рисунок 3.20 – Графік залежності сили деформування від ходу процесу закритої осадки: 1 – $t=0$ мм, 2 – $t=1,5$ мм; 3 – $t=3$ мм

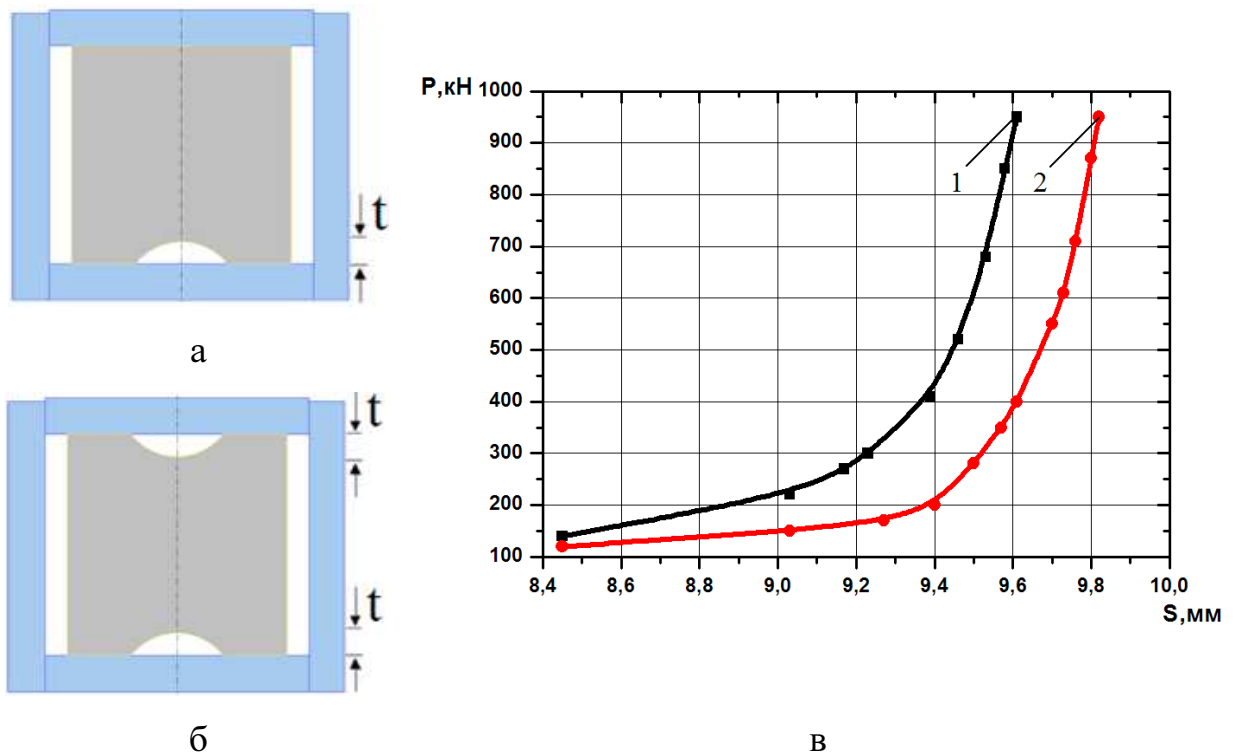


Рисунок 3.21 – Заготовки з порожнинами на торцях (а, б) та графік залежності сили деформування від ходу процесу закритої осадки: 1 – $t=3$ мм, 2 – $2t=6$ мм (в)

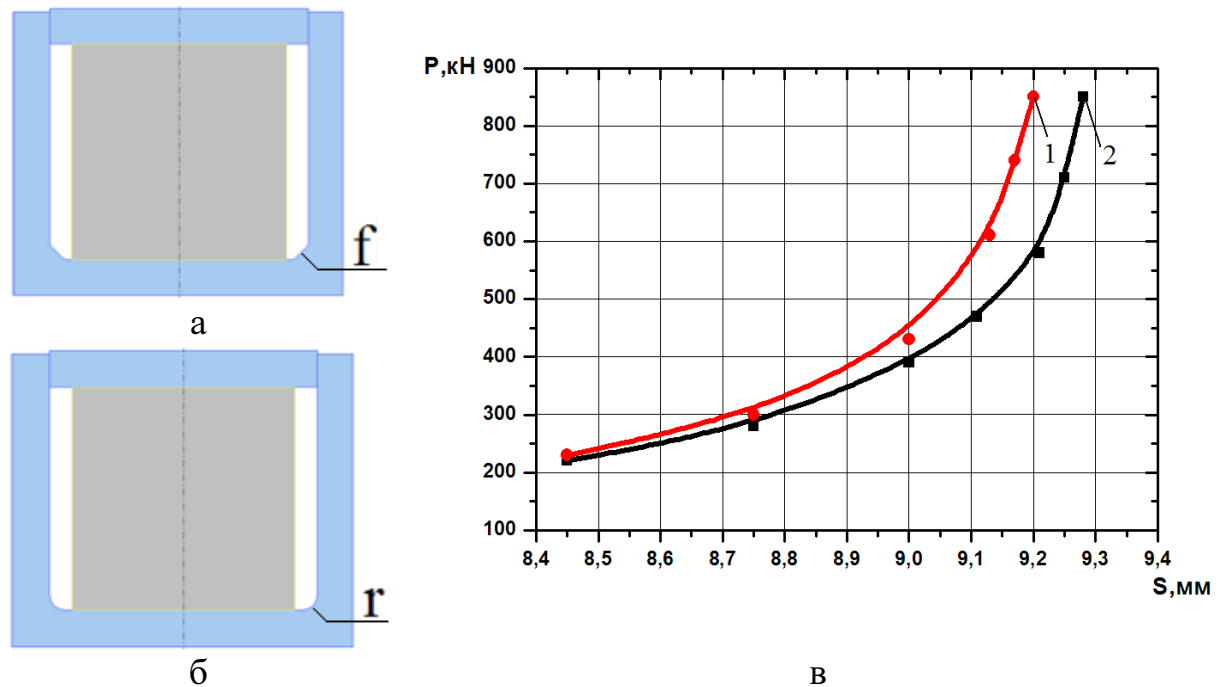


Рисунок 3.22 – Схеми форм інструменту з фаскою (а) та радіусом закруглення (б) в нижній частині матриці та графік залежності сили деформування від ходу процесу закритої осадки: 1 – $f=2$ мм 2 – $r=2$ мм

Силовий режим при деформуванні в такому інструменті показано на рис. 3.22, в. Застосування таких конструкцій дозволяє отримувати вироби, в яких повністю оформлені всі елементи деталі.

Осадка відносно великих заготовок супроводжується утворенням такого дефекту, як бочкоподібність. Застосування певних заходів дозволяє усунути дефект поверхні заготовки. До таких заходів можна віднести: застосування профільованого інструменту та закриту осадку в рухомих матрицях.

Особливістю процесу закритої осадки з використанням профільованого інструменту є зміна кута вирізу пуансонів, що дозволяє отримати різні схеми напружено-деформованого стану, а також формозміну заготовки. В даному дослідженні використовувалися кути вирізу пуансонів з $\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=20^\circ$. Для визначення особливостей здійснення процесу закритої осадки заготовки з різним кутом вирізу пуансона і його раціональних параметрів, проведено математичне моделювання методом скінчених елементів.

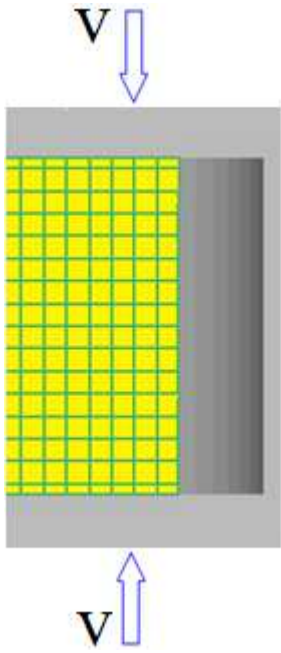
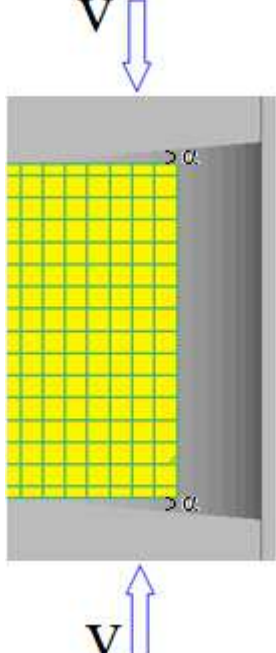
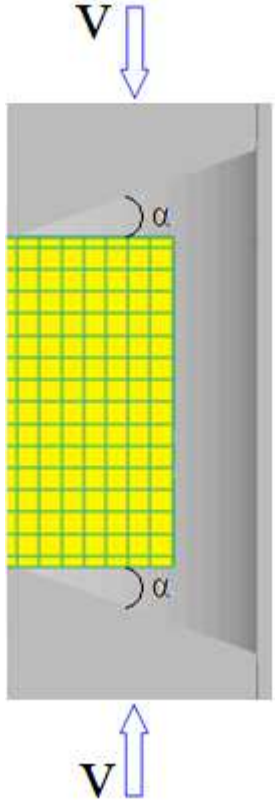
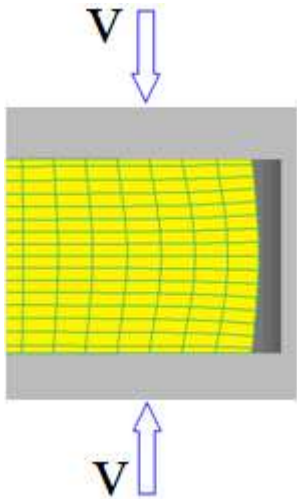
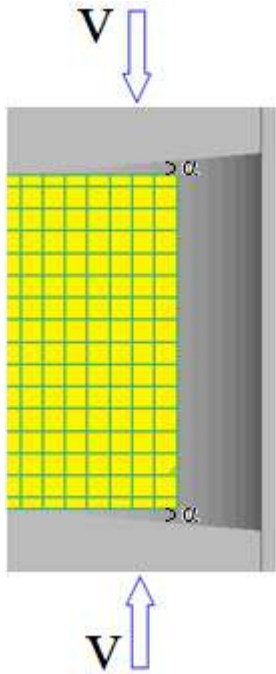
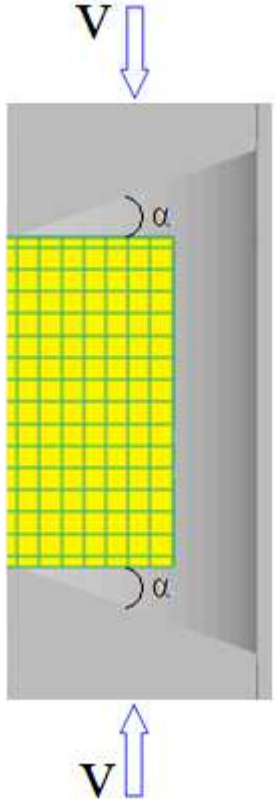
Для моделювання процесу використовувалася програма, заснована на методі скінчених елементів – DEFORM-3D. Для заготовки задавалася геометрія, розташування, заготовку розбивали на сітку, матеріал був обраний алюміній (АМцМ). Коефіцієнт тертя був прийнятий на основі обраного матеріалу і становив 0,08.

Після проведення моделювання було отримано зміну координатних сіток (табл. 3.2), з яких видно, що зі зміною кута вирізу інструментів в процесі закритої осадки форма заготовки змінюється.

У першому випадку, коли $\alpha=0^\circ$, форма заготовки після закритої осадки відповідає базовій схемі осадки плоским інструментом з традиційним утворенням бочки по ходу процесу. Дана схема повністю відповідає класичним схемам осадки і не має яких-небудь особливостей.

У другому випадку з кутом вирізу, рівним 5° , спостерігається зміна форми заготовки після проведення процесу, а саме повна відсутність бочкоподібності заготовки, що також видно по сформованій координатній сітці,

Таблиця 3.2 – Розподіл координатної сітки в процесі закритої осадки

	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=20^\circ$
Початок процесу			
Кінець процесу			

в якій поздовжні лінії спрямовані перпендикулярно відносно горизонтальної площини.

У третьому випадку, коли кут вирізу дорівнює 20° , заготовка після процесу закритої осадки має форму, зворотну першому випадку – спостерігається увігнутість заготовки щодо її поздовжньої осі. На координатній сітці видно, що поздовжні лінії спрямовані в бік осьової частини заготовки.

Виходячи з отриманих результатів, раціональним кутом вирізу можна вважати кут, рівний 5° , так як в даному випадку бочкоподібність в заготовці практично відсутня. Також даний варіант має достатній ступінь пропрацювання металу в порівнянні з традиційною схемою, що підвищує якість готового виробу.

Застосування рухомого інструменту з елементами радіальної течії (рис. 3.23) дозволяє сформувати заготовку без утворення бочкоподібності поверхні. На першому етапі деформування циліндричну заготовку вставляють в штамп з матрицею, що має фаску на нижній частині інструменту. Проводиться деформування до утворення фланця. Після цього, для формування високого фланця додається рух матриці. Застосування такої операції замінює осадку. Варіювання кінематичних характеристик дозволяє таким чином отримувати бездефектні вироби. Рекомендована швидкість рухомої матриці складає $V_1=0,5V$. В іншому випадку при видавлюванні спостерігається утворення зажимів на нижній поверхні деталі та незаповнення верхнього кута матриці. Для підтвердження утворення дефектів проведено скінчен-елементне моделювання з наступними геометричними параметрами: $L=240$ мм, $L_1=72$ мм, $L_2=28$ мм, $R_0=15$ мм, $R_1=30$ мм, $h=5$ мм, $h_1=20$ мм, $r=2$ мм, $\alpha=20^\circ$ (рис. 3.24).

3.5 Кінематика процесу калібрування заготовок

Застосування операції осадки для калібрування є досить поширеним. Альтернативою традиційному способу є калібрування з застосуванням радіальної течії металу (рис. 3.25).

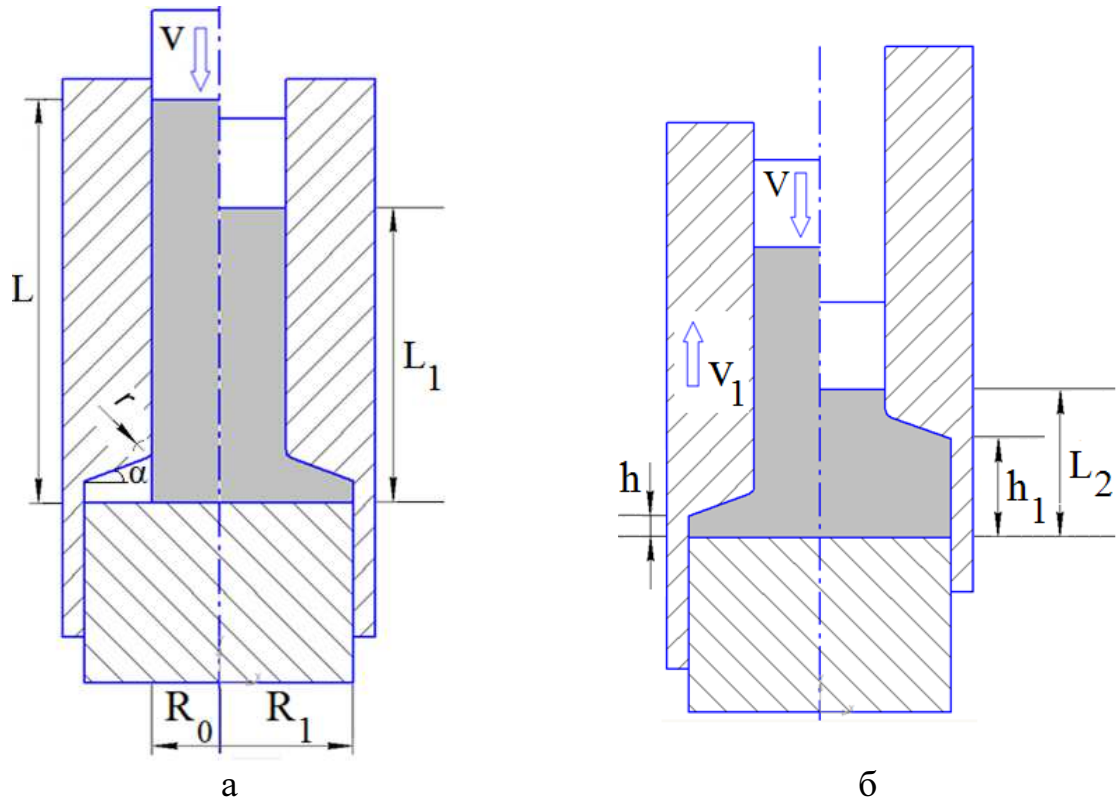


Рисунок 3.23 – Схема закритої осадки в рухомих матрицях в початковому (а) та в кінцевому положенні (б)

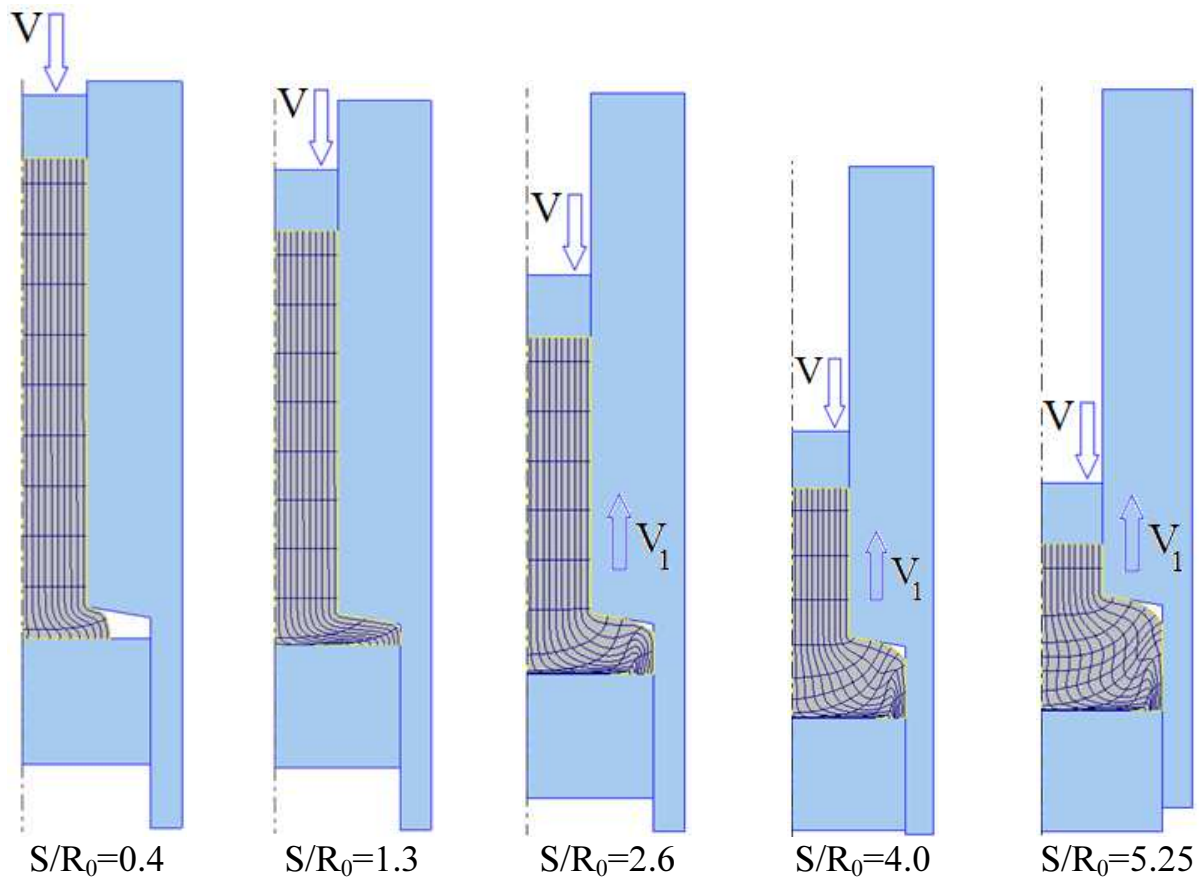


Рисунок 3.24 – Викривлення ділячної сітки при процесу закритої осадки в рухомих матрицях: $V=1\text{mm/s}$, $V_1=0,35\text{mm/s}$

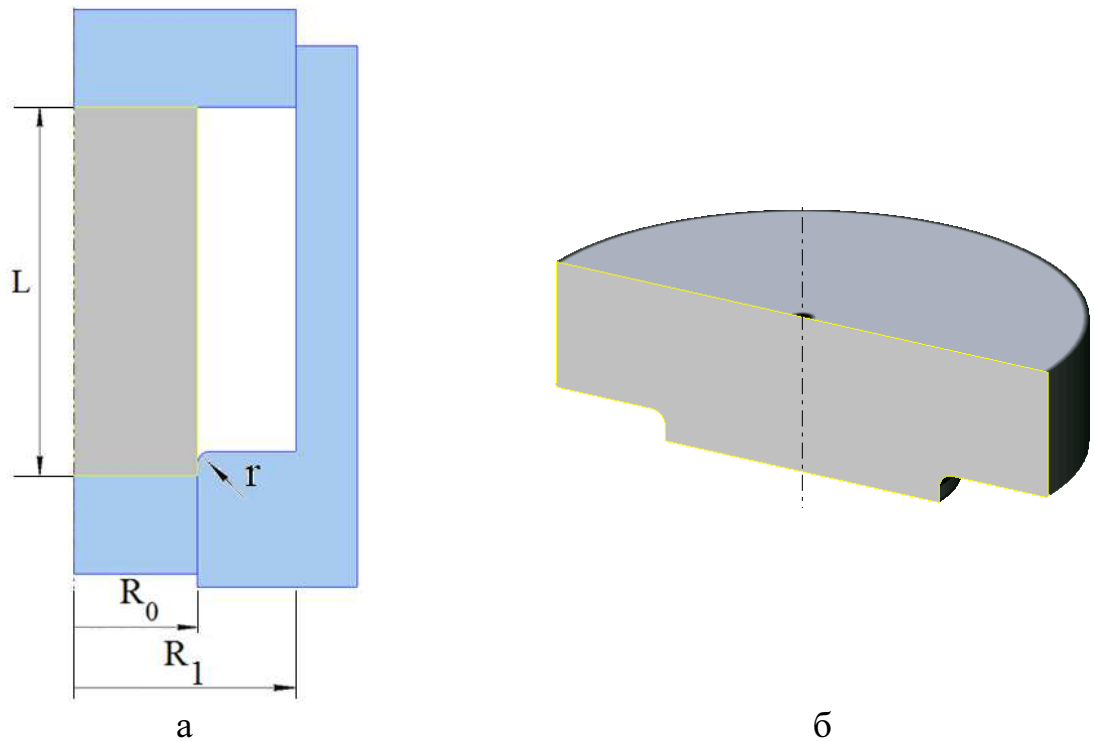
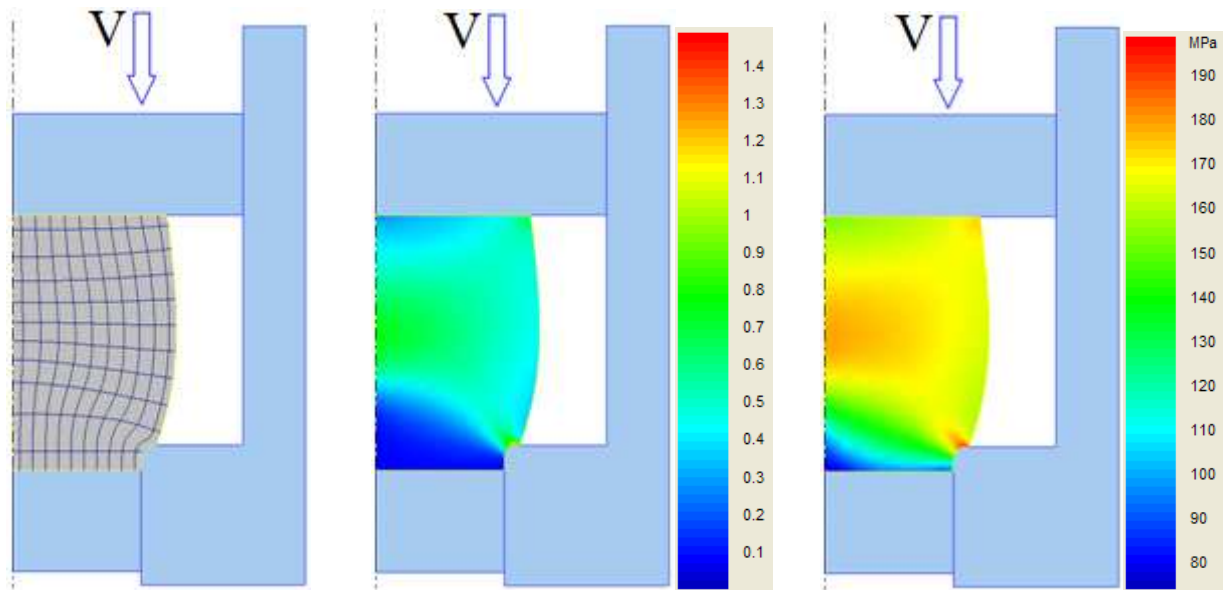


Рисунок 3.25 – Схема процесу калібрування заготовки на основі застосування радіальної течії металу (а) та одержуваний напівфабрикат: $R_0=10$ мм, $L=30$ мм, $R_1=18$ мм, $r=1$ мм

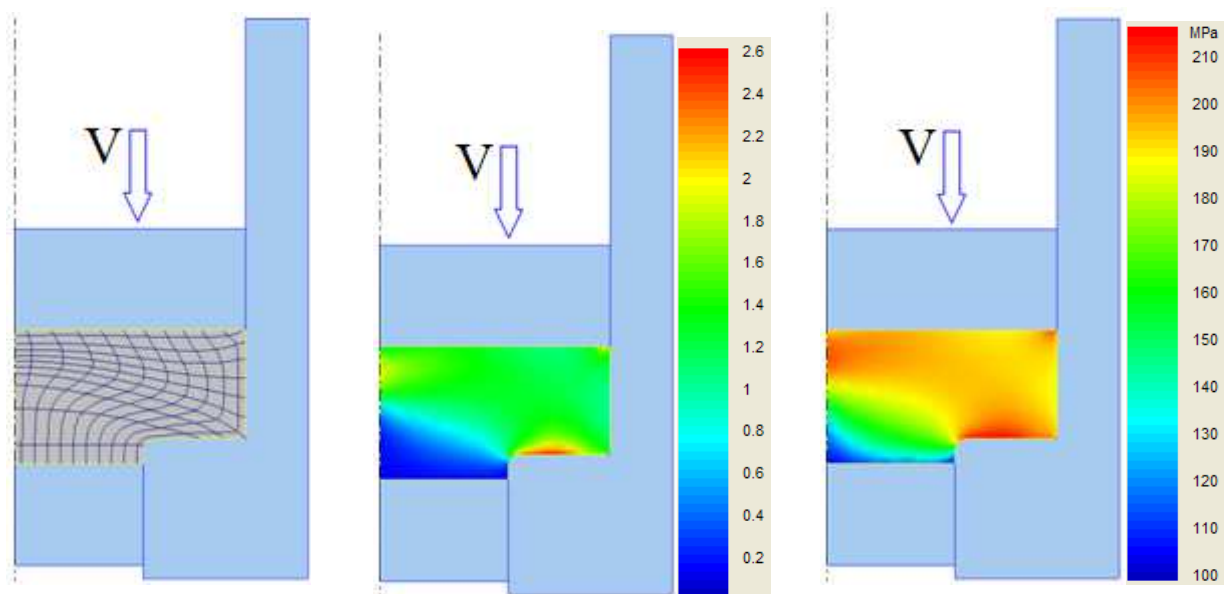
Деформування за такою схемою можливе за різними варіантами кінематичного впливу (рис. 3.26, 3.27, В.17, В.18 та В.19).

3.6 Експериментальне дослідження процесу закритої осадки

Дослідження силового режиму були проведені на випробувальній машині МС 500 зусиллям 500 кН. Для осадки використовувалися заготовки $\varnothing$ 30 мм і висотою 17 мм, 30 мм і 42 мм, виготовлені з свинцю. В якості технологічного мастила в експериментах використовувалось мастило ВНИИНП–232. Фото отриманої деталі представлено на рис. 3.28. Аналіз експериментальних досліджень при закритій осадці дозволяє виділити три стадії процесу. На першій стадії відбувається дотик металу до стінки матриці. Переміщення металу нестационарне і зростання сили цілком закономірне. На другій стадії при подальшому ході процесу метал починає заповнювати верхній кут, що утворений матрицею і рухомою плитою, і тільки після його заповнення відбувається переміщення металу і в нижній кут, що відповідає третій стадії. Графік зміни сили на протязі всього процесу представлений на рис. 3.29.



$S/R_0=1,0$



$S/R_0=2,0$

Рисунок 3.26 – Викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень при процесу закритої осадки в односторонній подачі

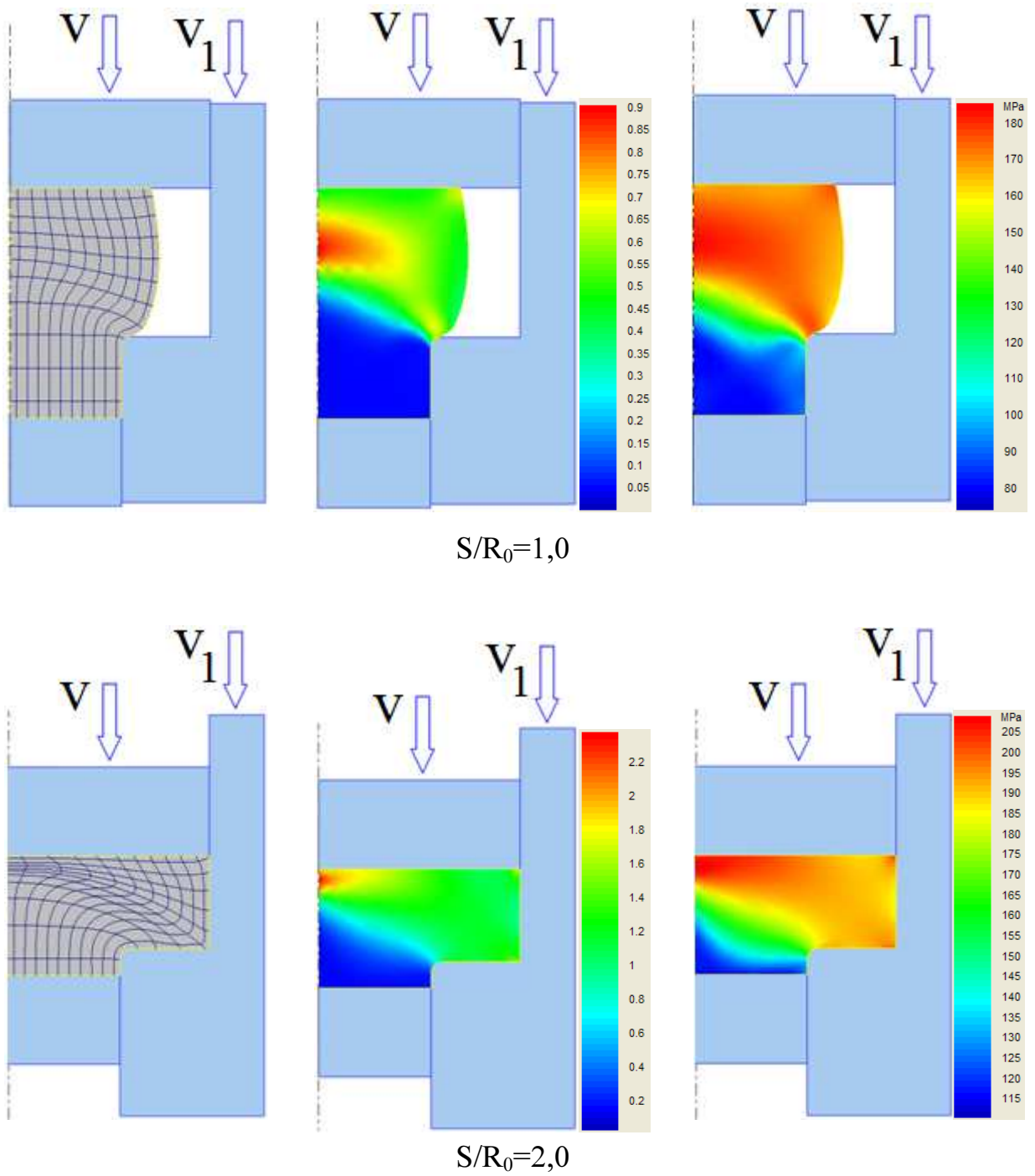


Рисунок 3.27 – Викривлення ділільної сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень при процесу закритої осадки з двосторонньою подачею в рухомій матриці

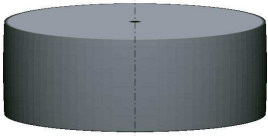
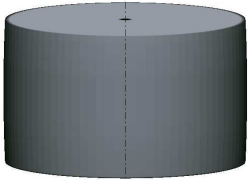
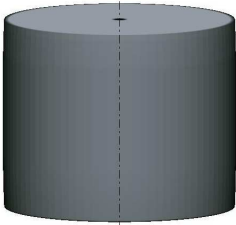
1			
2			
	а	б	в

Рисунок 3.28 – Результати експериментального дослідження (1) та моделювання (2) процесу закритої осадки заготовки: а – $h/d=0,6$; б – $h/d=1$; в – $h/d=1,4$

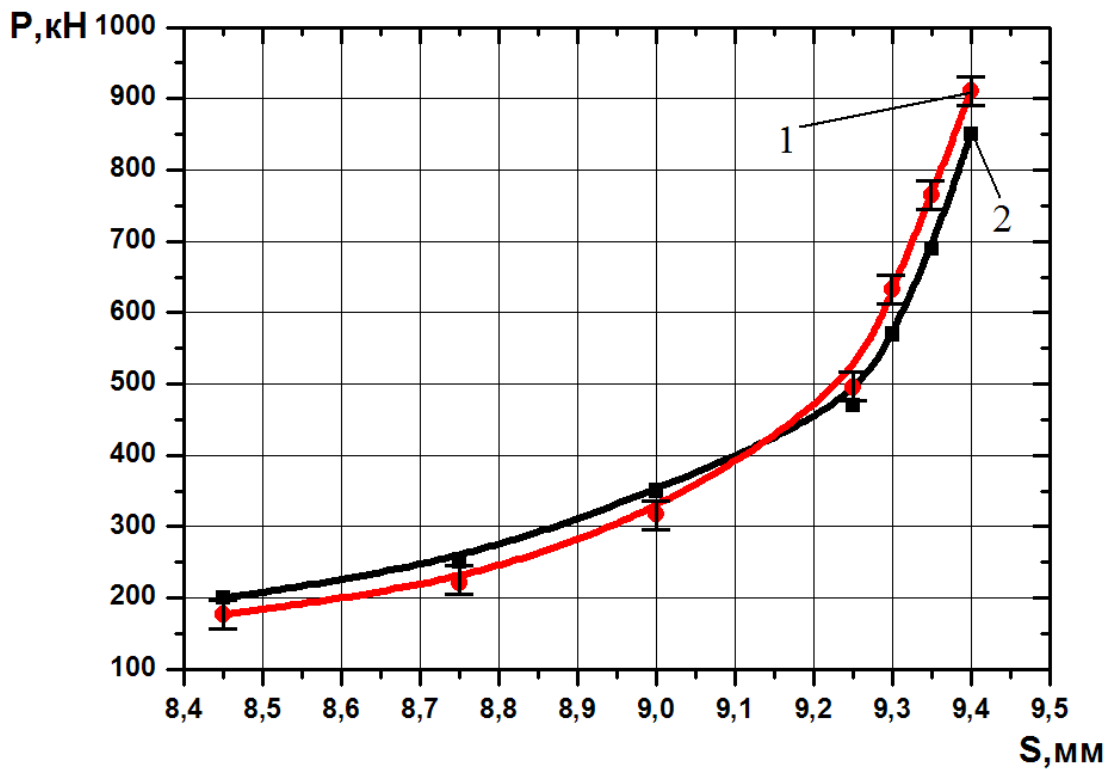


Рисунок 3.29 – Графік залежності сили деформування від ходу процесу закритої осадки з $h/d=1$ (1 – експеримент, 2 – МСЕ)

Висновки:

1. В процесах закритої осадки встановлено умови формозмінення заготовки, зміну силових характеристик та сил розкриття матриць. Методом скінченних елементів визначено, що процес закритого штампування складається з трьох основних стадій. Перша стадія I, в якій відбувається початкове стиснення і розпресування заготовки; друга стадія II – відбувається поступове збільшення навантаження і заповнення порожнини матриці. На третій стадії III навантаження різко зростає на невеликому ході процесу, відбувається заповнення кутів порожнини матриці. Встановлено, що підвищення сили на 30% в порівнянні зі звичайною осадкою вдається отримати калібрування заготовки по висоті до $0,3h$ з отриманням точного діаметру заготовки.

2. Аналіз формоутворення показав, що для процесу осадки характерним є нерівномірне заповнення кутів матриці як для одностороннього, так і для двостороннього прикладення сил деформування до заготовки. Основним фактором, що впливає на заповнення кутів є тертя. Нижні кути матриці, що прилягають до нерухомого інструменту, заповнюються значно повільніше. Таке явище обумовлене відсутністю активних сил тертя через нерухому нижню плиту. При збільшенні відносних розмірів $S/R_0 = 0,38...0,87$ та $h/2R_0 = 0,6...1,4$ протяжність застійної зони під плитами збільшується, що погіршує переміщення матеріалу в кути матриці. Зменшення застійної зони за рахунок рухомої матриці сприятливо впливає на заповнення кутів порожнини матриці.

3. Застосування кінематичного впливу на інструмент дозволяє варіювати умовами заповнення робочої порожнини матриці. Для прогнозування формоутворення заготовки отримані графічні залежності для односторонньої та двосторонньої подачі металу.

4. Для підвищення якості формоутворення рекомендовано застосування компенсатора та фасонної заготовки з технологічними порожнинами.

Оптимальне значенням висоти компенсатора відносно радіусу деталі складає $h_1/R_0 \leq 0,10$. Встановлено, що при збільшенні значення висоти технологічної порожнини t спостерігається підвищення течії матеріалу у нижню кругову порожнину.

5. Осадка відносно великих заготовок супроводжується утворенням дефекту бочкоподібності. Для усунення дефекту рекомендованим є застосування профільованого інструменту. Виходячи з отриманих результатів, раціональним кутом вирізу верхньої плити є кут рівний 5° . Також в таких умовах заготовка має достатній ступінь пропрацювання металу в порівнянні з традиційною схемою, що підвищує якість готового виробу.

6. Доповненням традиційному способу є калібрування з застосуванням радіального видавлювання. Після формування відносно низького фланцю, за рахунок радіальної течії металу та рухомої півматриці з'являється можливість формувати відносно високі заготовки. Встановлено, що оптимальне значення кута скосу інструменту складає $\alpha = 20^\circ$, а рекомендована швидкість руху матриці $V_1/V=0,35$.

7. Експериментальні дослідження підтверджують отримані теоретичні дані зі зміни силових характеристик та сил розкриття матриць при осадці заготовок. Відхилення теоретичних результатів від експериментальних не перевищують допустимих відхилень.

Результати досліджень відображені в опублікованих роботах [213-215].

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАКРИТОГО РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ

4.1 Закрите радіальне видавлювання фланця з односторонньою подачею

Радіальне видавлювання – операція, при якій відбувається збільшення діаметра заготовки на частині її висоти шляхом витіснення матеріалу в радіальну порожнину, розташовану по периметру бокової поверхні заготовки. Радіальне видавлювання застосовується для виготовлення виробів типу стрижнів або труб з поперечними виступами або фланцями.

При радіальному видавлюванні течія матеріалу відбувається в різних зонах з різним деформованим станом заготовки. Вихідною заготовкою при радіальному видавлюванні може служити як суцільний циліндр (стрижень), так і заготовка у вигляді труби. Перебіг металу забезпечується за рахунок впливу одного або двох осесиметричних пуансонів.

Процес радіального видавлювання призначений в основному для отримання деталей з фланцями: як зовнішніми, так і внутрішніми. Формування останніх здійснюється з заготовок у вигляді порожнистих циліндрів на спеціальній оправці. Найбільш часто радіальним видавлюванням отримують поковки в вигляді зірочки, шестерні, "стакан з фланцем.

Аналіз характеру зміни сил видавлювання показує, що при зменшенні висоти робочої порожнини (товщини фланця) різко зростає тиск, що пов'язано зі збільшенням ступеня деформації. Вплив діаметральних розмірів фланця у всіх випадках радіального видавлювання однаковий: збільшення зовнішнього діаметра фланця однозначно пов'язане з величиною робочого ходу пуансона і супроводжується плавним зростанням робочих навантажень. Вплив радіусу заокруглення кутів матриці на значення сил радіального видавлювання носить більш складний характер. При збільшенні значень

радіуса заокруглення знижуються сили в початковій стадії процесу, так як при цьому для заповнення порожнини і формування осередку деформації необхідно більше часу. У міру розвитку процесу після досягнення металом плоскопаралельної ділянки кругової порожнини, відмінності в силах згладжуються.

Можливості процесу радіального видавлювання також обмежуються виникненням тріщин і руйнуванням фланців на периферійній стоншеної частини. Це обумовлено впливом різнойменної схеми напруженого стану на кромкою фланця з одним (окружним) розтягуючим напруженням. Граничний ступінь деформації залежить від пластичних властивостей матеріалу заготовки, висоти фланця, радіуса перехідної ділянки півматриці: чим вище відносні значення цих параметрів, тим більший граничний діаметр фланця можна отримати.

Процеси радіального видавлювання мають велику кількість кінематичних схем і їх здійснення і відрізняються різноманітністю деталей. Особливістю процесів радіального видавлювання є складний режим силового впливу як на заготовку, що деформується, так і на елементи штампового оснащення. Завданням теоретичного аналізу процесів видавлювання в закритих матрицях є визначення сили видавлювання і сили розкриття матриці.

На силовий режим процесу видавлювання значно впливають такі чинники: умови контактного тертя; геометрія радіальної порожнини; геометрія перехідних кромок матриці, а на працездатність штампів з роз'ємними матрицями – значна сила розкриття.

Встановлено, що найбільша точність розмірів і форми, видавлених деталей досягається застосуванням процесів закритого радіального видавлювання. Недоліком процесу є значне зростання сили деформування і розкриття на заключній стадії заповнення гравюри матриці. Застосовують закрите радіальне видавлювання для створення сприятливого силового

режиму з компенсаційними порожнинами, що дозволяє знизити навантаження на інструмент.

Розкриття матриці і величини сил видавлювання можна також знизити і за рахунок застосування суміщених схем видавлювання. Необхідно виконати аналіз процесу суміщеного радіального видавлювання з редукуванням для оцінки зниження сил розкриття.

Процеси радіального видавлювання мають велику кількість кінематичних схем і їх здійснення і відрізняються різноманітністю деталей.

В даному теоретичному дослідженні за допомогою програми методу скінченних елементів QForm 2D/3D, які дозволяють визначати напружено деформований стан і силовий режим процесу, представлено математичне моделювання процесів закритого радіального видавлювання.

4.1.1 Моделювання процесу закритого радіального видавлювання різнотовщинних фланців

Для моделювання процесу радіального видавлювання фланця на торці стрижня обрані наступні параметри:

– механічні властивості матеріал заготовки АМцМ: крива істинних напружень описується рівнянням $\sigma_s(\varepsilon)=188,4 \cdot \varepsilon^{0,15}$, межа текучості $\sigma_{0,2}=105$ МПа, модуль Юнга $E=75000$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$ і коефіцієнт тертя між матеріалом заготовки і інструментом $\mu=0,05...0,3$ (закон Зібеля).

В силу симетрії розглядається одна половина схеми (а) і отриманий напівфабрикат (б), представлені на рис. 4.1.

Обрані наступні параметри для моделювання процесу радіального видавлювання фланця на торці стрижня:

– геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R – радіус фланця ($R=36$ мм), R_i – проміжний радіус фланця, h – висота

приймальної порожнини для формування фланця, h/R_0 – відносна висота фланця ($h/R_0=0,25; 0,45; 0,65$), L – висота заготовки ($L=70$ мм), r – радіус заокруглення кромки інструменту ($r=2$ мм).

– Силкові параметри процесу: P – сила видавлювання процесу, Q – сила розкриття матриці, V – швидкість процесу видавлювання.

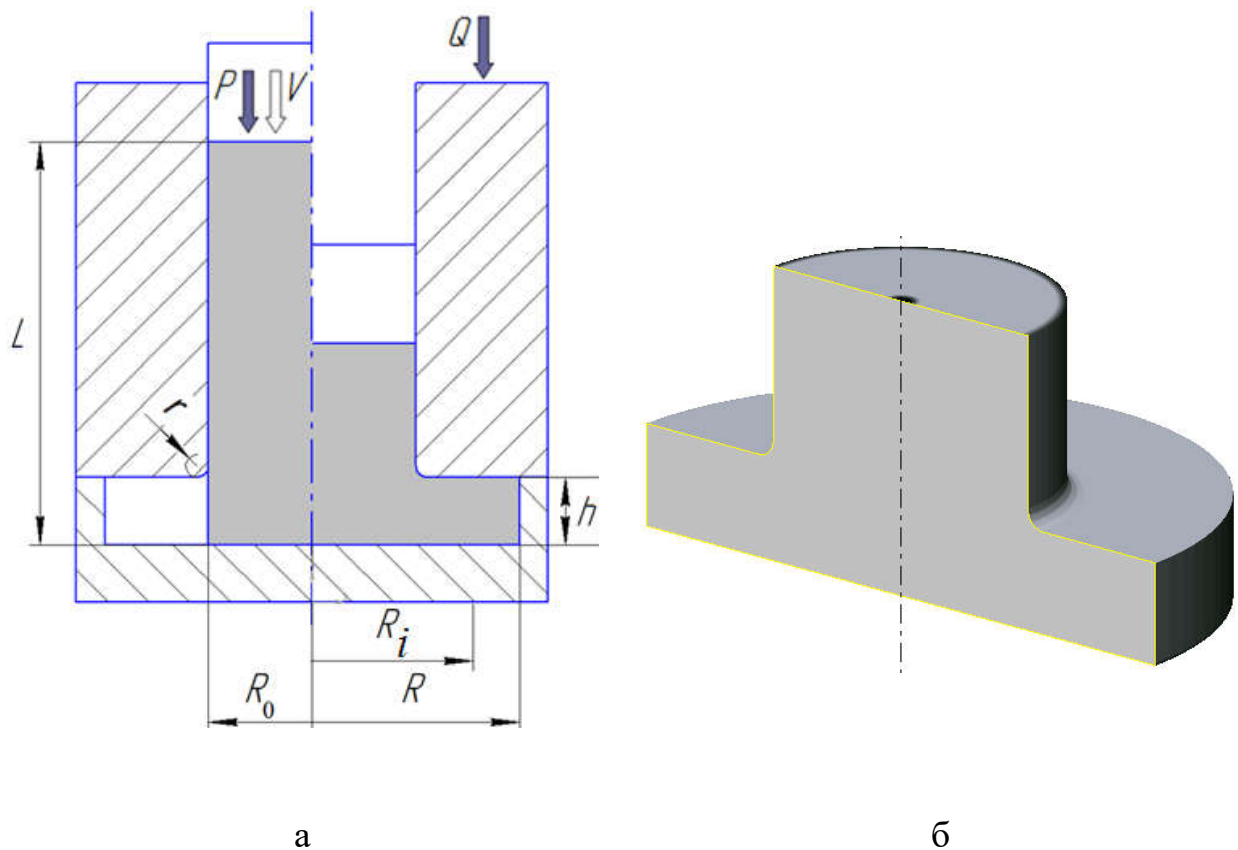


Рисунок 4.1 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця (а) на торці стрижня з різними відносними висотами фланця з односторонньою подачею і отриманий напівфабрикат (б)

4.1.1.1 Моделювання напруженого і деформованого стану

На рис. 4.2 та Г.1, Г.2 (додаток Г) представлені результати моделювання процесу при різній відносній висоті фланця ($h/R_0=0,25; 0,45; 0,65$ мм), такі, як викривлення ділильної сітки, розподіл

інтенсивності деформацій по осередку деформації і розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перерізу заготовки, що деформується.

Як видно з дослідження (див. рис. Г.1), осередок деформації по висоті обмежується висотою приймальної порожнини під фланець, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в нижній частині осередку деформації. Інтенсивність напружень по осередку деформації розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення.

Значення максимальної інтенсивності деформацій і напружень були отримані при відносному проміжному радіусі фланця ($R_i/R_0=2$), які досягають наступних позначок (див. рис. 4.2, Г.1 та Г.2): при відносній висоті приймальної порожнини під фланець $h/R_0=0,25$ – ($\epsilon_i=2,8$; $\sigma_i=180$ МПа), при $h/R_0=0,45$ – ($\epsilon_i=4$; $\sigma_i=200$ МПа) і при $h/R_0=0,65$ – ($\epsilon_i=4,5$; $\sigma_i=200$ МПа).

4.1.1.2 Моделювання силового режиму

На рис. 4.3 досліджена залежність сили видавлювання від ходу процесу в певному інтервалі значень $h/R_0=0,25$, $h/R_0=0,45$ и $h/R_0=0,65$.

З графіка залежності сили видавлювання від ходу процесу (див. рис. 4.3) видно, що при $h/R_0=0,25$ відбувається плавне збільшення сили процесу до позначки ходу $S=12$ мм, яке досягає сили $P=700$ кН, а після цього різко зростає, до позначки $P=1350$ кН з ходом $S=14$ мм.

При $h/R_0=0,45$ графік сили показує, що до позначки ходу $S=22$ мм сила плавно зростає до значення $P=600$ кН, а потім різко збільшується і досягає сили $P=1300$ кН при ході $S=25$ мм, а також при $h/R_0=0,65$ до позначки $S=34$ мм сила плавно збільшується до значення $P=700$ кН, а потім зростає, досягаючи значення $P=1250$ кН з ходом $S=36$ мм.

Це пояснюється тим, що метал більше контактує з приймальною порожниною інструменту і відбувається більш швидке заповнення кута кругової порожнини при закритому радіальному видавлюванні.

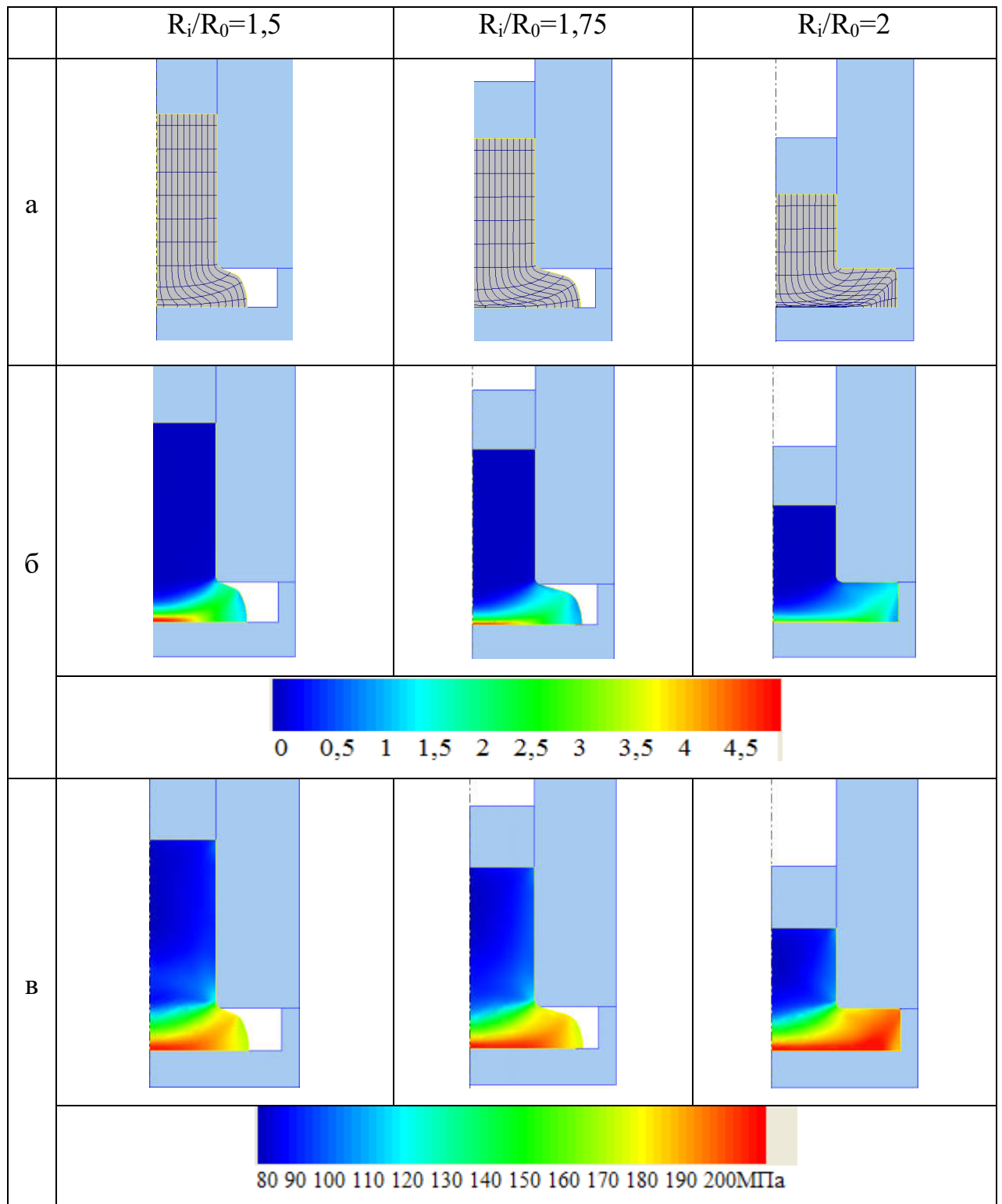
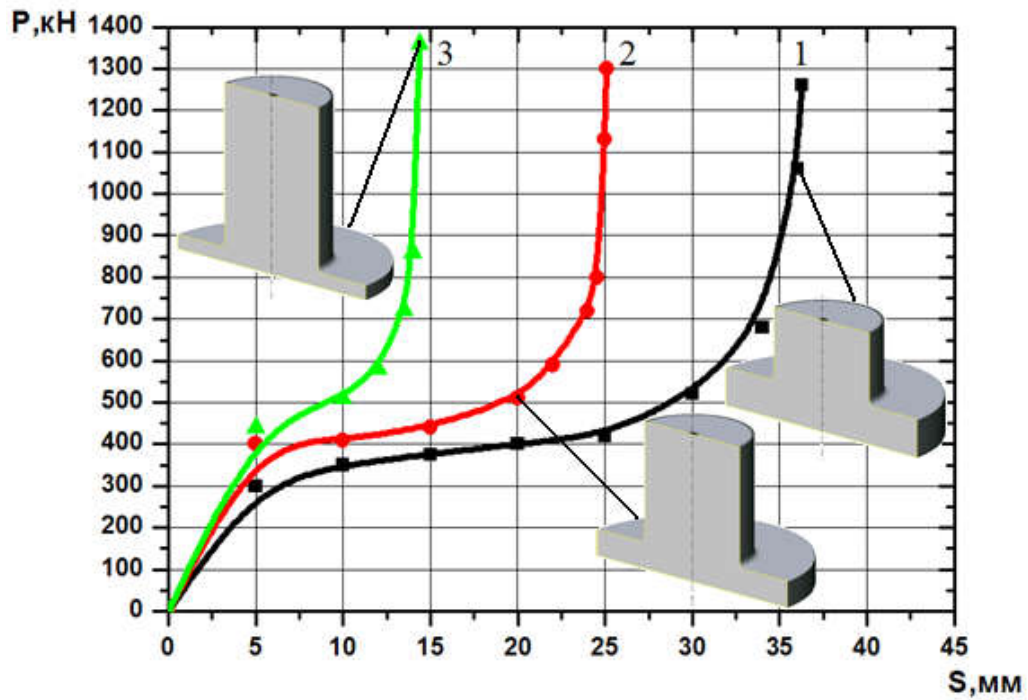


Рисунок 4.2 – Викривлення ділительної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при відносному радіусі фланця в процесі закритого радіального видавлювання на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $r=2$ мм и $\mu=0,08$



1 – $h/R_0=0,25$; 2 – $h/R_0=0,45$; 3 – $h/R_0=0,65$; $r=2$ мм

Рисунок 4.3 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях h/R_0

4.1.2 Дослідження впливу геометричних параметрів видавлювання на силові характеристики процесу

В силу симетрії розглядається одна половина схеми (а) і отриманий напівфабрикат (б) представлені на рис. 4.4.

Обрані наступні параметри для моделювання процесу радіального видавлювання фланця на торці стрижня:

– геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R – радіус фланця ($R=36$ мм), R_i – проміжний радіус фланця, h – висота приймальної порожнини для фланця, що видавлюється, h/R_0 – відносна висота фланця ($h/R_0=0,65$), r – радіус заокруглення кромки інструменту ($r=2; 6; 10$ мм), f – фаска інструменту ($f=2; 6; 10$ мм); L – висота заготовки ($L=70$ мм).

– Силові параметри процесу: P – сила видавлювання процесу, Q – сила розкриття матриці, V – швидкість процесу видавлювання.

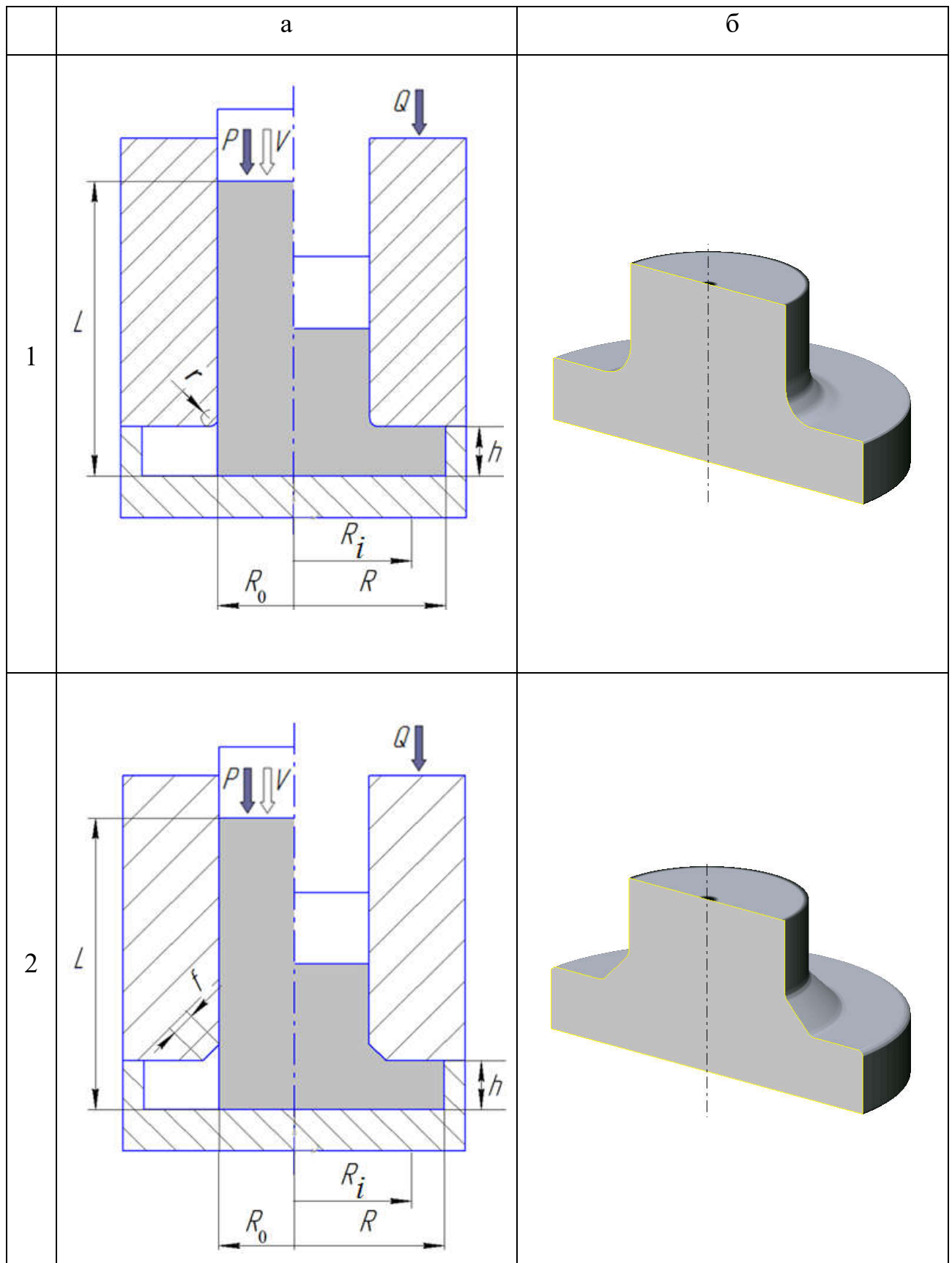


Рисунок 4.4 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці стрижня (а), з різними параметрами заокруглення (1) і фасок (2) на інструменті з односторонньою подачею і отриманим напівфабрикатом (б)

4.1.2.1 Моделювання напруженого і деформованого стану

Результати моделювання процесу представлені на рисунках Г.3...Г.8 (додаток Г) при різних радіусах заокруглення ($r=2$ мм, $r=6$ мм, $r=10$ мм) і при різних фасках ($f=2$ мм, $f=6$ мм, $f=10$ мм), такі, як викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій і напружень.

Значення максимальної інтенсивності деформацій (див. рис. Г.3) були отримані при моделюванні з радіусом заокруглення кромки інструменту $r=2$ мм з відносним проміжним радіусом фланця ($R_i/R_0=2$), які досягають наступних позначок: при відносній висоті приймальної порожнини під фланець $h/R_0=0,65$ – $\varepsilon_i=4,5$. Максимальна інтенсивність деформацій при $r=6$ мм (рис. Г.4) досягає значення $\varepsilon_i=3,8$, а при $r=10$ мм – $\varepsilon_i=2,8$ (рис. Г.5). При фасці на інструменті $f=2$ мм (рис. Г.6) значення будуть наступними: $\varepsilon_i=4,5$, при $f=6$ мм – $\varepsilon_i=3,6$ (рис. Г.7), при $f=10$ мм – $\varepsilon_i=2,8$ (рис. Г.8). Максимальне значення інтенсивності напружень, отримане при цих же параметрах, досягає 200 МПа.

4.1.2.2 Моделювання силового режиму

Для моделювання силового режиму в процесі радіального видавлювання необхідно було дослідити певні розміри незаповнення кругової порожнини матриці (рис. 4.5). Кут незаповнення характеризується двома величинами «а» і «в», що описуються ділянки біля верхньої та нижньої півматриці відповідно.

З графіка залежності сили процесу від ходу пуансона (рис. 4.6) видно, що для кожного радіусу заокруглення ($r=2$ мм, $r=6$ мм, $r=10$ мм) відбувається плавне збільшення сили до позначки ходу $S=34$ мм, а після цього сила процесу різко зростає і досягає значення при $r=2$ мм – $P=1250$ кН, при $r=6$ мм – $P=1200$ кН, при $r=10$ мм – $P=1050$ кН. Наприклад, при ході пуансона 30 мм значення сили для $r=2$ мм – $P=550$ кН, $r=6$ мм – $P=450$ кН, $r=10$ мм – $P=400$ кН.

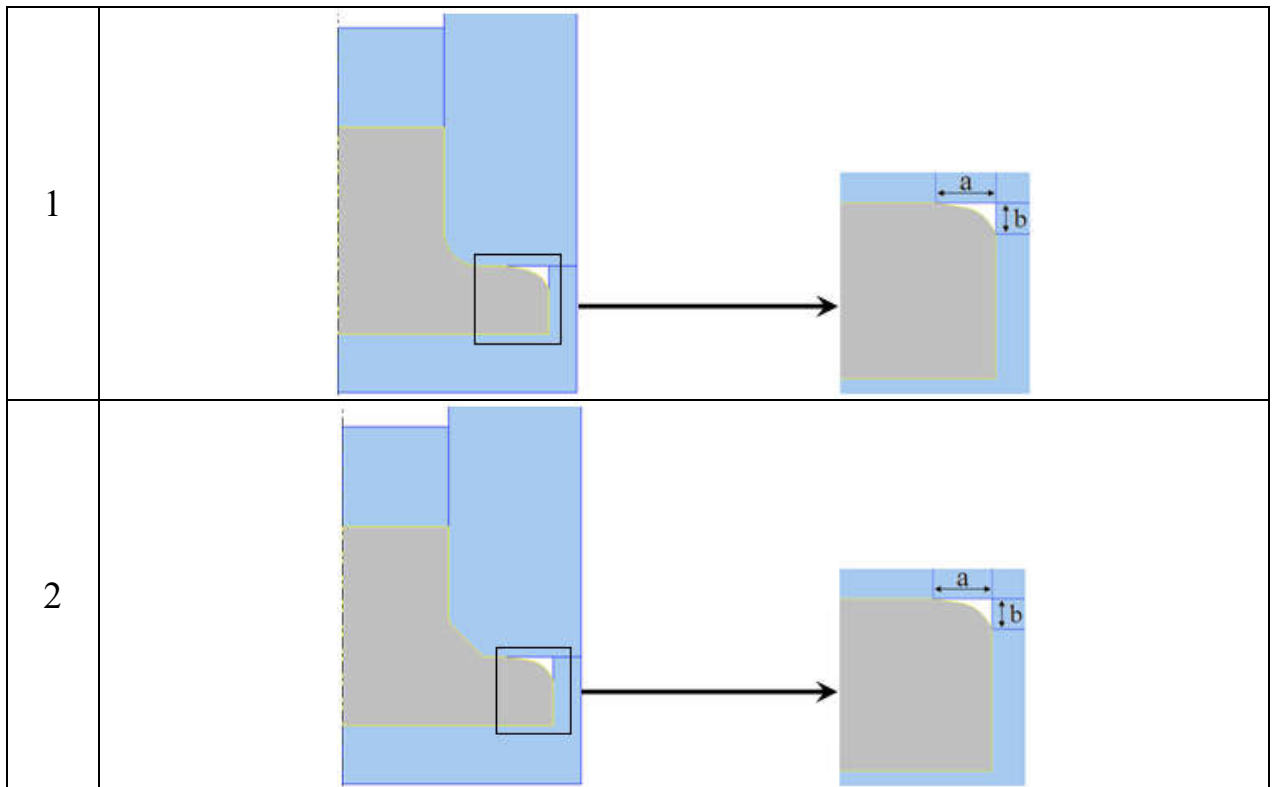
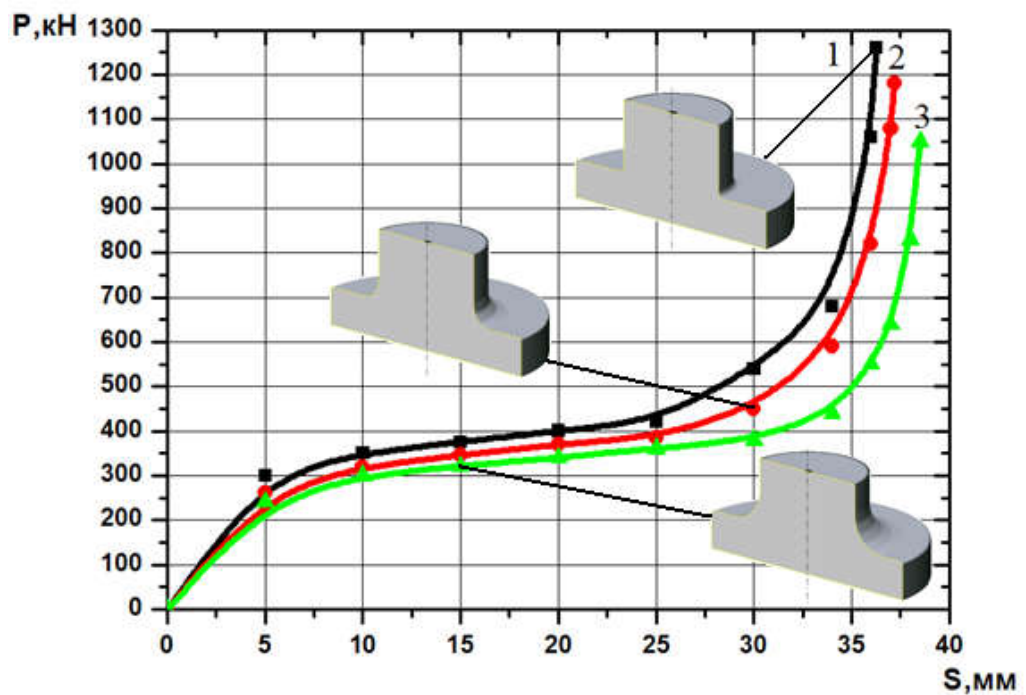


Рисунок 4.5 – Розміри незаповнення кругової порожнини матриці при закритому радіальному видавлюванні з різними параметрами заокруглення (1) і фасок (2) на інструменті

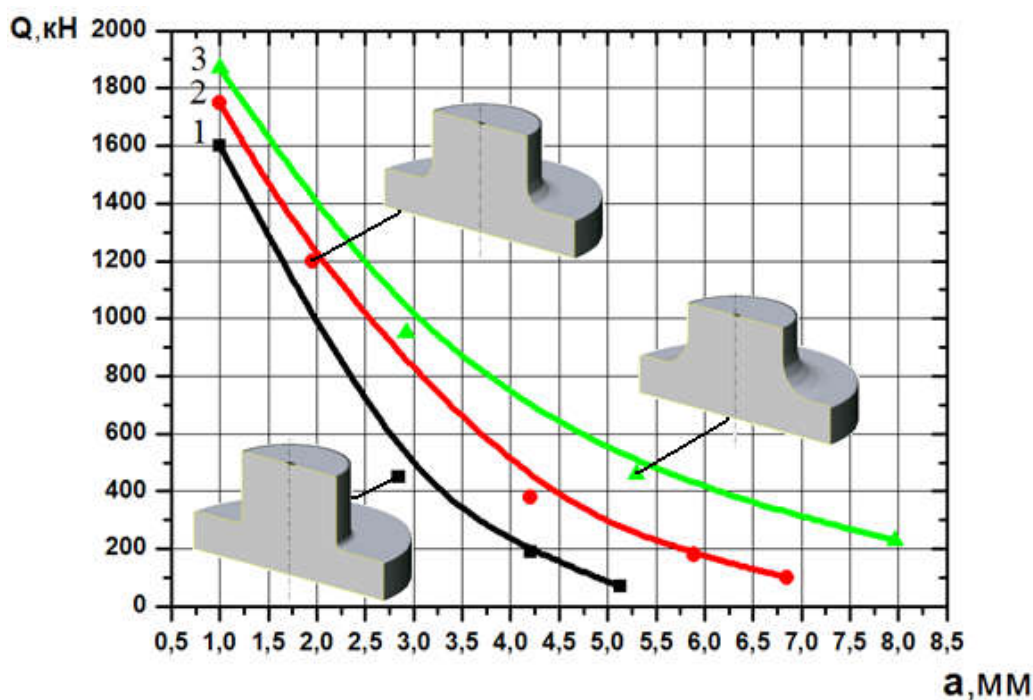


1 – $r=2$ мм; 2 – $r=6$ мм; 3 – $r=10$ мм

Рисунок 4.6 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях радіусу заокруглення

Правлене зростання сили спостерігається до моменту зіткнення металу зі стінкою нижньої півматриці. Під час інтенсивної течії металу в верхній кут матриці спостерігається різке зростання силових характеристик, що пов'язане зі зміною жорсткості системи, збільшенням поверхні тертя та зниженням свободи течії металу.

На рис. 4.7 представлений графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а», з якого видно, що при збільшенні радіуса заокруглення перехідної кромки матриці ($r=2$ мм, $r=6$ мм, $r=10$ мм) збільшується сила розкриття матриці, зі збільшенням параметра незаповнення «а» сила розкриття зменшується. Наприклад, при радіусі $r=10$ мм; «а»=1 мм – $Q=1900$ кН, $r=6$ мм; «а»=1 мм – $Q=1700$ кН, $r=2$ мм; «а»=1 мм – $Q=1600$ кН. На кривій 1 ми бачимо, що при параметрі незаповнення «а»=5,1 мм – $Q=90$ кН, на кривій 2 при «а»=6,8 мм – $Q=100$ кН, на кривій 3 при «а»=8 мм – $Q=200$ кН. Збільшення радіусу заокруглення сприяє більш плавній течії матеріалу і відсутності відхилення форми фланцю вже на початковій стадії видавлювання. Таким чином, вплив об'єму металу на верхню півматрицю, тобто її розкриття, помітно одразу.



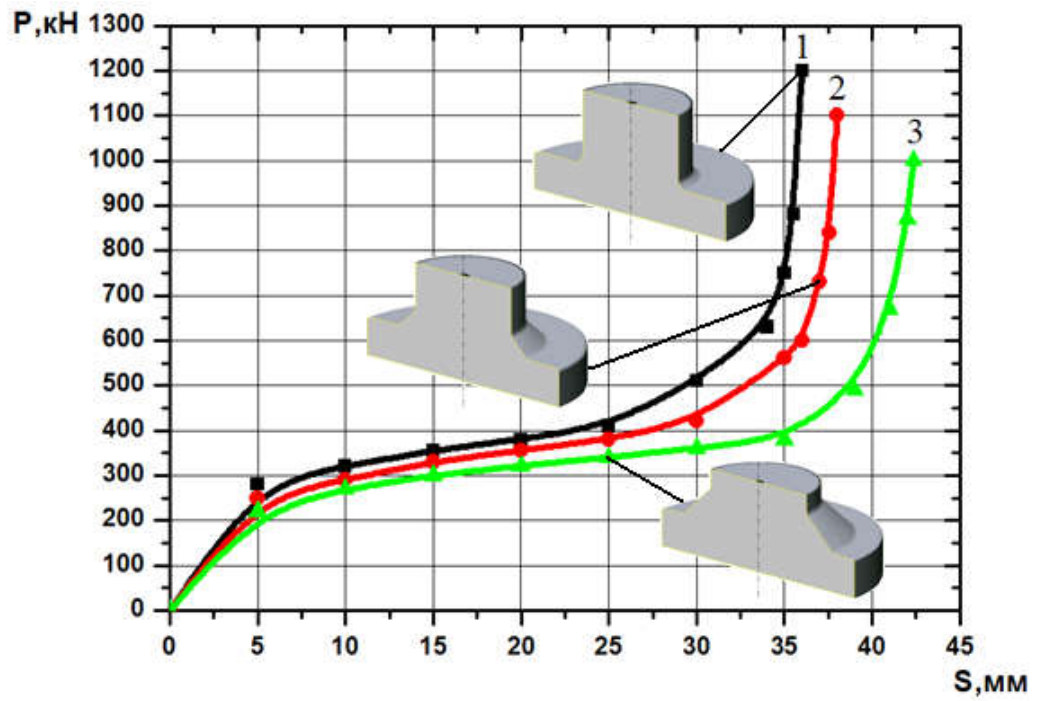
1 – $r=2$ мм; 2 – $r=6$ мм; 3 – $r=10$ мм

Рисунок 4.7 – Графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» при різних значеннях радіусу заокруглення

На рис. 4.8 представлений графік залежності сили процесу від ходу пуансона, з якого видно, що для фаски $f=2$ мм відбувається плавне збільшення сили до позначки ходу $S=34$ мм, а після цього сила процесу різко зростає і досягає значення $P=1200$ кН при $S=36$ мм. Для $f=6$ мм плавне збільшення сили відбувається до позначки $S=35$ мм, а потім різко зростає досягаючи значення $P=1100$ кН з ходом $S=37$ мм. При фасці $f=10$ мм значення сили плавно зростає до ходу $S=39$ мм, а після цього сила різко збільшується до значення $P=1000$ кН з ходом $S=42$ мм. Зі збільшенням фаски сила зменшується, це пояснюється тим, що заповнення порожнини відбувається швидше, так як метал більше контактує з приймальною порожниною інструменту. На рис. 4.9 представлений графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а», з якого видно, що при збільшенні фаски ($f=2$ мм, $f=6$ мм, $f=10$ мм) збільшується сила розкриття матриці, зі збільшенням параметра незаповнення «а» сила розкриття зменшується. Наприклад, при фасці $f=10$ мм; «а»=1 мм – $Q=2000$ кН, $f=6$ мм; «а»=1 мм – $Q=1750$ кН, $f=2$ мм; «а»=1 мм – $Q=1500$ кН. На кривій 1 ми бачимо, що при параметрі незаповнення «а»=5,6 мм – $Q=50$ кН, на кривій 2 при «а»=6,8 мм – $Q=200$ кН, на кривій 3 при «а»=8 мм – $Q=350$ кН.

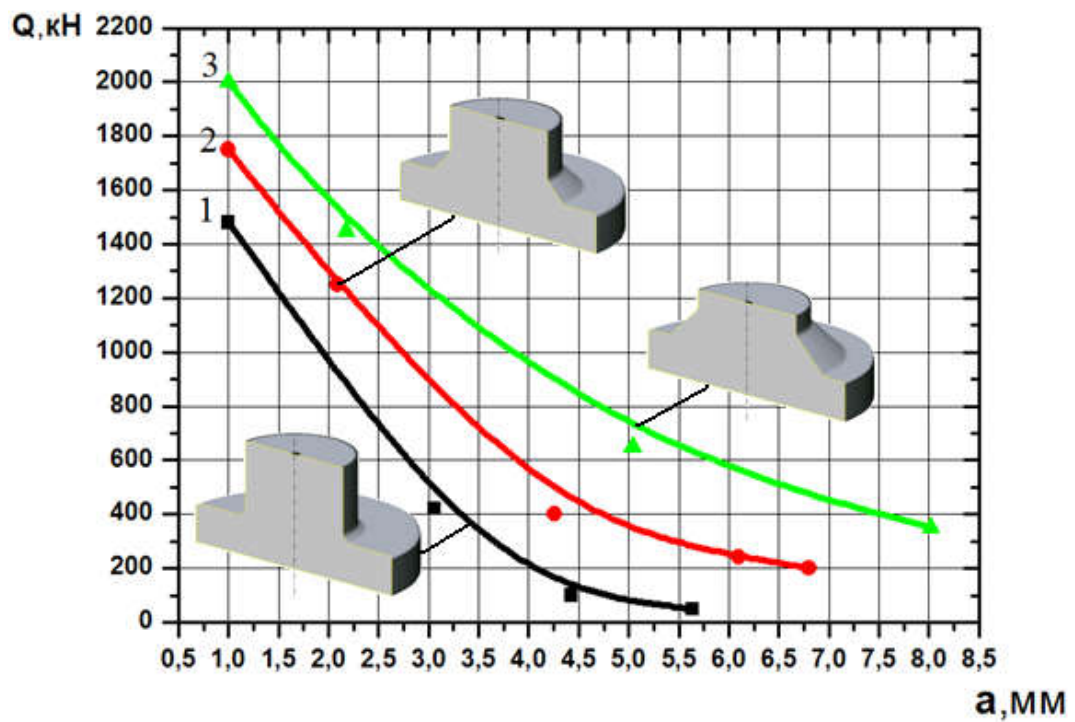
Для порівняння силового режиму процесу радіального видавлювання фланця з певним значенням радіусу і фаски були побудовані відповідні графіки. На графіку залежності сили процесу від ходу пуансона (рис. 4.10) видно, що при значенні радіуса заокруглення $r=10$ мм сила досягає більшого значення, ніж при фасці $f=10$ мм. Наприклад, з ходом пуансона $S=35$ мм при радіусі заокруглення 10 мм (крива 1) сила процесу досягає 500 кН, а при фасці $f=10$ мм (крива 2) сила процесу досягає значення 400 кН. Це пояснюється тим що при радіусі заокруглення $r=10$ мм заповнення порожнини відбувається повільніше ніж при фасці $f=10$ мм.

На рис. 4.11 представлений графік порівняння сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а». Із якого видно, що при значенні фаски $f=10$ мм сила розкриття досягає більшого значення, ніж при радіусі заокруглення $r=10$ мм. Наприклад, параметр незаповнення «а»=1 мм при радіусі заокруглення 10 мм (крива 1) сила розкриття $Q=1900$ кН, а при фасці 10 мм (крива 2) сила процесу розкриття $Q=2000$ кН. Зі збільшенням параметра незаповнення «а» сила розкриття зменшується.



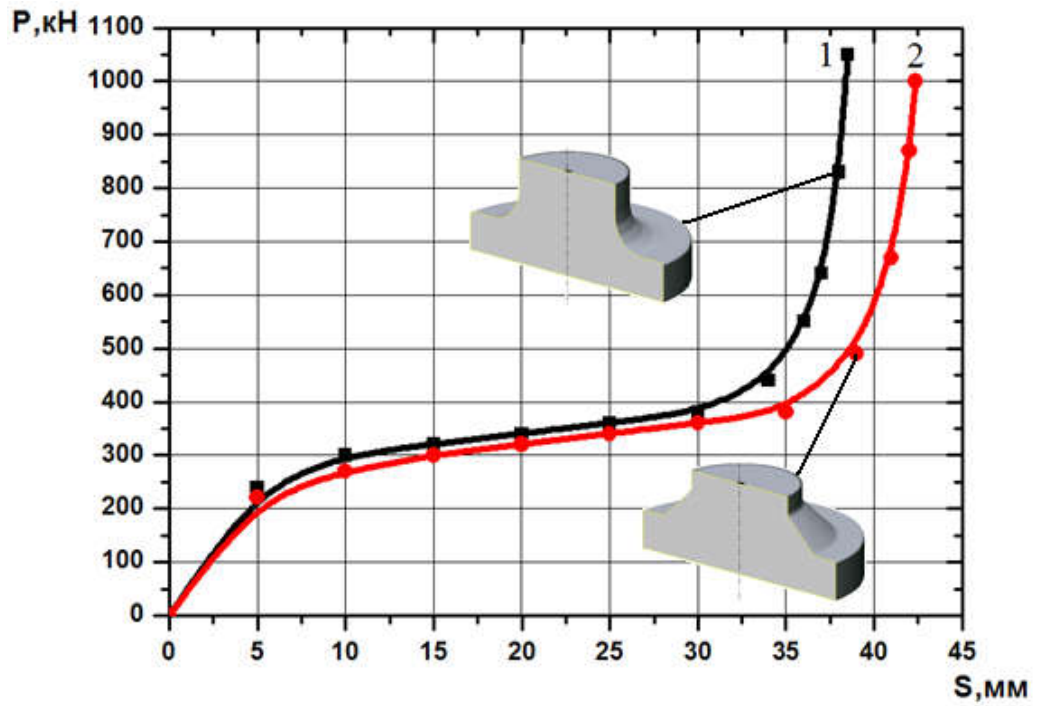
1 – $f=2$ мм; 2 – $f=6$ мм; 3 – $f=10$ мм

Рисунок 4.8 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях фаски



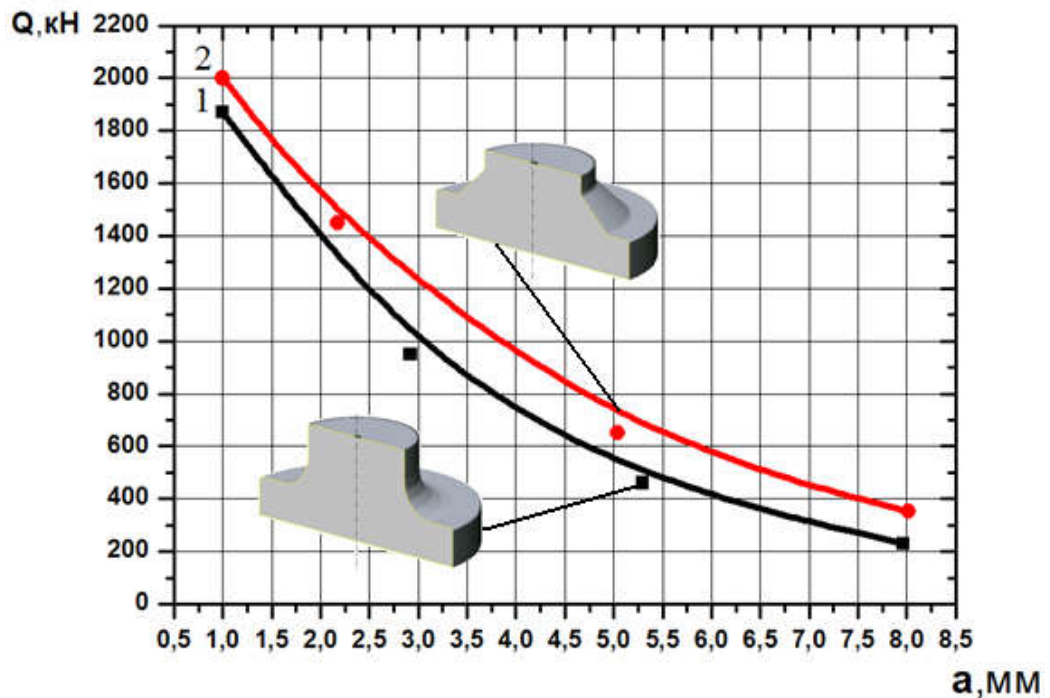
1 – $f=2$ мм; 2 – $f=6$ мм; 3 – $f=10$ мм

Рисунок 4.9 – Графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» при різних значеннях фаски



1 – $r=10$ мм; 2 – $f=10$ мм

Рисунок 4.10 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях радіусу заокруглення та фаски



1 – $r=10$ мм; 2 – $f=10$ мм

Рисунок 4.11 – Графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» при різних значеннях радіусу заокруглення та фаски

4.1.3 Особливості формоутворення заготовок при радіальному видавлюванні в конічну порожнину

Отримання фланців на торці стрижня в закритих матрицях супроводжується великими навантаженнями на робочий інструмент та незаповненням кутів приймальної порожнини. З метою зниження сили розкриття матриці та поліпшення течії металу в радіальному напрямку, проведено скінчено-елементе моделювання з різною геометрією півматриць, що враховує певні комбінації типорозмірів отримуваних деталей. На рис. 4.12 представлені моделювання схеми (а) і отриманий напівфабрикат (б).

Обрані наступні параметри для моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці стрижня:

– геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R – радіус фланця ($R=36$ мм), R_i – проміжний радіус фланця, r – радіус заокруглення кромки інструменту ($r=2$ мм), L – висота заготовки ($L=70$ мм), $H/R_0=0,75; 0,85; 0,95$ (для схеми 1) і $H/R_0=0,2; 0,25; 0,3$ (для схеми 2).

– Силкові параметри процесу: P – сила видавлювання процесу, Q – сила розкриття матриці, V – швидкість процесу видавлювання.

4.1.3.1 Моделювання напруженого і деформованого стану

На рис. 4.13 та 4.14 представлені результати моделювання процесу радіального видавлювання при $H/R_0=0,95$ (для схеми 1) і $H/R_0=0,3$ (для схеми 2) такі, як викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б) і напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування.

Розподіл інтенсивності деформації показує, що максимальне значення зосереджено в нижній частині осередку деформації (на рисунку 4.13 – $\varepsilon_i=3,8$; і на рисунку 4.14 – $\varepsilon_i=3,2$), а також видно з розподілу інтенсивності напружень максимальне значення для двох схем $\sigma_i=200$ МПа ($R_i/R_0=2$).

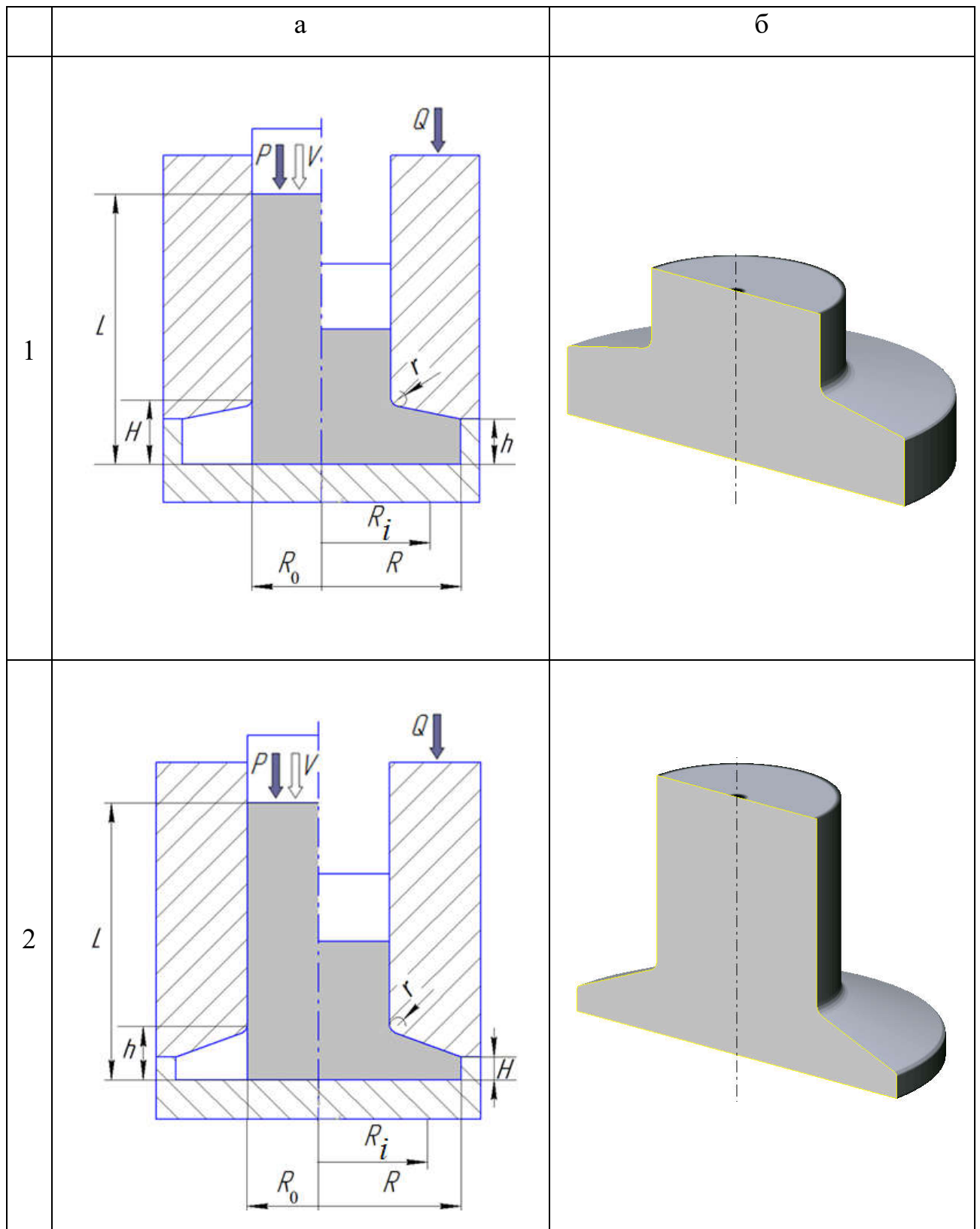


Рисунок 4.12 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці стрижня (а), з різними параметрами кута інструмента півматриці $H/R_0=0,75; 0,85; 0,95$ (1) і $H/R_0=0,2; 0,25; 0,3$ (2) з односторонньою подачею і отриманим напівфабрикатом (б) $h/R_0=0,65$

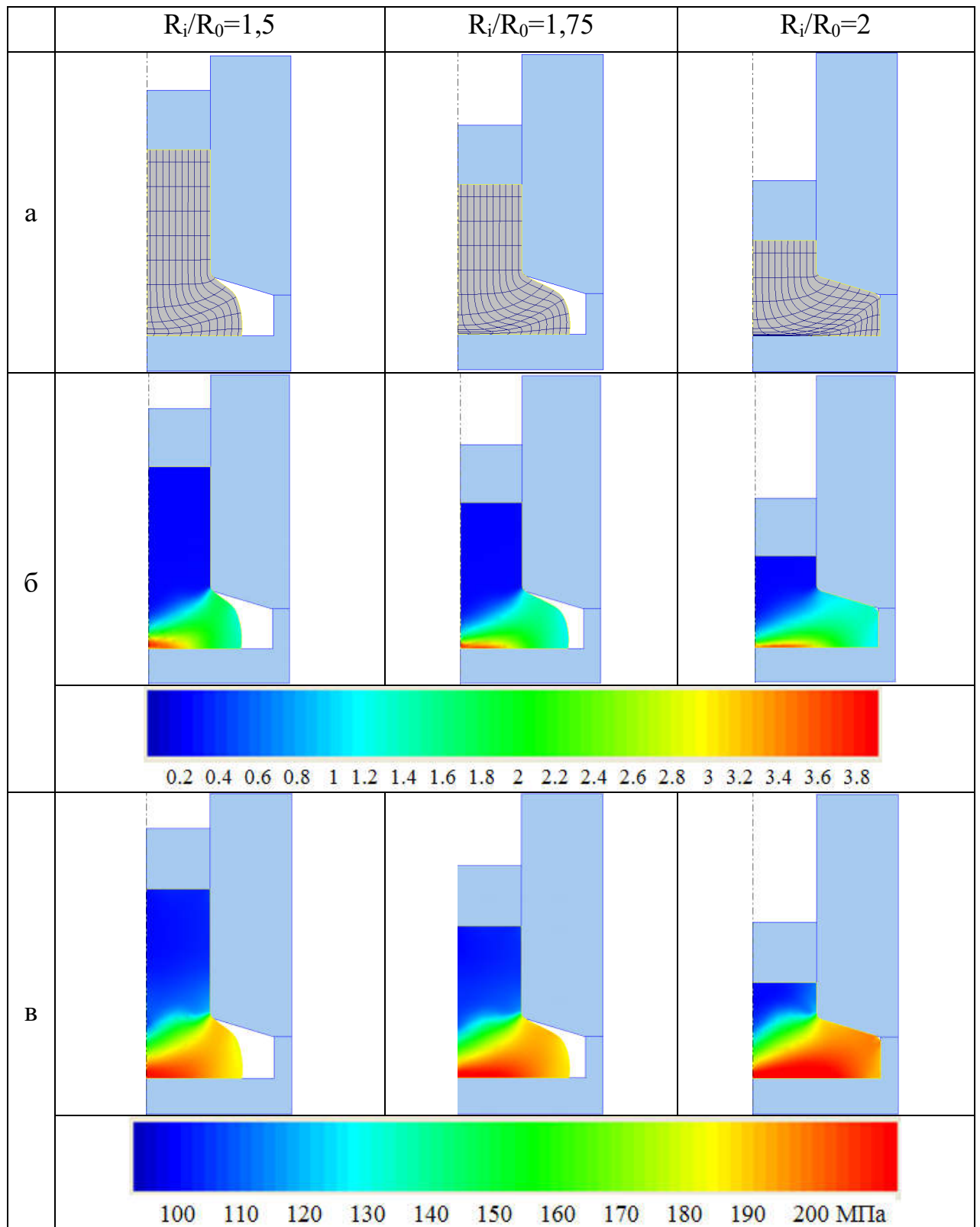


Рисунок 4.13 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/H=0,95$; $r=2$ мм и $\mu=0,08$

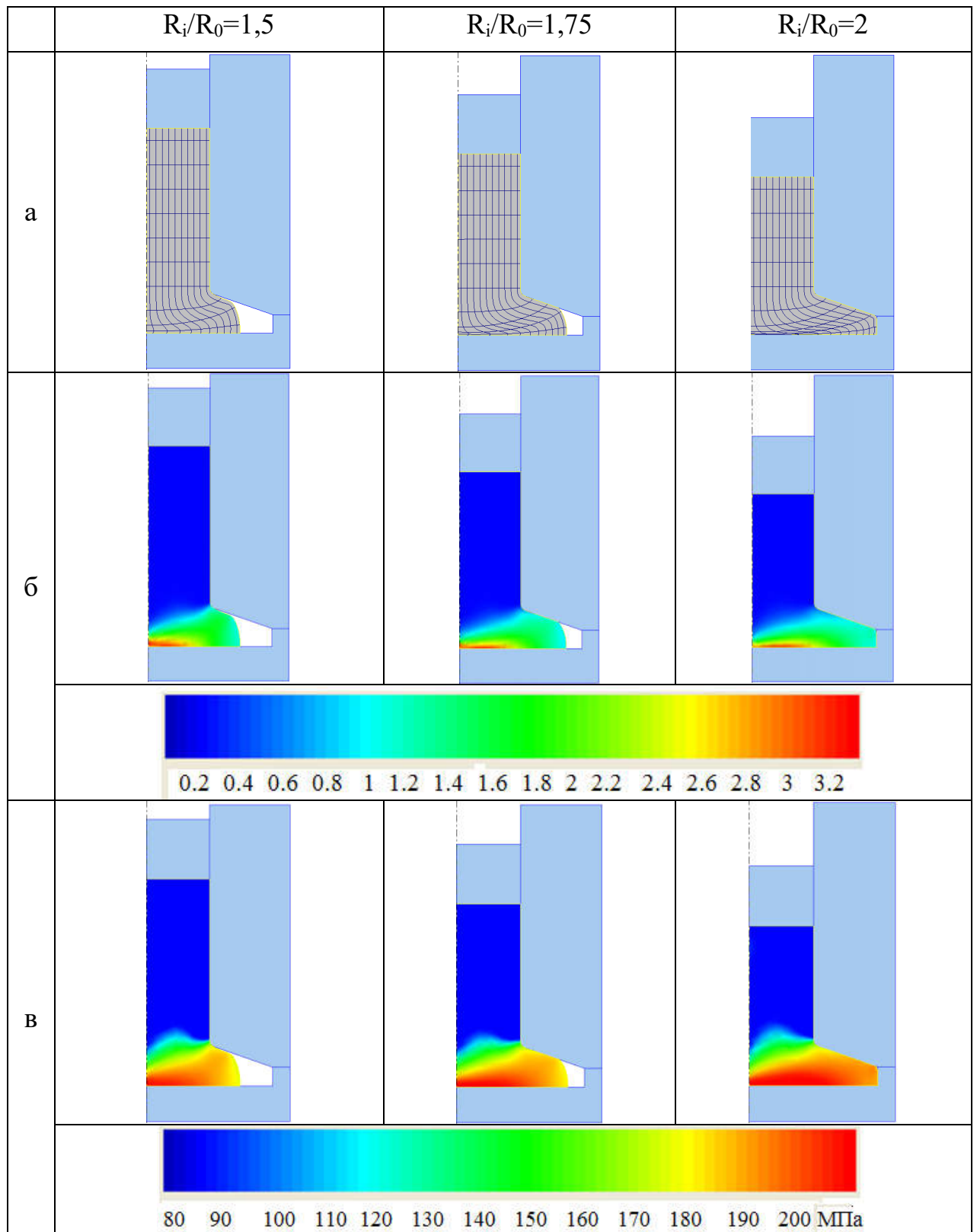


Рисунок 4.14 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $H/h=0,3$; $r=2$ мм и $\mu=0,08$

4.1.3.2 Моделювання силового режиму

Досліджена залежність сили видавлювання від ходу пуансона (рис. 4.15) в певному інтервалі значень $H/R_0=0,75; 0,85; 0,95$.

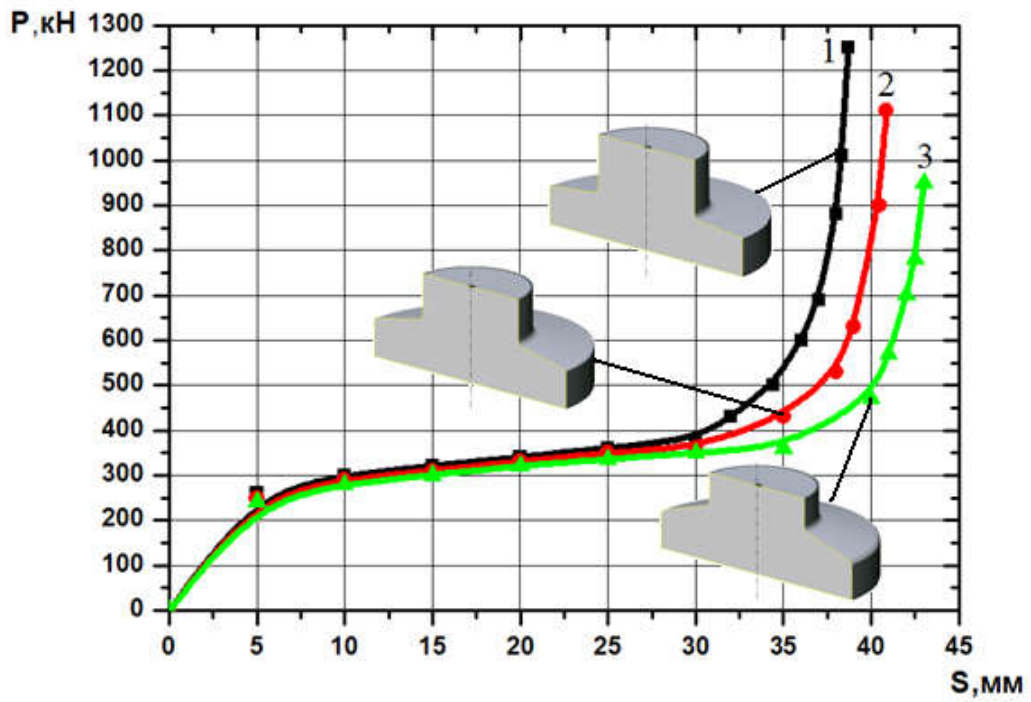
З графіка залежності сили процесу видавлювання від ходу пуансона (див. рис. 4.15) видно, що для кожного значення ($H/R_0=0,75; H/R_0=0,85; H/R_0=0,95$) відбувається плавне збільшення сили до позначки ходу $S=35$ мм, а після цього сила процесу різко зростає і при $H/R_0=0,75$ дорівнює $P=1250$ кН з ходом пуансона $S=38$ мм, при $H/R_0=0,85$ дорівнює $P=1100$ кН з ходом пуансона $S=41$ мм, при $H/R_0=0,95$ дорівнює $P=950$ кН з ходом пуансона $S=43$ мм.

При ході пуансона 35 мм видно, що при $H/R_0=0,75$ – $P=550$ кН, при $H/R_0=0,85$ – $P=450$ кН, при $H/R_0=0,95$ – $P=390$ кН.

Представлений графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» (рис. 4.16) з якого видно, що зі збільшенням параметра незаповнення «а» сила розкриття зменшується. Наприклад, з параметром незаповнення «а»=1 мм при $H/R_0=0,75$ сила розкриття досягає значення $Q=1500$ кН, при $H/R_0=0,85$ – $Q=1700$ кН, при $H/R_0=0,95$ – $Q=1900$ кН. На кривій 1 ми бачимо, що при параметрі незаповнення «а»=5 мм – $Q=100$ кН, на кривій 2 при «а»=5,3 мм – $Q=150$ кН, на кривій 3 при «а»=5,6 мм – $Q=200$ кН.

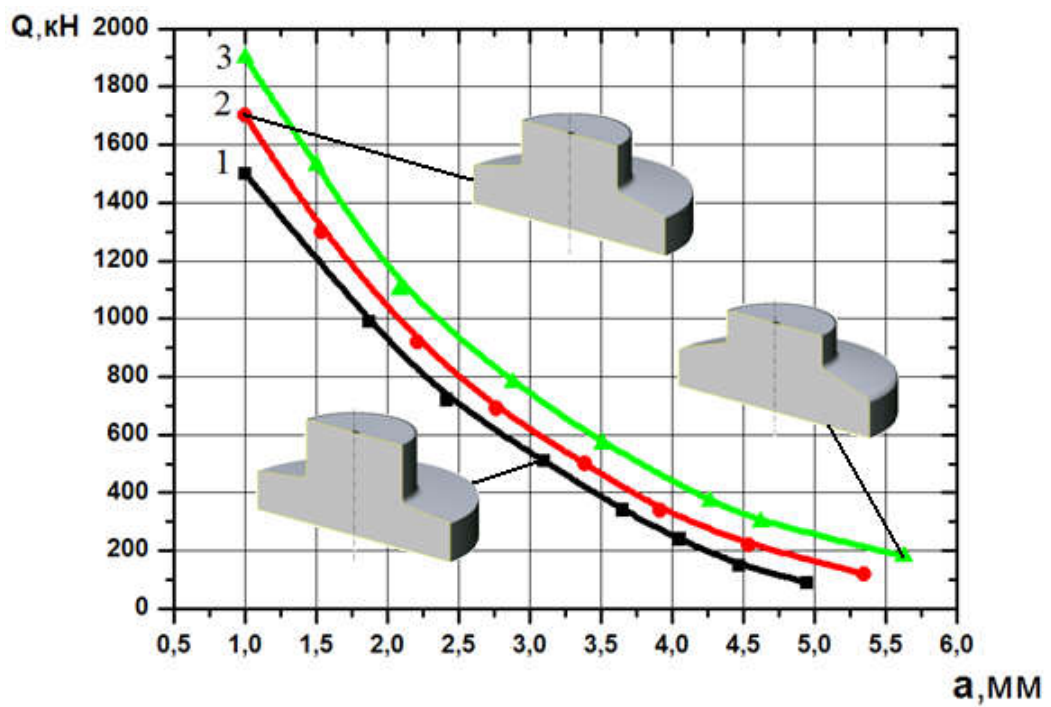
На рис. 4.17 представлений графік залежності сили процесу від ходу пуансона при $H/R_0=0,2; 0,25; 0,3$ з якого видно, що до позначки ходу $S=20$ мм значення сили кожної кривої плавно збільшується. Наприклад, для $H/R_0=0,2$ – $P=490$ кН, для $H/R_0=0,25$ – $P=450$ кН і для $H/R_0=0,3$ – $P=400$ кН. Потім сила різко зростає досягаючи значення при $H/R_0=0,2$ – $P=1000$ кН з ходом $S=22$ мм, при $H/R_0=0,25$ – $P=990$ кН з ходом $S=23$ мм, при $H/R_0=0,3$ – $P=960$ кН з ходом $S=25$ мм.

З графіка видно, що при збільшенні ходу пуансона збільшується потік матеріалу, що деформується, і відповідно збільшується сили процесу.



1 – $H/R_0=0,75$; 2 – $H/R_0=0,85$; 3 – $H/R_0=0,95$; $h/R_0=0,65$, $r=2$ мм

Рисунок 4.15 – Графік залежності сили процесу видавлювання від ходу пуансона при різних значеннях H/R_0



1 – $H/R_0=0,75$; 2 – $H/R_0=0,85$; 3 – $H/R_0=0,95$; $h/R_0=0,65$, $r=2$ мм

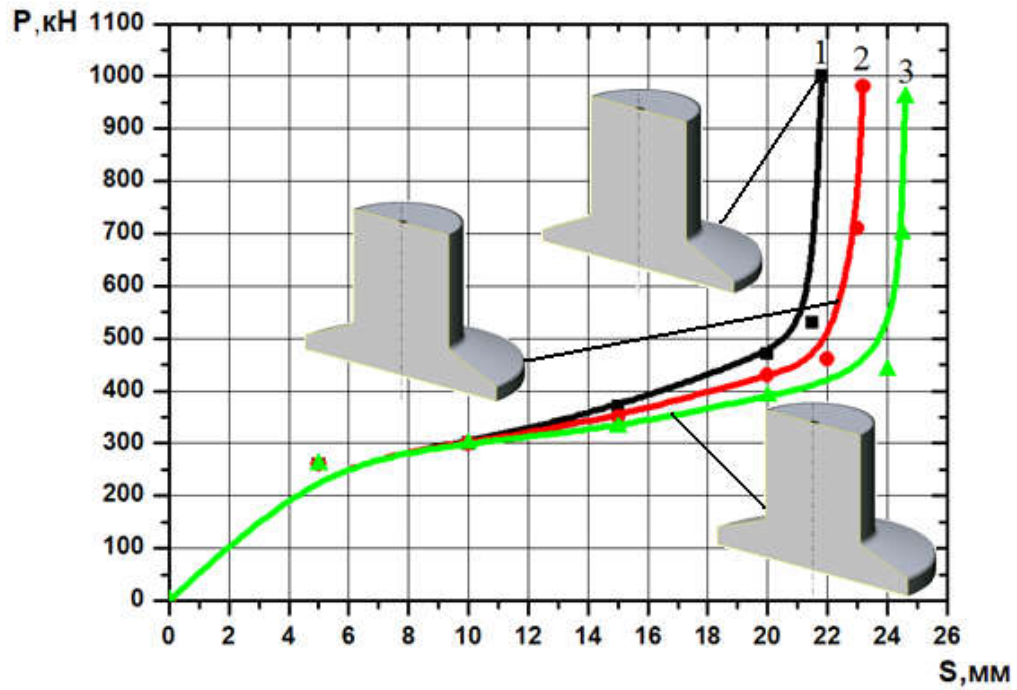
Рисунок 4.16 – Графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» при різних значеннях H/R_0

Криві (див. рис. 4.17), складаються з трьох основних стадій. Перша стадія, в якій відбувається початкове стиснення і розпресування заготовки; друга стадія - поступове збільшення навантаження і заповнення фланця до моменту торкання торця з боковою поверхнею порожнини матриці. На третій стадії навантаження різко зростає на невеликому ході процесу і відбувається заповнення кутів порожнини матриці.

На початковій стадії процесу, коли заготовка має найбільшу висоту і площу контакту, сили тертя заготовки призводять до того, що тиск в півматриці виходить позитивним, тобто сила направлена в напрямку руху пуансона. Після того, як починається заповнення поперечної порожнини, помітне різке зростання тиску в півматриці. Це пов'язано зі збільшенням значення стискаючих окружних напружень («прагнення» фланця збільшитися по висоті), зі збільшенням площі контакту металу з торцем півматриці, а також зі зміцненням металу в осередку деформування.

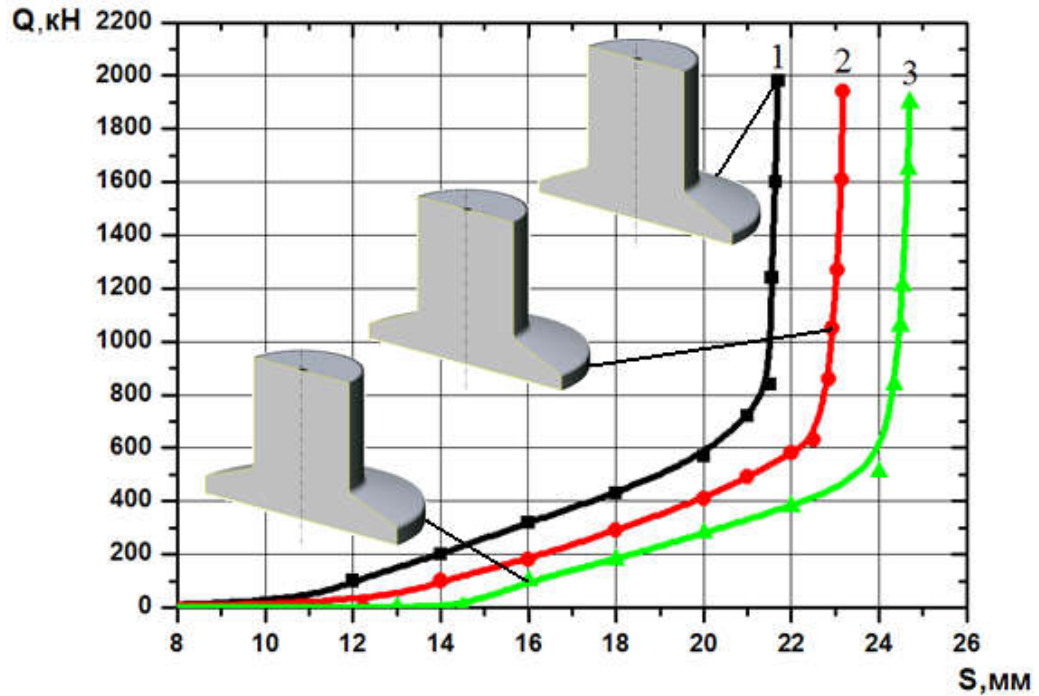
На рис. 4.18 представлений графік залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона, з якого видно, що для $H/R_0=0,2$ відбувається плавне збільшення сили розкриття до позначки ходу $S=21$ мм – $Q=700$ кН, а після цього сила розкриття різко зростає і досягає значення $Q=2000$ кН при $S=21,5$ мм. Для $H/R_0=0,25$ відбувається плавне збільшення сили до позначки ходу $S=22$ мм – $Q=600$ кН, а після цього сила розкриття різко зростає і досягає значення $Q=1950$ кН при $S=23$ мм. Для $H/R_0=0,3$ відбувається плавне збільшення сили до позначки ходу $S=23,5$ мм – $Q=500$ кН, а після цього сила розкриття різко зростає і досягає значення $Q=1900$ кН при $S=25$ мм.

Графіки залежності сили процесу закритого видавлювання в півматриці від відносної величини R_i/R_0 при $h/R_0=0,65$ представлені на рис. 4.19, 4.20. З цих графіків видно, що сила зі збільшенням відносної величини R_i/R_0



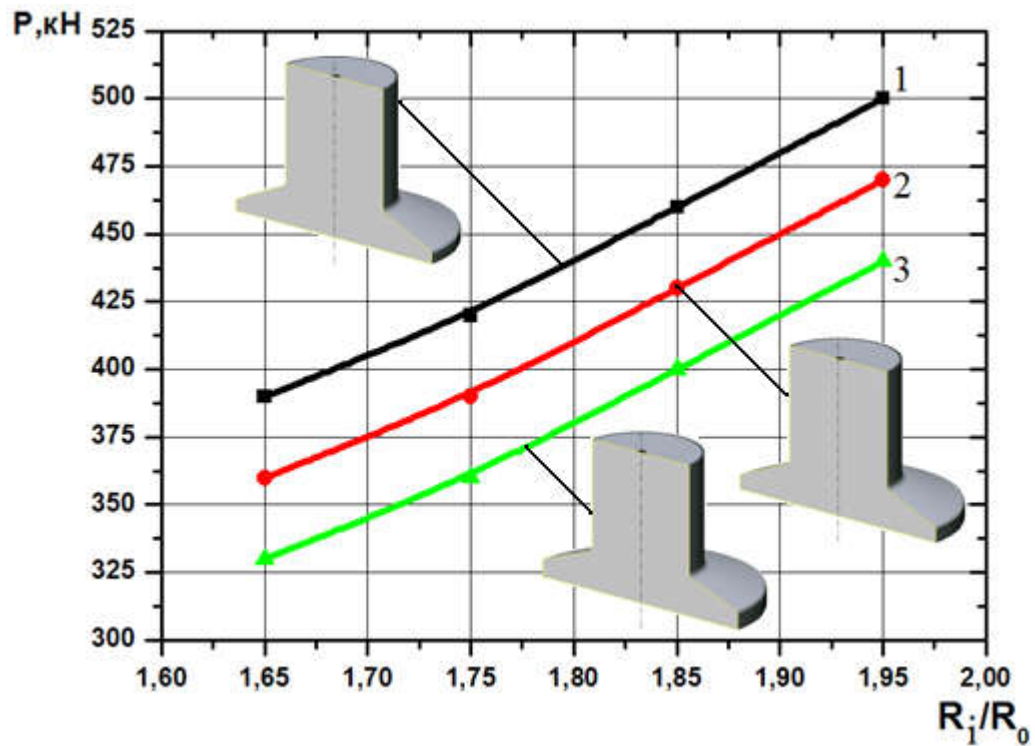
1 – $H/R_0=0.2$; 2 – $H/R_0=0.25$; 3 – $H/R_0=0.3$; $h/R_0=0.65$, $r=2$ мм

Рисунок 4.17 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях H/R_0



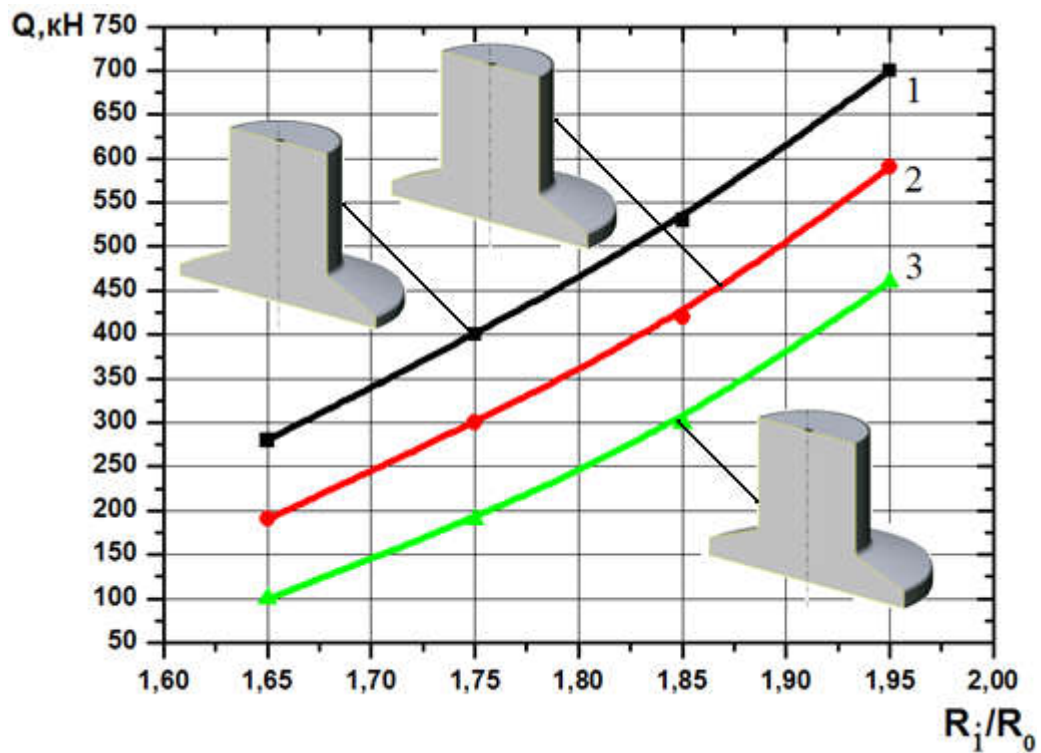
1 – $H/R_0=0.2$; 2 – $H/R_0=0.25$; 3 – $H/R_0=0.3$; $h/R_0=0.65$, $r=2$ мм

Рисунок 4.18 – Графік залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона при різних значеннях H/R_0



1 – $H/R_0=0,2$; 2 – $H/R_0=0,25$; 3 – $H/R_0=0,3$

Рисунок 4.19 – Графік залежності сили процесу видавлювання від відносної величини R_i/R_0 при різних значеннях H/R_0 з $h/R_0=0,65$



1 – $H/R_0=0,2$; 2 – $H/R_0=0,25$; 3 – $H/R_0=0,3$

Рисунок 4.20 – Графік залежності сили в півматриці від відносної величини R_i/R_0 при різних значеннях H/R_0 з $h/R_0=0,65$

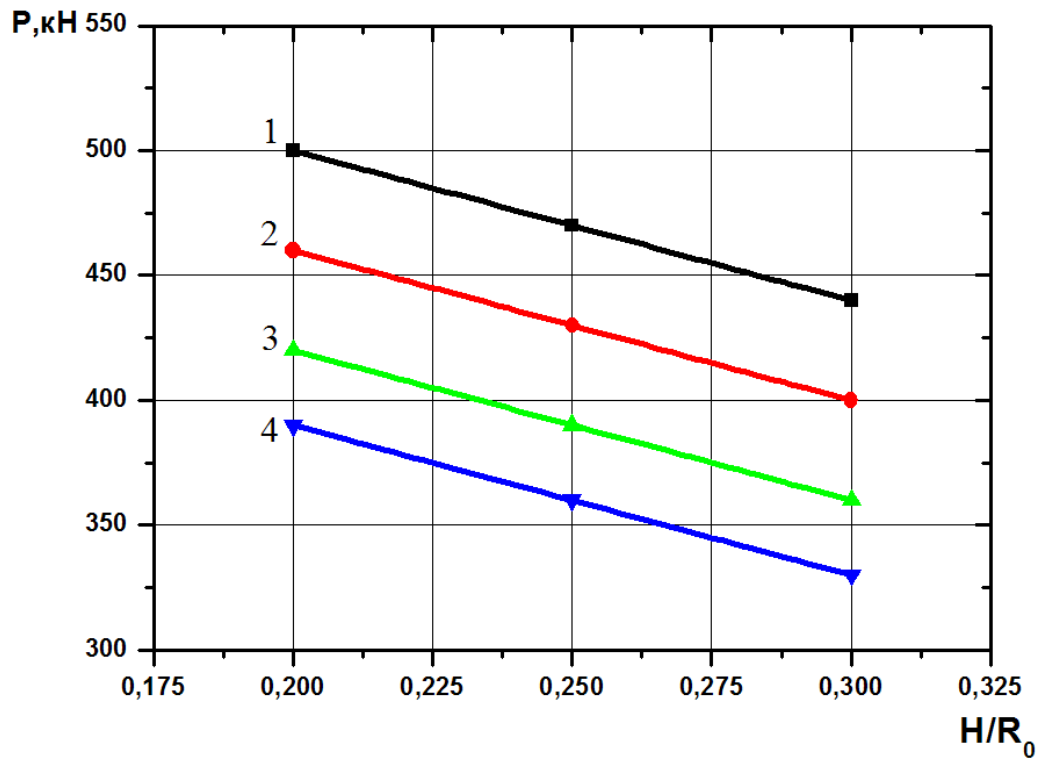
збільшується в певному значенні відносної величини H/R_0 . Це пов'язано з тим, що збільшення відносного параметра R_i/R_0 призводить до збільшення кількості металу, який заповнює порожнину фланця.

Така зміна виходить за рахунок зміни напруженого стану при радіальному видавлюванні. Так само збільшується контактна поверхня тертя з верхньої півматриці. Виходячи з графіка (див. рис. 4.19) видно, що при відносній величині $R_i/R_0=1,85$ сила процесу видавлювання при $H/R_0=0,2$, дорівнює $P=460$ кН; при $H/R_0=0,25$ $P=430$ кН і при $H/R_0=0,3$ – $P=400$ кН.

На графіку (див. рис. 4.20) показано, що при відносній величині $R_i/R_0=1,85$ сила в півматриці для $H/R_0=0,2$ дорівнює $Q=540$ кН; для $H/R_0=0,25$ – $Q=430$ кН і для $H/R_0=0,3$ – $Q=300$ кН. А також, в результаті моделювання побудовані графіки залежності сили процесу видавлювання в півматриці від відносної величини H/R_0 при $h/R_0=0,65$, які представлені на рис. 4.21, 4.22. З отриманих даних видно, що сила зі збільшенням відносної величини H/R_0 зменшується за рахунок зниження можливості перебігу матеріалу в радіальному напрямку при певному значенні відносної величини R_i/R_0 . При відносній величині $H/R_0=0,25$ сила процесу видавлювання при $R_i/R_0=1,95$ дорівнює $Q=470$ кН; при $R_i/R_0=1,85$ – $Q=430$ кН; при $R_i/R_0=1,75$ – $Q=390$ кН і при $R_i/R_0=1,65$ – $Q=360$ кН (див. рис. 4.21), і сила в півматриці при $R_i/R_0=1,95$ дорівнює $Q=590$ кН; при $R_i/R_0=1,85$ – $Q=420$ кН; при $R_i/R_0=1,75$ – $Q=300$ кН і при $R_i/R_0=1,65$ – $Q=190$ кН (див. рис. 4.22).

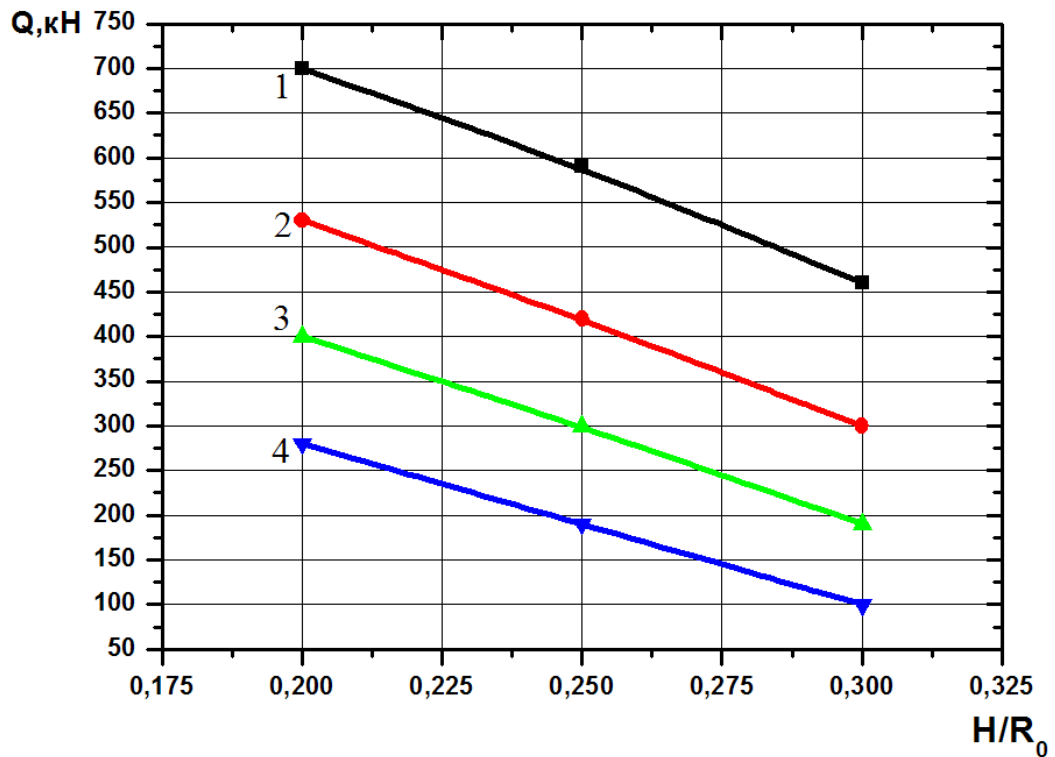
4.1.4 Модель процесу радіального видавлювання фланця з компенсатором

Використання закритих схем видавлювання є доцільним методом отримання точних виробів. Проте, так схема деформування може призвести до заклинювання та навіть руйнування штампів з дорогого металу. Для вирішення цих питань на виробництві застосовують компенсатори.



1 – $R_i/R_0=1,95$; 2 – $R_i/R_0=1,85$; 3 – $R_i/R_0=1,75$; 4 – $R_i/R_0=1,65$

Рисунок 4.21 – Графік залежності сили процесу видавлювання від відносної величини H/R_0 при різних значеннях R_i/R_0 з $h/R_0=0,65$



1 – $R_i/R_0=1,95$; 2 – $R_i/R_0=1,85$; 3 – $R_i/R_0=1,75$; 4 – $R_i/R_0=1,65$

Рисунок 4.22 – Графік залежності сили в півматриці від відносної величини H/R_0 при різних значеннях R_i/R_0 з $h/R_0=0,65$

Теоретичний аналіз впливу компенсатора на протікання технологічного процесу проводився як методом скінченних елементів, так і методом енергетичного балансу потужностей. На рисунку 4.23 розглядаються схеми закритого радіального видавлювання з компенсатором з односторонньою подачею, одна половина схеми (а) і отриманий напівфабрикат (б).

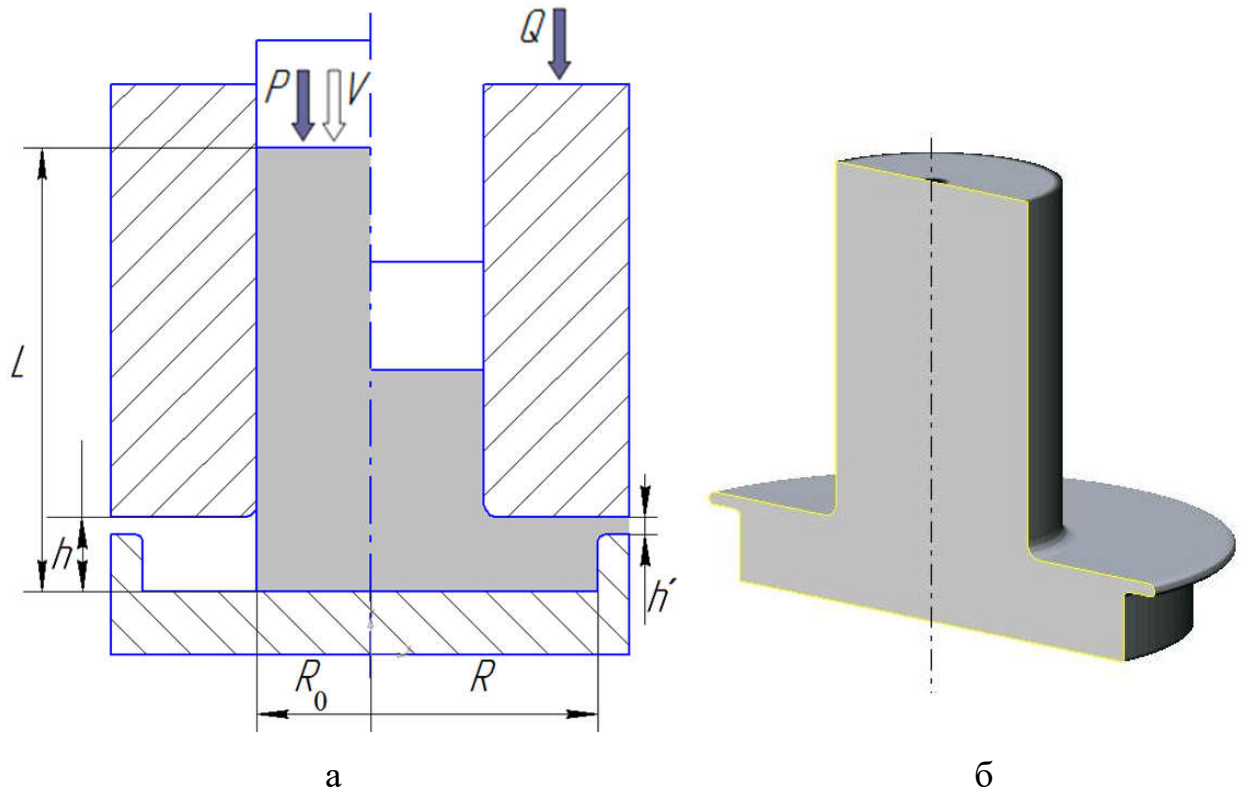


Рисунок 4.23 – Схема процесу радіального видавлювання фланця на торці стрижня (а) з різною відносною висотою компенсатора інструменту з односторонньою подачею і отриманим напівфабрикатом (б)

Обрані наступні параметри для моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці стрижня:

– геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R – радіус фланця ($R=36$ мм), h – висота приймальної порожнини для видавлюємого фланця, h/R_0 – відносна висота фланця ($h/R_0=0,65$), h' – висота компенсатора інструменту, h'/h – відносна висота компенсатора ($h'/h=0,8; 1,2; 1,6$), r – радіус заокруглення кромки інструменту ($r=2$ мм), L – висота заготовки ($L=70$ мм).

Силові параметри процесу: P – сила видавлювання процесу, Q – сила розкриття матриці, V – швидкість процесу видавлювання.

4.1.4.1 Моделювання напруженого і деформованого стану

На рис. 4.24 представлені результати моделювання процесу радіального видавлювання при $h/R_0=0,65$, такі, як викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б) і напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування.

Розподіл інтенсивності деформації показує, що максимальне її значення зосереджене в нижній частині осередку деформації (див. рис. 4.24 $\varepsilon_i=4,5$). А також видно з розподілу інтенсивності напружень максимальне значення $\sigma_i=200$ МПа ($h/R_0=0,1$).

4.1.4.2 Моделювання силового режиму

З графіка залежності сили процесу від ходу пуансона (рис. 4.25) видно, що в кожному зі значень відносної висоти компенсатора до висоти фланця ($h'/h=0,8; 1,2; 1,6$) відбувається плавне збільшення сили до позначки ходу $S=28$ мм, а потім сила різко зростає і досягає значення при $h'/h=0,8$ – $P=1350$ кН з ходом пуансона $S=36$ мм, при $h'/h=1,2$ – $P=1200$ кН з ходом пуансона $S=37$ мм, при $h'/h=1,6$ – $P=1350$ кН з ходом пуансона $S=37$ мм.

На рис. 4.26 представлений графік залежності сили розкриття півматриці від ходу пуансона з якого видно, що для кожного із значень відносної висоти компенсатора до висоти фланця ($h'/h=0,8; 1,2; 1,6$) відбувається плавне збільшення сили яке досягає значення $P=700$ кН до позначки ходу $S=34,5$ мм, а потім сила різко зростає і досягає значення при $h'/h=0,8$ – $P=2500$ кН з ходом пуансона $S=36,6$ мм. При $h'/h=1,2$ – $P=1950$ кН з ходом пуансона $S=36,6$ мм. При $h'/h=1,6$ – $P=1600$ кН з ходом пуансона $S=36,7$ мм.

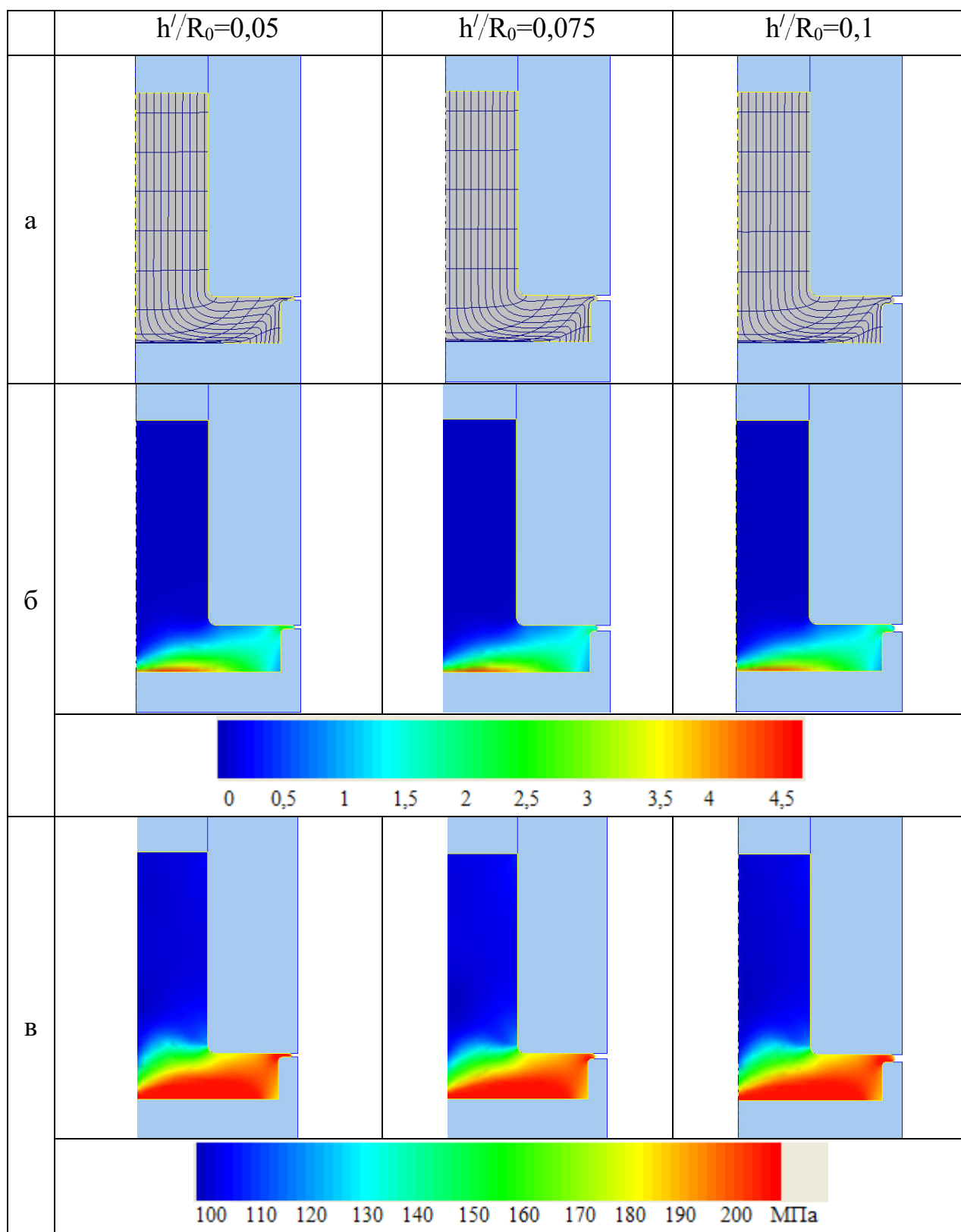
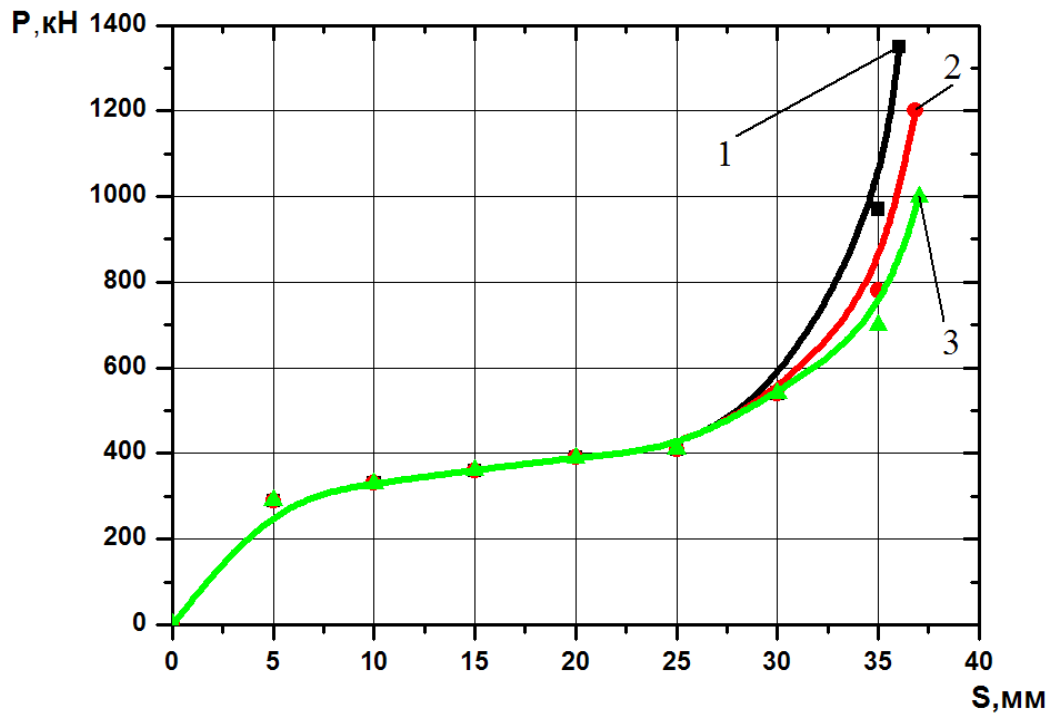
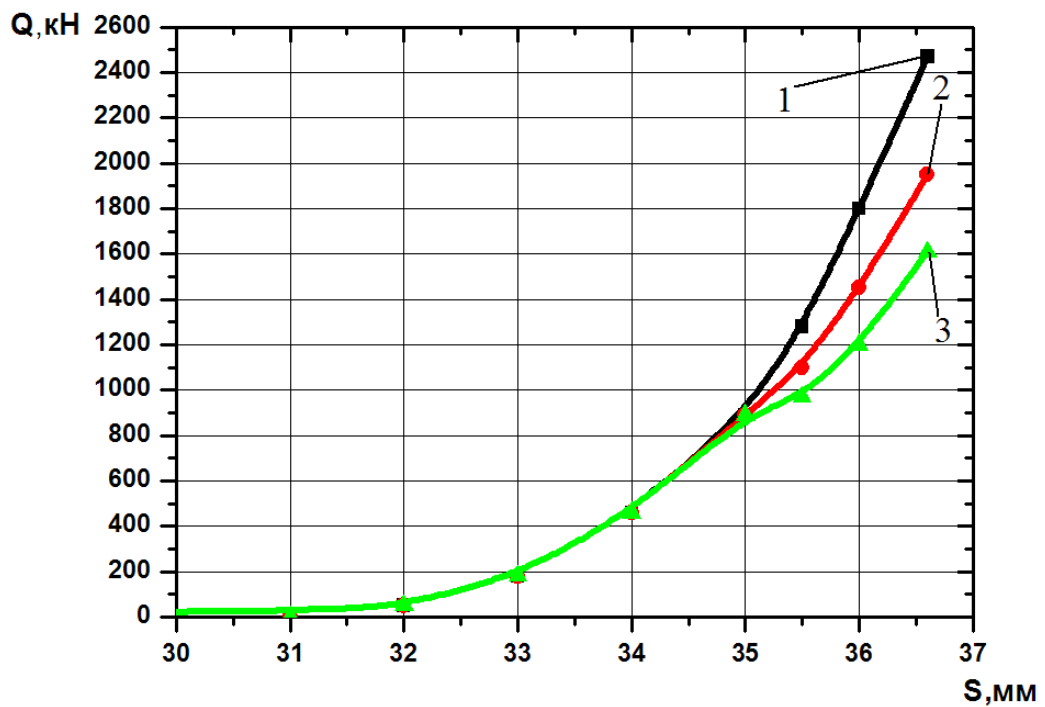


Рисунок 4.24 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$



1 – $h'/h=0,8$; 2 – $h'/h=1,2$; 3 – $h'/h=1,6$; $r=2$ мм

Рисунок 4.25 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях відносної висоти компенсатора



1 – $h'/h=0,8$; 2 – $h'/h=1,2$; 3 – $h'/h=1,6$; $r=2$ мм

Рисунок 4.26 – Графік залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона при різних значеннях відносної висоти компенсатора

Розташування компенсатора в схемі радіального навантаження можливе і в верхній півматриці. Така конструкція дещо спрощує конструкції затискних механізмів, особливо при двосторонній подачі. Для оцінки силових характеристик на особливості формоутворення при радіальному видавлюванні з компенсатором, що розташований перпендикулярно до радіального напрямку течії металу, розглянемо осесиметричну задачу на основі енергетичного методу балансу потужностей (рис. 4.27). Суть методу полягає у виборі кінематично можливого поля швидкостей, яке б відповідало граничним умовам, умові нестисненості матеріалу і визначенні потужності сил, що входять в рівняння енергетичного балансу.

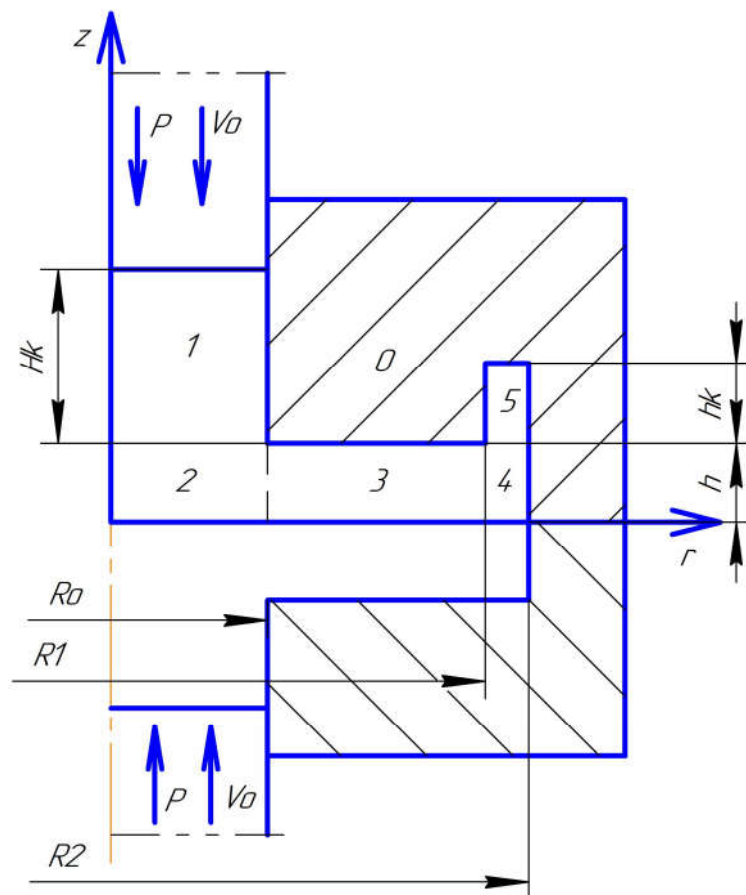


Рисунок 4.27 – Схема розбивки осередка деформування на жорсткі модулі

Зона 1 є жорсткою і переміщається разом з інструментом. У зонах 2,3

та 4 відбувається деформування, для них необхідно скласти кінематичні граничні умови (табл. 4.1). Зона 5 описує компенсатор.

На основі загального виду кінематично можливого поля швидкостей для осесиметричної задачі:

$$\begin{cases} V_z = C_1 \cdot z + C_2 \\ V_r = -\frac{C_1}{2}r + \frac{C_3}{r} \end{cases}, \quad (4.1)$$

визначаємо постійні інтегрування C_1, C_2, C_3 (табл. 4.2).

Швидкості деформації (табл. 4.3) визначаємо за співвідношенням Коші, які мають вигляд :

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad (4.2)$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad (4.3)$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r}. \quad (4.4)$$

Для знаходження інтенсивності деформації (табл. 4.4) скористаємося виразом:

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\theta^2 + \dot{\varepsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{v}_{r_z}^2}. \quad (4.5)$$

Для знаходження приведенного тиску деформування знаходимо значення сил деформування, тертя та зрізу.

$$N_a = p \cdot [V_0 R_0^2 \pi], \quad (4.6)$$

Таблиця 4.1 – Кінематичні граничні умови осередку деформування

Зона	Координата	Значення швидкості
2	$z = h$	$V_z = -V_0;$
	$r = R_0$	$V_r = -\frac{V_0 R_0}{2h}$
3	$r = R_0$	$V_r = \frac{V_0 R_0}{2h}$
	$r = R_1$	$V_r = \frac{V_0 R_0^2}{2h R_1}$
4	$z = h$	$V_z = \frac{V_0 R_0^2}{R_2^2 - R_1^2}$
	$r = R_1$	$V_r = \frac{V_0 R_0^2}{2h R_1}$
5	$z = h$	$V_z = \frac{V_0 R_0^2}{R_2^2 - R_1^2}$

Таблиця 4.2 – Кінематично можливі поля швидкостей (КВПШ) в осередку деформування

Зона	КВПШ
2	$\begin{cases} V_z = -\frac{V_0}{h}z \\ V_r = \frac{V_0}{2h}r \end{cases}$
3	$\begin{cases} V_z = 0 \\ V_r = \frac{V_0 R_0^2}{2h}r \end{cases}$
4	$\begin{cases} V_z = \frac{V_0 R_0^2}{(R_2^2 - R_1^2)h}z \\ V_r = \frac{V_0 R_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)h} \left(\frac{R_2^2 - r^2}{r} \right) \end{cases}$
5	$\begin{cases} V_z = \frac{V_0 R_0^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \\ V_r = 0 \end{cases}$

Таблиця 4.3 – Значення швидкостей деформації

Зона	Значення
2	$\dot{\varepsilon}_r = \frac{V_0}{2h}$
	$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_0}{2h}$
	$\dot{\varepsilon}_z = -\frac{V_0}{h}$
3	$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_0 R_0^2}{2hr^2}$
	$\dot{\varepsilon}_r = -\frac{V_0 R_0^2}{2hr^2}$
	$\dot{\varepsilon}_z = 0$
4	$\dot{\varepsilon}_r = -\frac{V_0 R_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)h} - \frac{V_0 R_0^2 R_2^2}{2(R_2^2 - R_1^2)hr^2}$
	$\dot{\varepsilon}_\theta = -\frac{V_0 R_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)h} + \frac{V_0 R_0^2 R_2^2}{2(R_2^2 - R_1^2)hr^2}$
	$\dot{\varepsilon}_z = \frac{V_0 R_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)h}$

Таблиця 4.4 – Інтенсивність деформації в осередку деформування

Зона	Значення
2	$\dot{\varepsilon}_i = \frac{2V_0}{\sqrt{3}h}$
3	$\dot{\varepsilon}_i = \frac{V_0 R_0^2}{\sqrt{3}hr^2}$
4	$\dot{\varepsilon}_i = \frac{V_0 R_0^2}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)h} + \frac{V_0 R_0^2 R_2^2}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)hr^2}$

$$N_{\partial 2} = \int_0^h \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \sigma_s \frac{2V_0}{\sqrt{3}h} r d\theta dr dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s, \quad (4.7)$$

$$N_{\partial 3} = \int_0^h \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \sigma_s \frac{V_0 R_0^2}{\sqrt{3}hr^2} r d\theta dr dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}
N_{\partial 4} &= \int_0^h \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \sigma_s \left(\frac{V_0 R_0^2}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)h} + \frac{V_0 R_0^2 R_2^2}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)hr^2} \right) r d\theta dr dz = \\
&= [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \sigma_s \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2R_2^2}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} \right]
\end{aligned} \tag{4.9}$$

$$N_{c1-2} = \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_0}{2h} r^2 d\theta dr = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_0}{3h}, \tag{4.10}$$

$$N_{c2-3} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_0}{h} z r d\theta dr = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{h}{R_0}, \tag{4.11}$$

$$N_{c3-4} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_0 R_0^2}{(R_2^2 - R_1^2)h} z r d\theta dr = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_1 h}{(R_2^2 - R_1^2)}, \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
N_{c4-5} &= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{V_0 R_0^2 r^2}{2(R_2^2 - R_1^2)h} + \frac{V_0 R_0^2 R_2^2}{2(R_2^2 - R_1^2)hr} \right) r d\theta dr = \\
&= [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{R_2 - R_1}{6h} + \frac{R_2^2}{2(R_2 + R_1)h} \right]
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$N_{m1-0} = \int_h^{H_k} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_s \sigma_s V_0 r d\theta dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \frac{H_k - h}{R_0}, \tag{4.14}$$

$$N_{m3-0} = \int_{R_0}^{R_1} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_s \sigma_s \frac{V_0 R_0^2}{2hr} r d\theta dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \frac{R_1 - R_0}{h}, \tag{4.15}$$

$$N_{m4-0} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_s \sigma_s \frac{V_0 R_0^2}{(R_2^2 - R_1^2)h} z r d\theta dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \frac{R_2 h}{(R_2^2 - R_1^2)}, \tag{4.16}$$

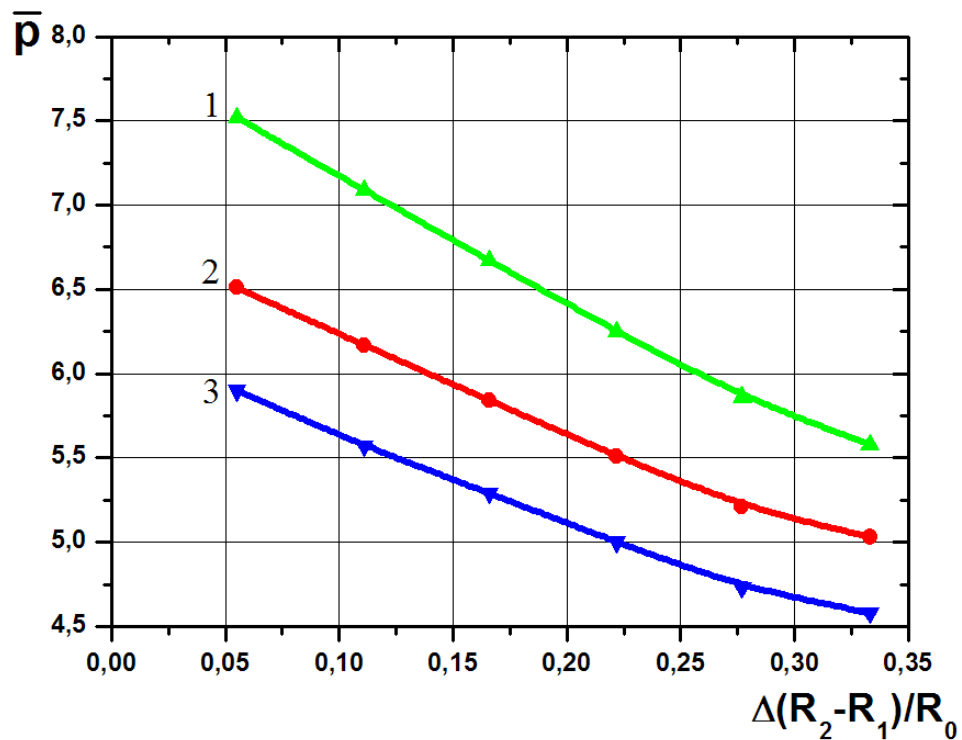
$$N_{m5-0} = \int_h^{h_k} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_s \sigma_s \frac{V_0 R_0^2}{(R_2^2 - R_1^2)} r d\theta dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \frac{R_1(h_k - h)}{(R_2^2 - R_1^2)}, \tag{4.17}$$

$$N_{m5-0}' = \int_h^{h_k} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_s \sigma_s \frac{V_0 R_0^2}{(R_2^2 - R_1^2)} r d\theta dz = [V_0 R_0^2 \pi] \cdot \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \frac{R_2(h_k - h)}{(R_2^2 - R_1^2)}, \tag{4.18}$$

Після скорочення рівняння балансу потужностей на потужність активних сил та σ_s загальне рівняння приведенного тиску буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{p} = & 1.08 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R_1}{R_0} + \left[\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2R_2^2}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} \right] + \frac{R_0}{3\sqrt{3}h} + \frac{h}{\sqrt{3}R_0} + \frac{R_1 h}{\sqrt{3}(R_2^2 - R_1^2)} + \\ & + \left[\frac{R_2 - R_1}{6\sqrt{3}h} + \frac{R_2^2}{2\sqrt{3}(R_2 + R_1)h} \right] + \frac{2\mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{H_k - h}{R_0} + \frac{2\mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_1 - R_0}{h} + \frac{2\mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_2 h}{(R_2^2 - R_1^2)} + \\ & + \frac{4\mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_1(h_k - h)}{(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{4\mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_2(h_k - h)}{(R_2^2 - R_1^2)} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Зміна силового режиму в даному процесі є класичною. При збільшенні відносних розмірів деталі збільшується сила деформування. Це спостерігалось за рахунок збільшення осередку деформування та поверхонь тертя і зрізу між прямолінійними модулями. Більшу інформацію несе графік, що відображає вплив розміру компенсатора на силові параметри видавлювання (рис. 4.28).



1 – $h_k/h=0,5$; 2 – $h_k/h=1,0$; 3 – $h_k/h=1,5$

Рисунок 4.28 – Графік залежності приведенного тиску видавлювання від відносного розміру компенсатора при різних значеннях відносної висоти компенсатора

4.1.5 Параметри процесу радіального видавлювання фланця з редукуванням

Надійність роботи штампів з закритими матрицями визначає рівень сили розкриття. Чим вище технологічна сила розкриття, тим жорсткішими повинні бути затискні вузли штампів і тим вище ймовірність їх заклинювання, викликана високими навантаженнями, що діють на затискний механізм.

Щоб зменшити вплив сили розкриття на роботу затискних вузлів, рекомендуються різні способи: силу розкриття можна зменшити силою тертя металу об стінки матриці, для цієї ж мети можна застосувати схеми видавлювання з суміщеними осередками деформації.

На рисунку 4.29 розглядаються схеми закритого радіального видавлювання фланця з редукуванням, одна половина схеми (а) і отриманий напівфабрикат (б).

Застосування суміщених операцій редукування і радіального видавлювання дозволяє знизити силу розкриття на величину, рівну силі редукування.

$$Q_{\Sigma} = Q_{rad} - P_{ред}, \quad (4.20)$$

де Q_{Σ} – сумарна сила розкриття; Q_{rad} – сила розкриття при радіальному видавлюванні; $P_{ред}$ – сила редукування.

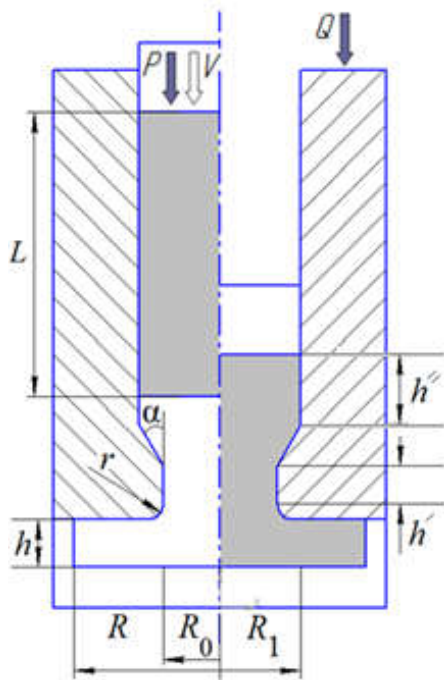
Тоді сумарна сила деформування буде складатися з сили редукування і сили радіального видавлювання:

$$P_{\Sigma} = P_{ред} + P_{rad}, \quad (4.21)$$

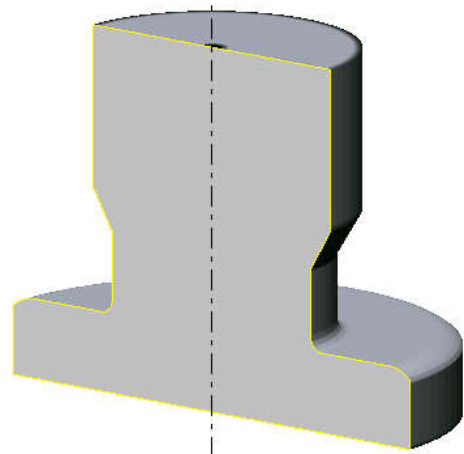
де P_{rad} – сила радіального видавлювання.

Обрані наступні параметри для моделювання процесу закритого радіального видавлювання з редукуванням фланця на торці стрижня: геометричні та силові параметри процесу.

Геометричні параметри процесу включають: R – радіус фланця ($R=36$ мм), R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R_1 – радіус отвору верхньої півматриці ($R=36$ мм), R_1/R_0 – відношення радіусів отворів верхньої півматриці і заготовки ($R_1/R_0=1,1; 1,2; 1,3$), h – висота приймальної порожнини для видавлюємого фланця верхньої півматриці ($h=36$ мм), h' – висота ділянки отвору верхньої півматриці з меншим радіусом R_1 ($h'=36$ мм), r – радіус заокруглення перехідної кромки матриці ($r=2$ мм), α – кут конуса в отворі верхньої півматриці ($\alpha=15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$), L – висота заготовки ($L=70$ мм).



а



б

Рисунок 4.29 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця (а) з редукуванням і отриманий напівфабрикат (б)

4.1.5.1 Моделювання напруженого і деформованого стану

Результати моделювання процесу представлені на рис. 4.30...4.32 при різному ході процесу ($S=9; 18; 29; 35; 44; 58$ мм), такі, як викривлення діляльної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б) і напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування.

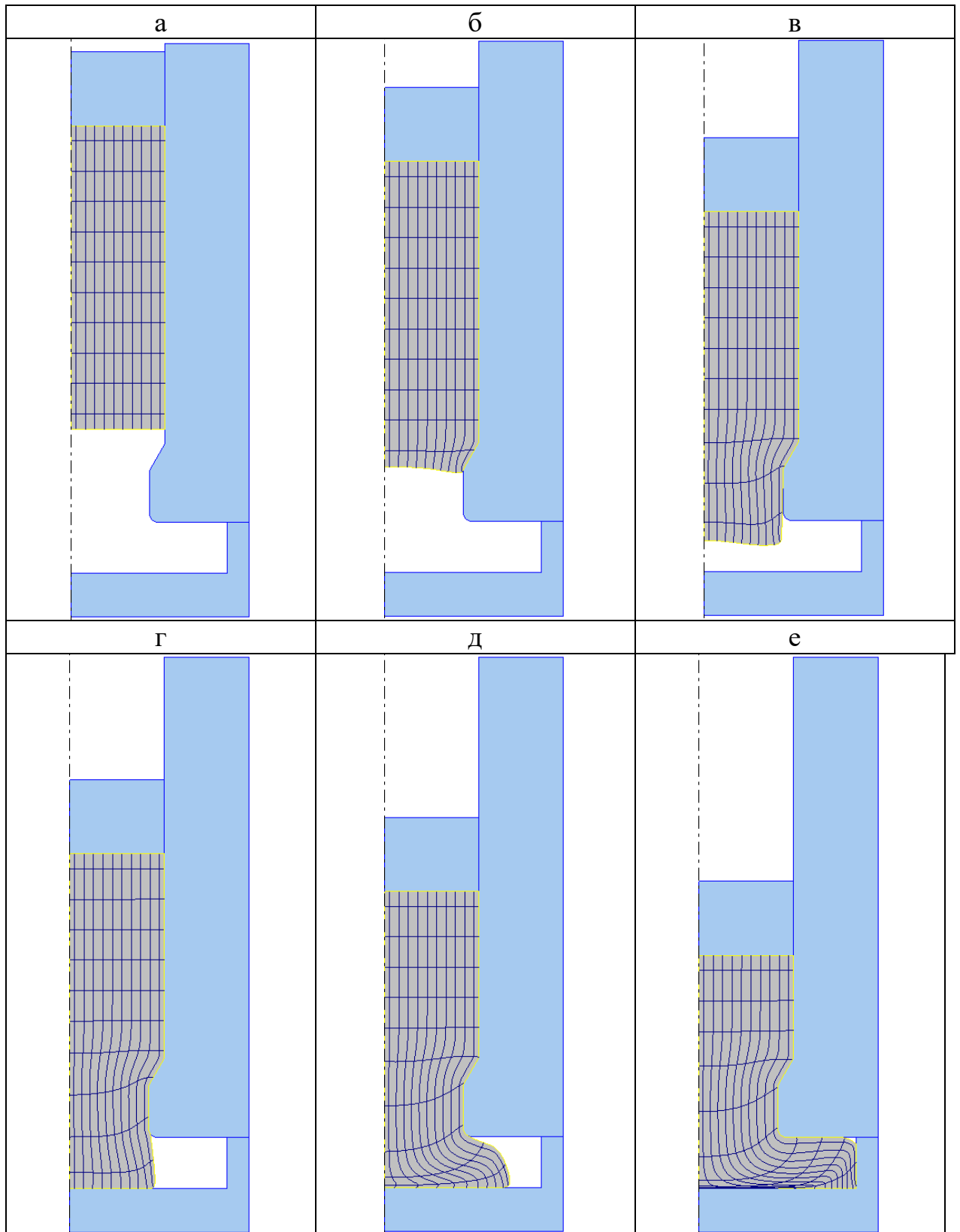


Рисунок 4.30 – Викривлення ділильної сітки по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з редукуванням з односторонньою подачею: $S=9$ мм (а), $S=18$ мм (б), $S=29$ мм (в), $S=35$ мм (г), $S=44$ мм (д), $S=58$ мм (е), при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$

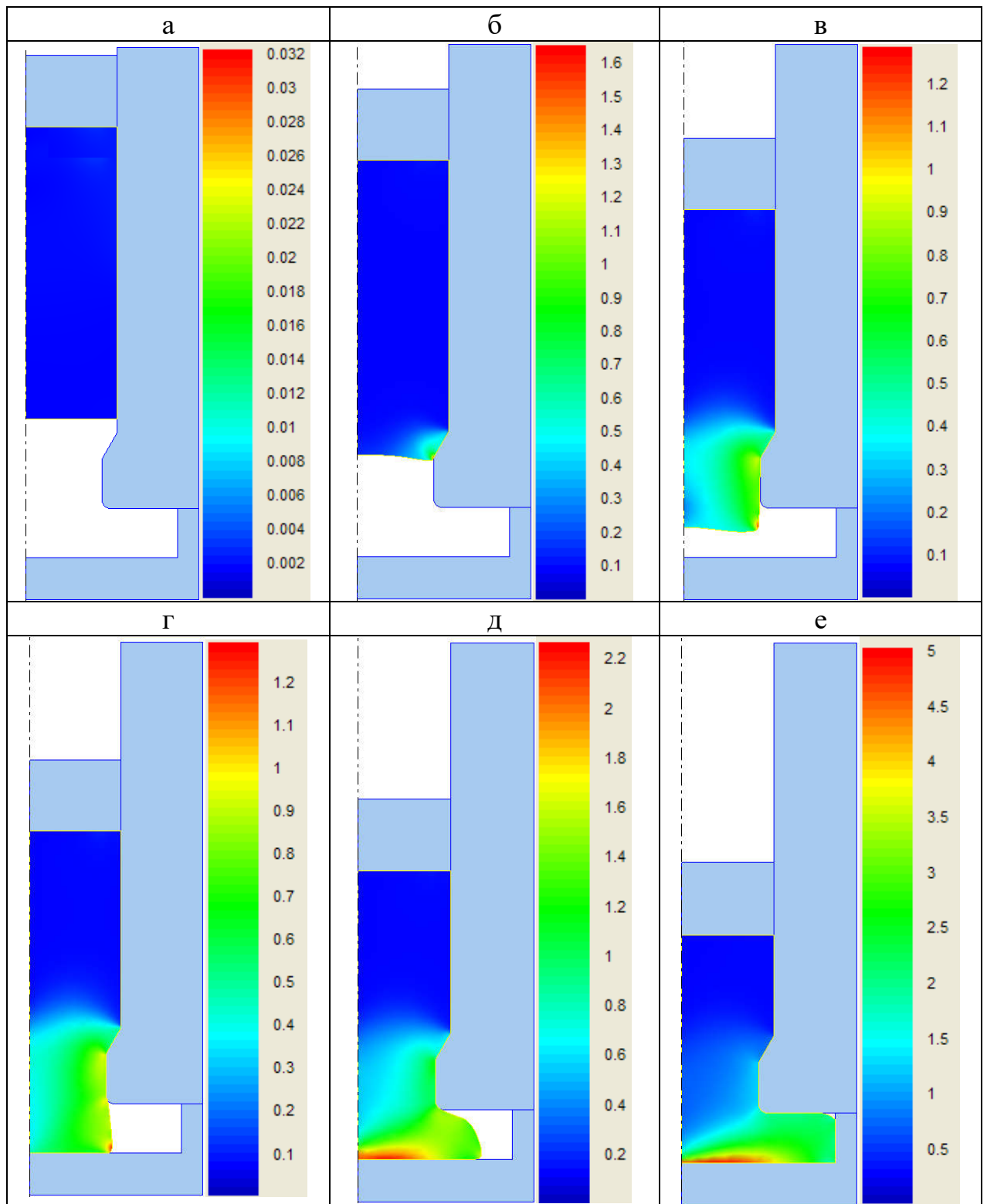


Рисунок 4.31 – Розподіл інтенсивності деформації по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з редукуванням з односторонньою подачею: $S=9$ мм (а), $S=18$ мм (б), $S=29$ мм (в), $S=35$ мм (г), $S=44$ мм (д), $S=58$ мм (е), при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$

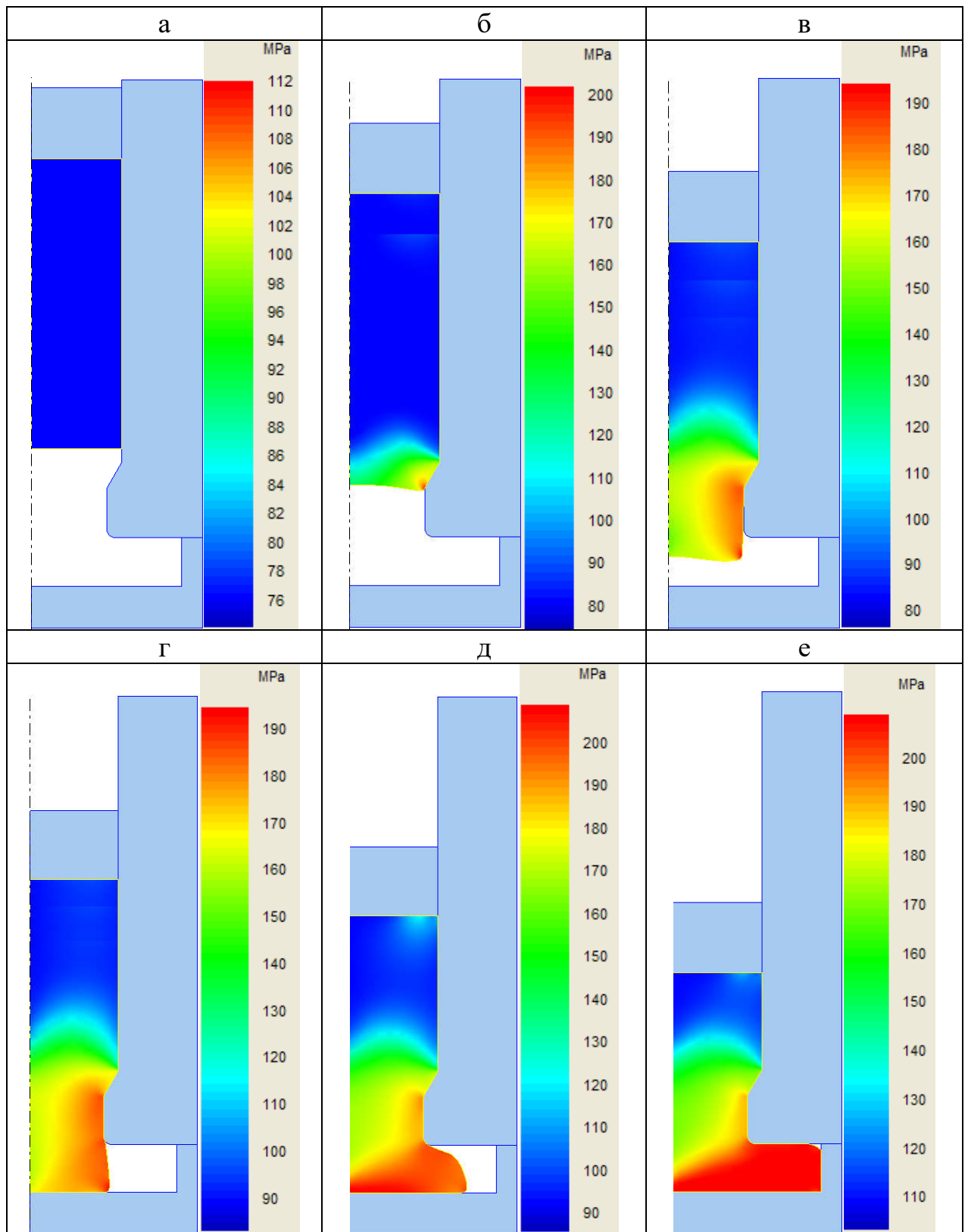


Рисунок 4.32 – Розподіл інтенсивності напружень по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з редукуванням з односторонньою подачею: $S=9$ мм (а), $S=18$ мм (б), $S=29$ мм (в), $S=35$ мм (г), $S=44$ мм (д), $S=58$ мм (е), при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$

Розподіл інтенсивності деформації показує, що максимальне значення зосереджено в нижній частині осередку деформації (див. рис. 4.31 $\varepsilon_i=5$) ($S=58$ мм). А також видно з розподілу інтенсивності напружень (див. рис. 4.32) максимальне значення $\sigma_i=200$ МПа ($S=58$ мм).

4.1.5.2 Моделювання силового режиму

З графіка залежності сили процесу видавлювання від ходу пуансона (рис. 4.33) видно, що при збільшенні кута конусу в отворі верхньої півматриці зі збільшенням ходу процесу сила зростає. Наприклад, при $\alpha=15^\circ$ з ходом повзуна $S=68$ мм сила дорівнює $P=1250$ кН, при $\alpha=30^\circ$ з ходом повзуна $S=67$ мм – $P=1330$ кН, при $\alpha=45^\circ$ з ходом повзуна $S=65$ мм – $P=1360$ кН.

На рис. 4.34 представлений графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а», з якого видно, що при збільшенні кута конусу в отворі верхньої півматриці ($\alpha=15^\circ$; 30° ; 45°) сила розкриття матриці зменшується, а зі збільшенням параметра незаповнення «а» сила розкриття зменшується. Наприклад, при $\alpha=15^\circ$ з параметром незаповнення «а»= 7 мм сила дорівнює 250 кН, при $\alpha=30^\circ$ з параметром незаповнення «а»= 7 мм сила дорівнює 200 кН и при $\alpha=45^\circ$ з параметром незаповнення «а»= 7 мм сила дорівнює 150 кН.

На кривій 1 ми бачимо, що при параметрі незаповнення «а»= 2 мм сила дорівнює $Q=1070$ кН, на кривій 2 при «а»= 2 мм – $Q=1000$ кН а на кривій 3 при «а»= 2 мм – $Q=950$ кН.

На рис. 4.35 представлений графік залежності сили процесу видавлювання від ходу пуансона при різному ставленні радіусів отворів верхньої півматриці і заготовки ($R_1/R_0=1,1$; $1,2$; $1,3$), на якому видно, що при збільшенні R_1/R_0 збільшується сила процесу видавлювання. Наприклад, при $R_1/R_0=1,1$ з ходом пуансона $S=66$ мм – сила дорівнює $P=1320$ кН, при $R_1/R_0=1,2$ з ходом повзуна $S=58$ мм – $P=1490$ кН, при $R_1/R_0=1,3$ з ходом повзуна $S=52$ мм – $P=1650$ кН.

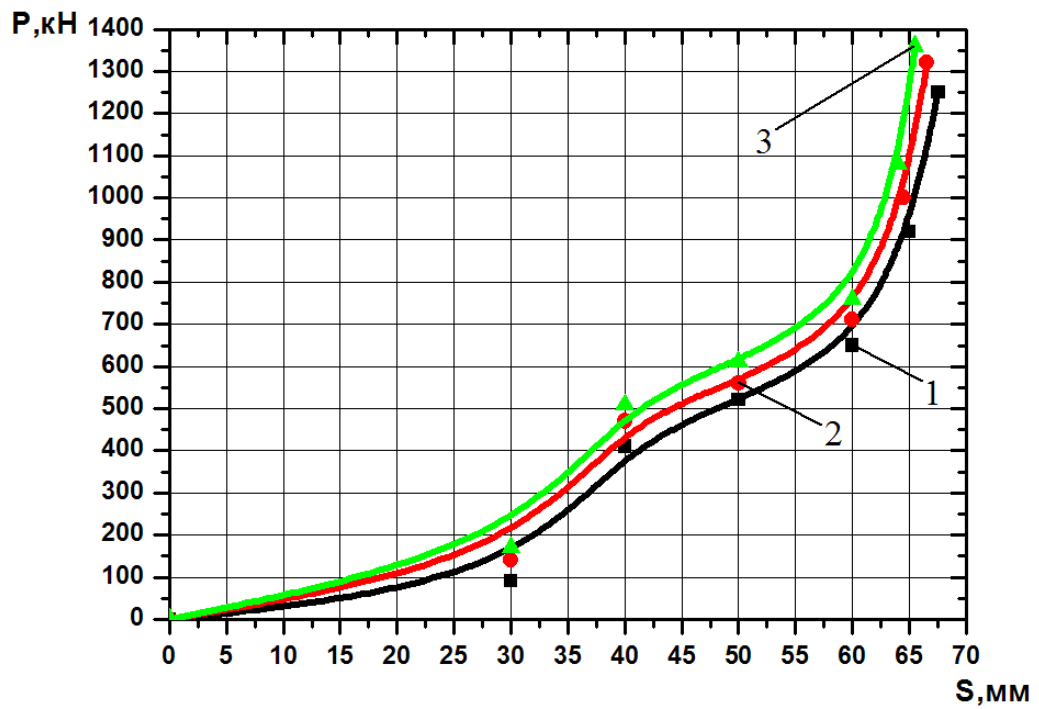


Рисунок 4.33 – Графік залежності сили процесу видавлювання від ходу пуансона і параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$

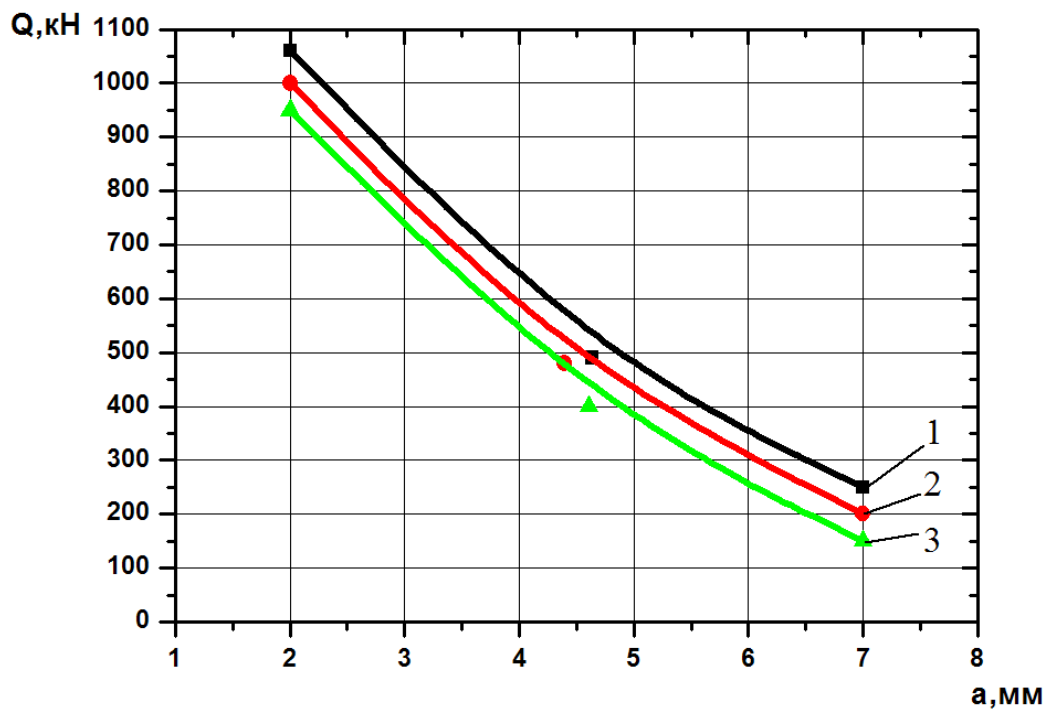
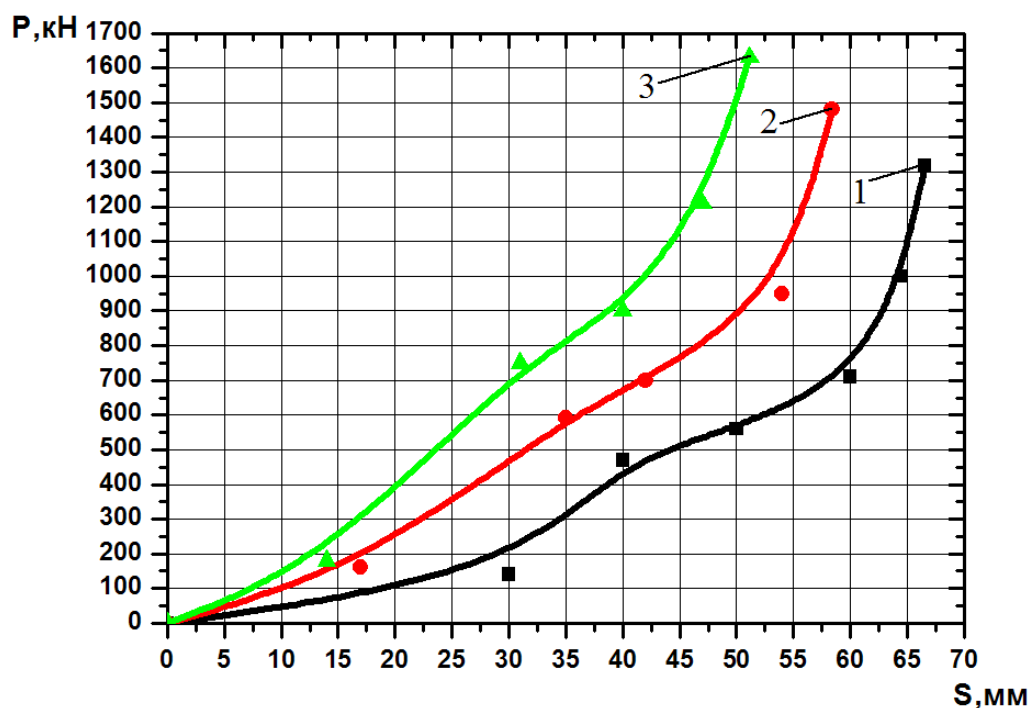


Рисунок 4.34 – Графік залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона і параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$

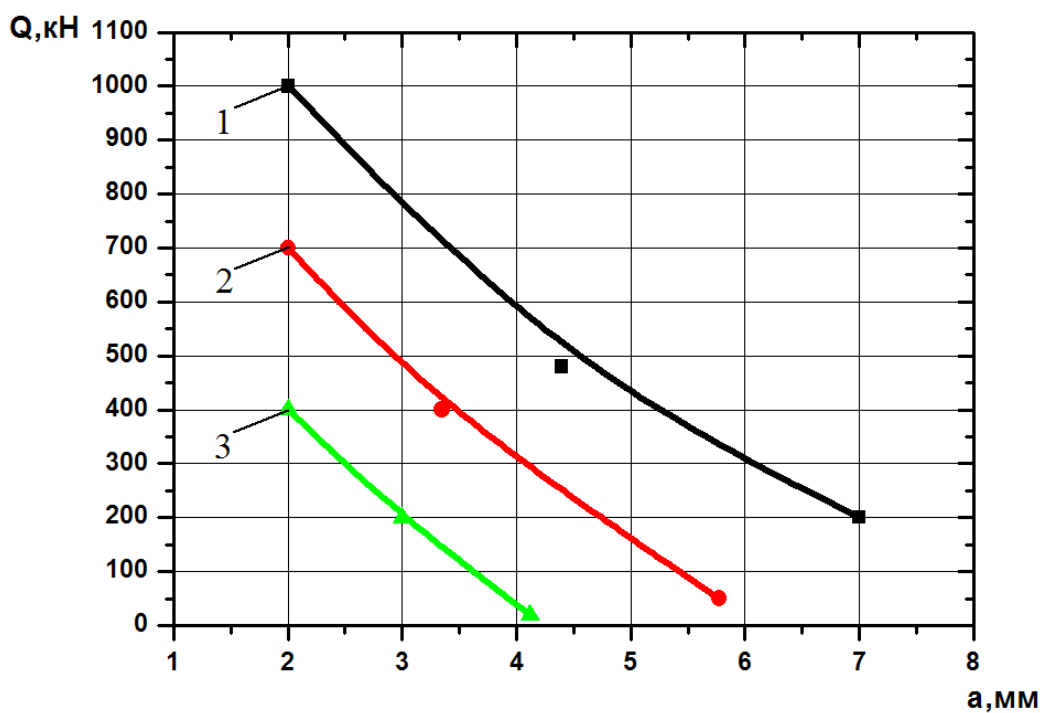


1 – $R_1/R_0=1,1$; 2 – $R_1/R_0=1,2$; 3 – $R_1/R_0=1,3$; $\alpha=30^\circ$

Рисунок 4.35 – Графік залежності сили процесу видавлювання від ходу пуансона і параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$

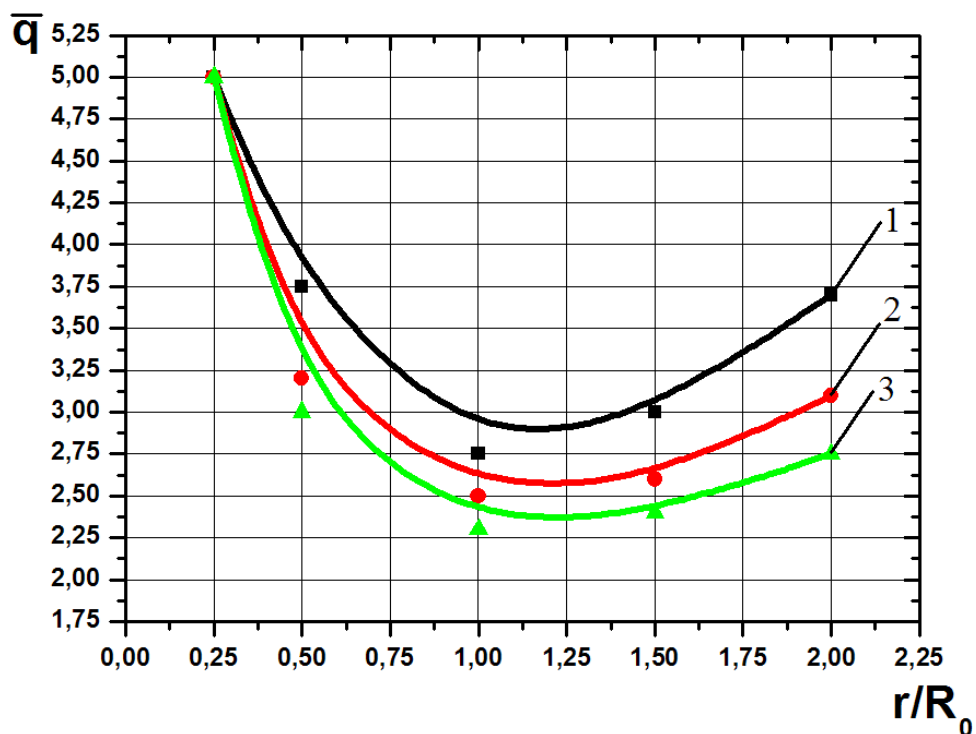
На рис. 4.36 представлений графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$, з якого видно, що зі збільшенням відносин радіусів отворів верхньої півматриці і заготовки ($R_1/R_0=1,1$; 1,2; 1,3) сила розкриття матриці зменшується, тобто зі збільшенням параметра незаповнення «а» сила розкриття зменшується. Наприклад, при $R_1/R_0=1,1$ параметром незаповнення «а»=2 мм – сила дорівнює $Q=1000$ кН, при $R_1/R_0=1,2$ ($Q=700$ кН) і при $R_1/R_0=1,3$ ($Q=400$ кН). На кривій 1 ми бачимо, що при параметрі незаповнення «а»=7 мм – сила дорівнює $Q=200$ кН, на кривій 2 при «а»=5,8 мм – $Q=50$ кН, а на кривій 3 при «а»=4,2 мм – $Q=10$ кН. На рис. 4.37 видно, що зі збільшенням геометрії інструменту та контактного тертя до значення $r/R_0=1,25$ приведений тиск зменшується до значення 2,85 (крива 1); – 2,60 (крива 2); – 2,35 (крива 3). Потім приведений тиск збільшується, досягаючи значення 3,75 (крива 1); – 3,10 (крива 2); – 2,75 (крива 3) при $r/R_0=2,0$.

На рис. 4.38, 4.39 представлені графіки залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона.



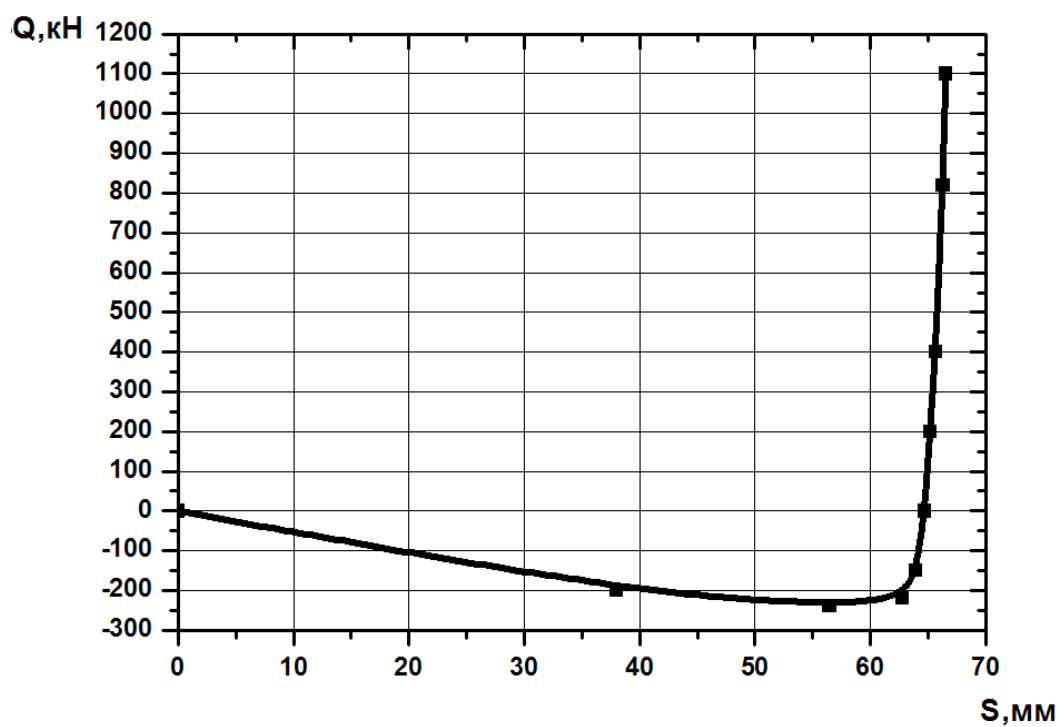
1 – $R_1/R_0=1,1$; 2 – $R_1/R_0=1,2$; 3 – $R_1/R_0=1,3$; $\alpha=30^\circ$

Рисунок 4.36 – Графік залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона і параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$

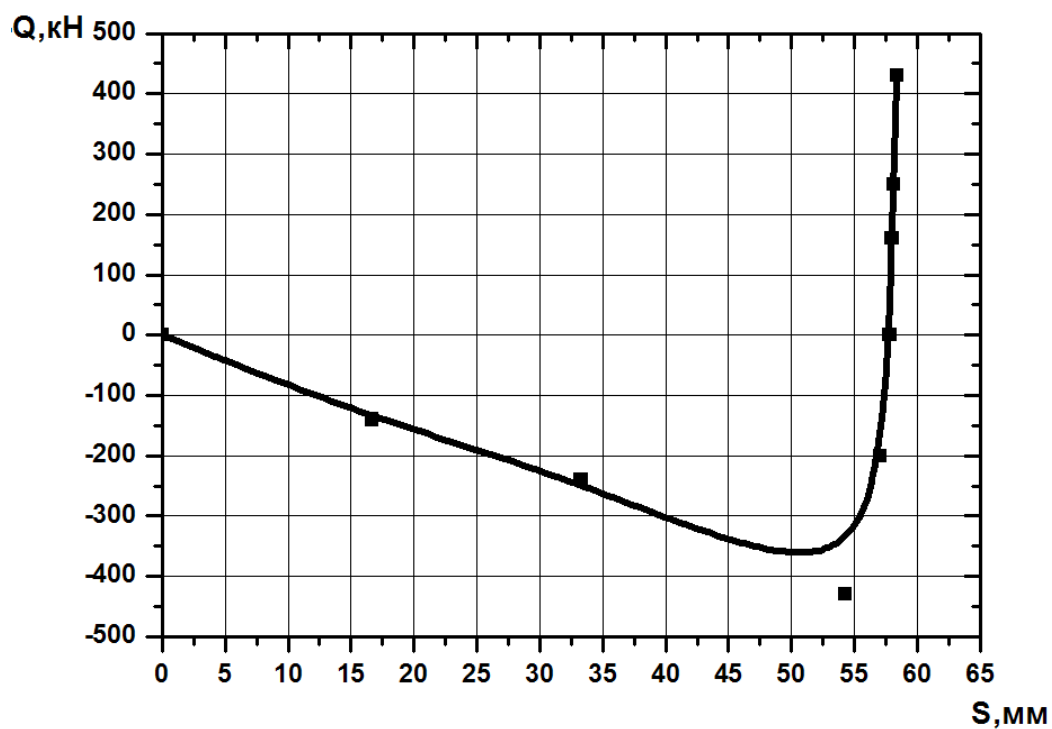


1 – $\mu=0,3$; 2 – $\mu=0,08$; 3 – $\mu=0,0$

Рисунок 4.37 – Вплив геометрії інструмента та контактної тертя на приведений тиск розкриття при закритому радіальному видавлюванні



а



б

Рисунок 4.38 – Графік залежності сили розкриття матриці від ходу пуансона: а – $R_1/R_0=1,1$; б – $R_1/R_0=1,2$; $\alpha=30^\circ$

З цього графіка видно, що до ходу пуансона $S=57$ мм (див. рис. 4.38 – а), $S=52$ мм (див. рис. 4.38 – б), і $S=43$ мм (див. рис. 4.39), верхня півматриця

притискається до нижньої. Після цього на верхню півматрицю починає діяти сила розкриття, яка до ходу $S=65$ мм (при $R_1/R_0=1,1$), $S=58$ мм (при $R_1/R_0=1,2$) і $S=51$ мм (при $R_1/R_0=1,3$), компенсується силою притиску півматриці. Потім сила розкриття різко зростає до значення $Q=1100$ кН (при $R_1/R_0=1,1$), $Q=450$ кН (при $R_1/R_0=1,2$) і $Q=310$ кН (при $R_1/R_0=1,3$). Зі збільшенням величини R_1/R_0 від 1,1 до 1,3 значення сили стиснення півматриці збільшується від 250 кН до 580 кН; при цьому значення ходу пуансона знижується від 57 до 43 мм.

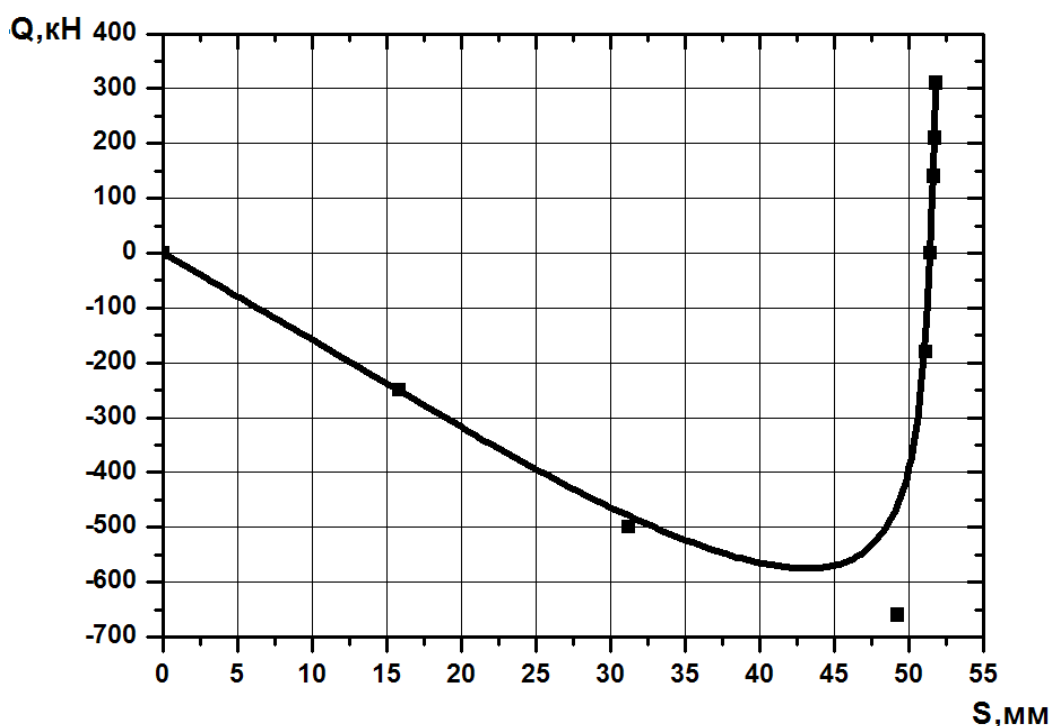
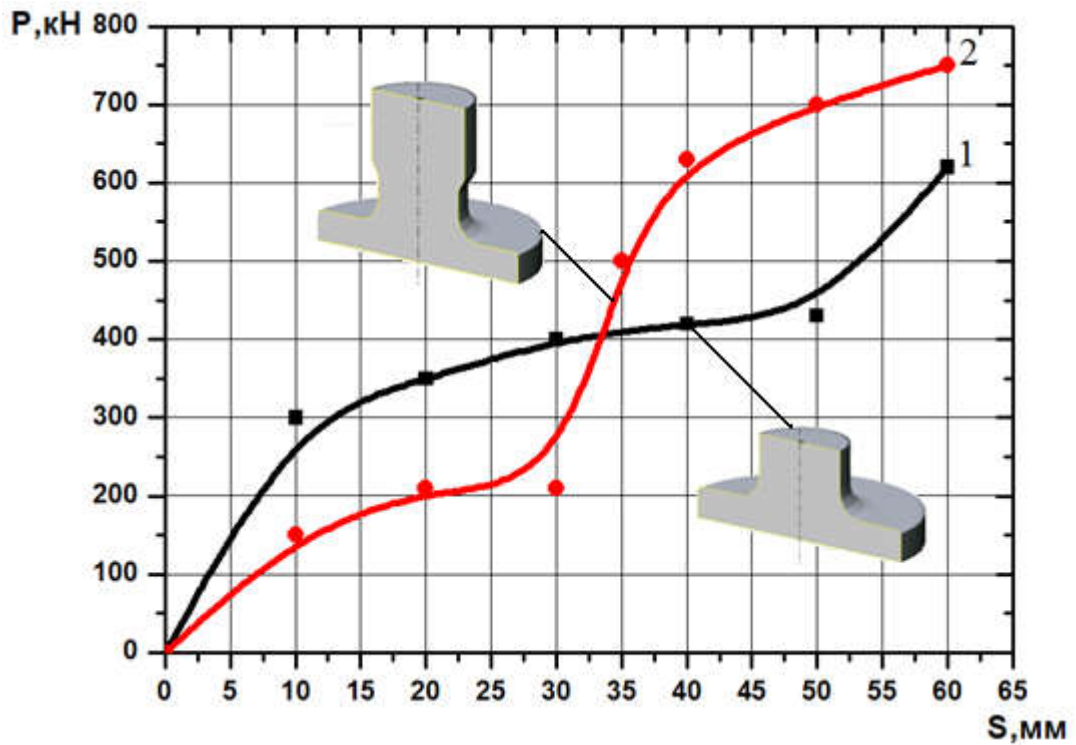
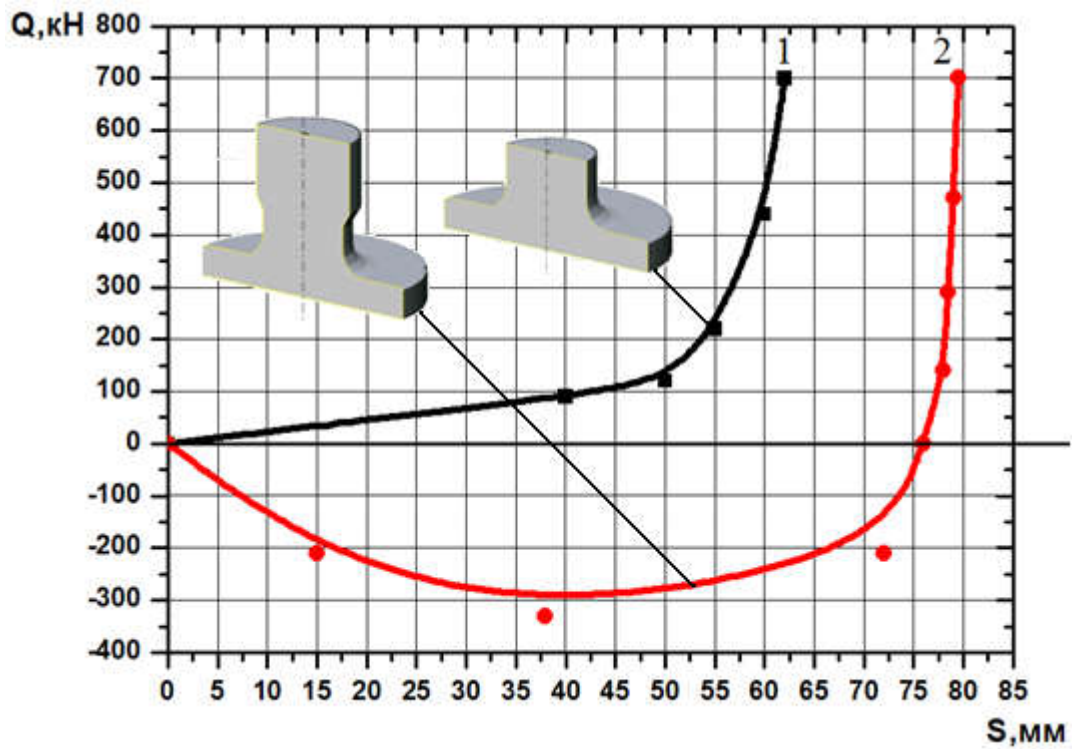


Рисунок 4.39 – Графік залежності сили розкриття верхньої півматриці від ходу пуансона: $R_1/R_0=1,3$; $\alpha=30^\circ$

Порівняння сил деформування та сил розкриття (рис. 4.40) показують, що видавлювання з елементом редукування збільшує загальне значення сили видавлювання. Проте, зростання є незначним і не впливає негативно на загальний процес. Але зниження сили розкриття матриці є досить суттєвим (див. рис. 4.40, б). На протязі всього процесу вільного радіального видавлювання відсутнє розкриття матриці, що дозволяє знизити витрати на розробку та кількість затискних пристроїв у штампі. Лише на стадії заповнення верхнього кута матриці (рис. 4.41), при повному контакті фланця з поверхнею матриці, з'являється сила Q .

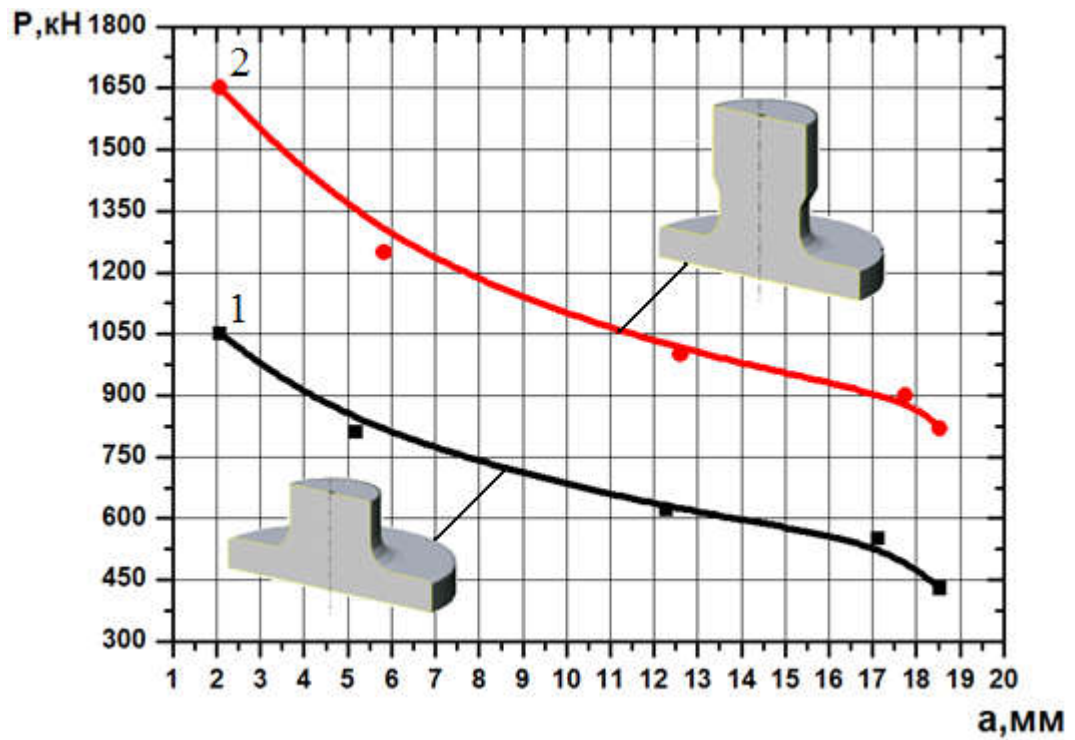


а

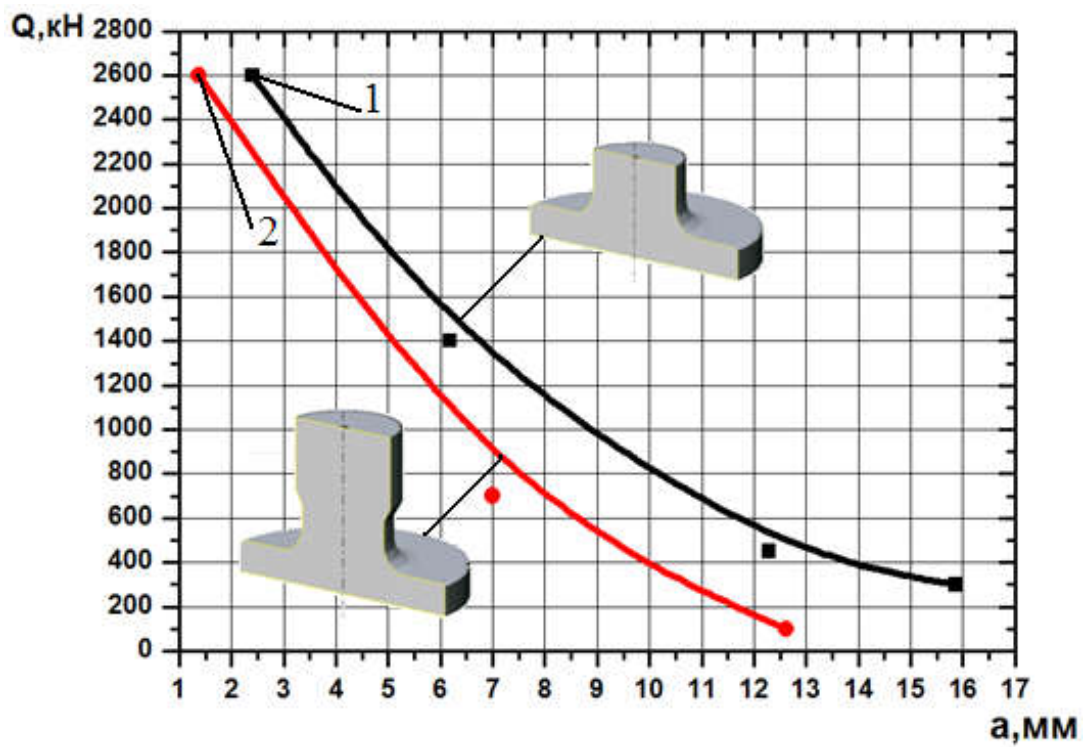


б

Рис. 4.40 – Графік залежності сили процесу видавлювання (а) і сили розкриття матриці (б) від ходу пуансона при $h/R_0=0,65$ і $r/R_0=0,5$: 1 – без редукування ($\alpha=0^\circ$) і 2 – з редукуванням ($\alpha=60^\circ$)



а



б

Рисунок 4.41 – Значення сили видавлювання (а) та сили розкриття матриці (б) від величини заповнення кута «а» при $h/R_0=0,65$ і $r/R_0=0,5$: 1 – без редукуванням ($\alpha=0^\circ$) і 2 – з редукуванням ($\alpha=60^\circ$)

4.2 Кінематика формозмінення заготовки при радіальному видавлюванні фланця

Процес закритого радіального видавлювання відрізняється багатоваріантністю, обумовленою можливістю активного керування подачею металу в приймальну порожнину за допомогою регулювання кінематики рухомого деформувального інструменту. Застосування односторонньої та двосторонньої подачі заготовки в осередок деформування (рис. 4.42) дозволило отримати характеристики формоутворення, силовий режим та напружено-деформований стан заготовки.

Обрані наступні параметри для моделювання процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R – радіус фланця ($R=36$ мм), R_i – проміжний радіус фланця h – висота приймальної порожнини для видавлюємого фланця, h/R_0 – відносна висота фланця ($h/R_0=0,65$); r – радіус заокруглення перехідної кромки матриці ($r=2$ мм), L – висота заготовки ($L=70$ мм).

4.2.1 Моделювання напруженого і деформованого стану

Результати моделювання процесу при радіальному видавлюванні фланця на середині стрижня з односторонньою представлені на рис. 4.43 і двосторонньою – 4.44 подачею при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$ такі як викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б) і напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування.

Розподіл інтенсивності напружень при односторонньому (див. рис. 4.43) і двосторонньому (див. рис. 4.44) радіальному видавлюванні показує, що максимальне значення зосереджене в нижній частині осередку деформації. Максимальне значення інтенсивності деформацій складає $\varepsilon_i=4.5$. А також видно з розподілу інтенсивності напружень максимальне значення $\sigma_i=200$ МПа.

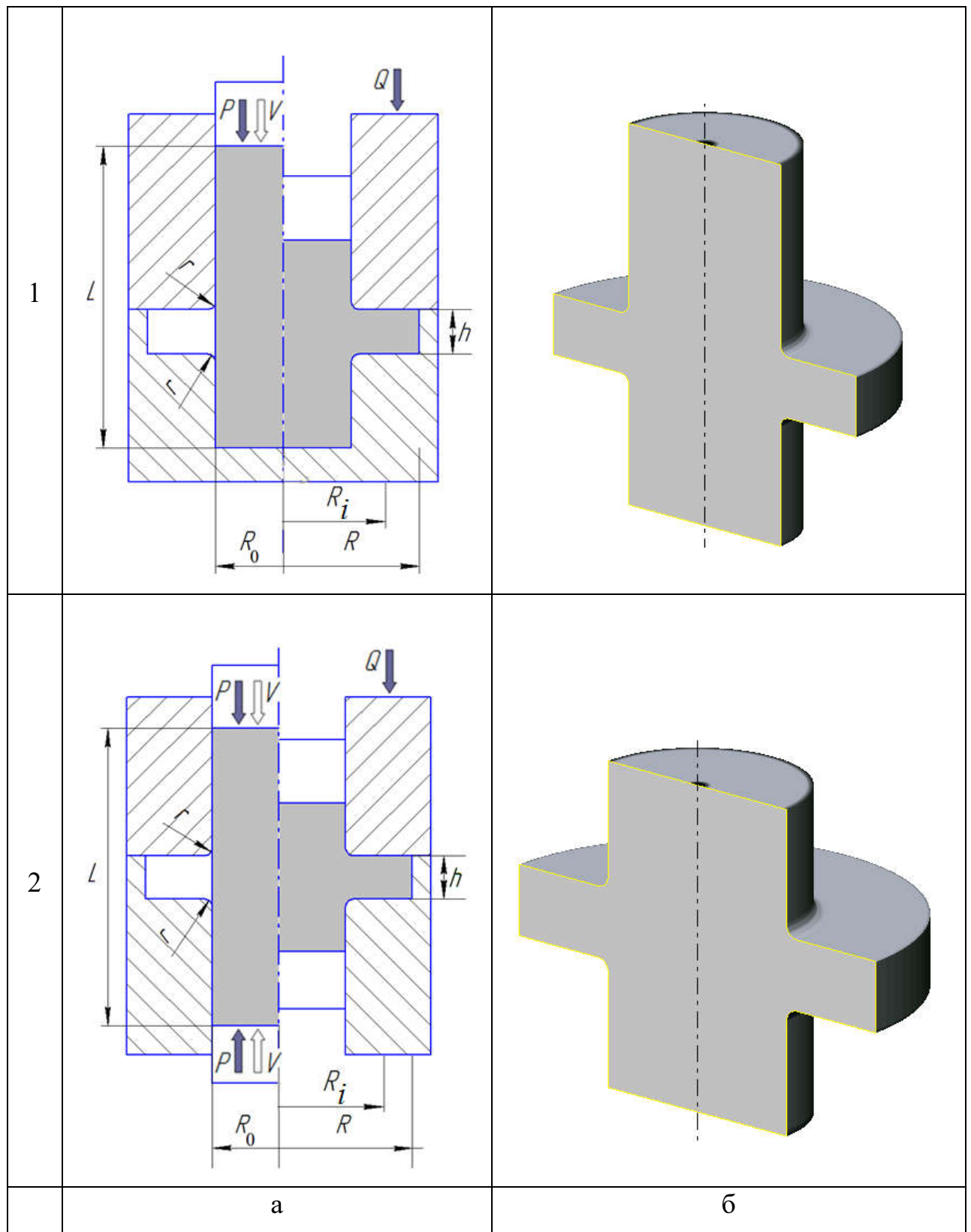


Рисунок 4.42 – Схеми процесів радіального видавлювання фланця (а) на середині стрижня з односторонньою (1) і двосторонньою (2) подачею і отриманим напівфабрикатом (б)

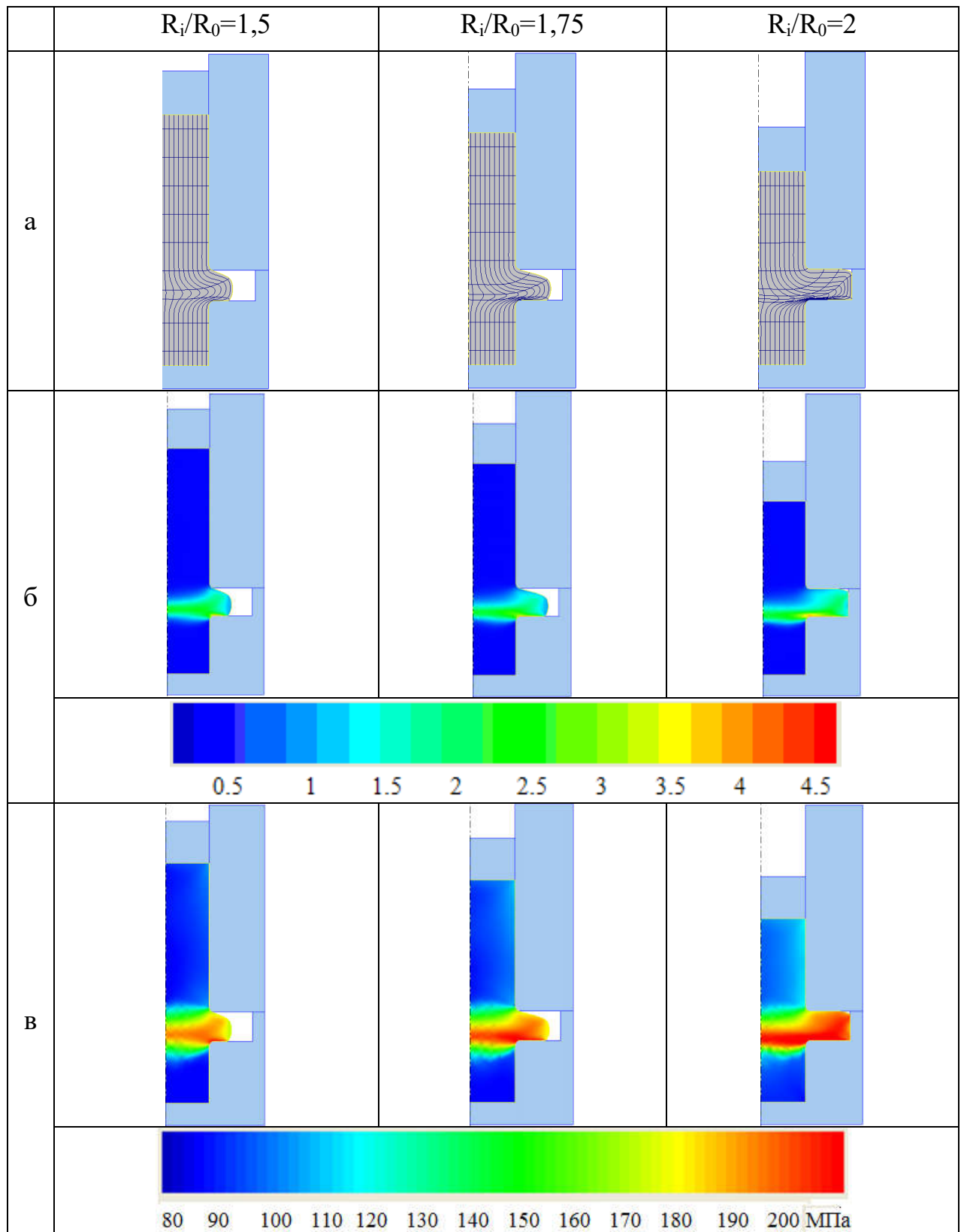


Рисунок 4.43 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на середині стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$

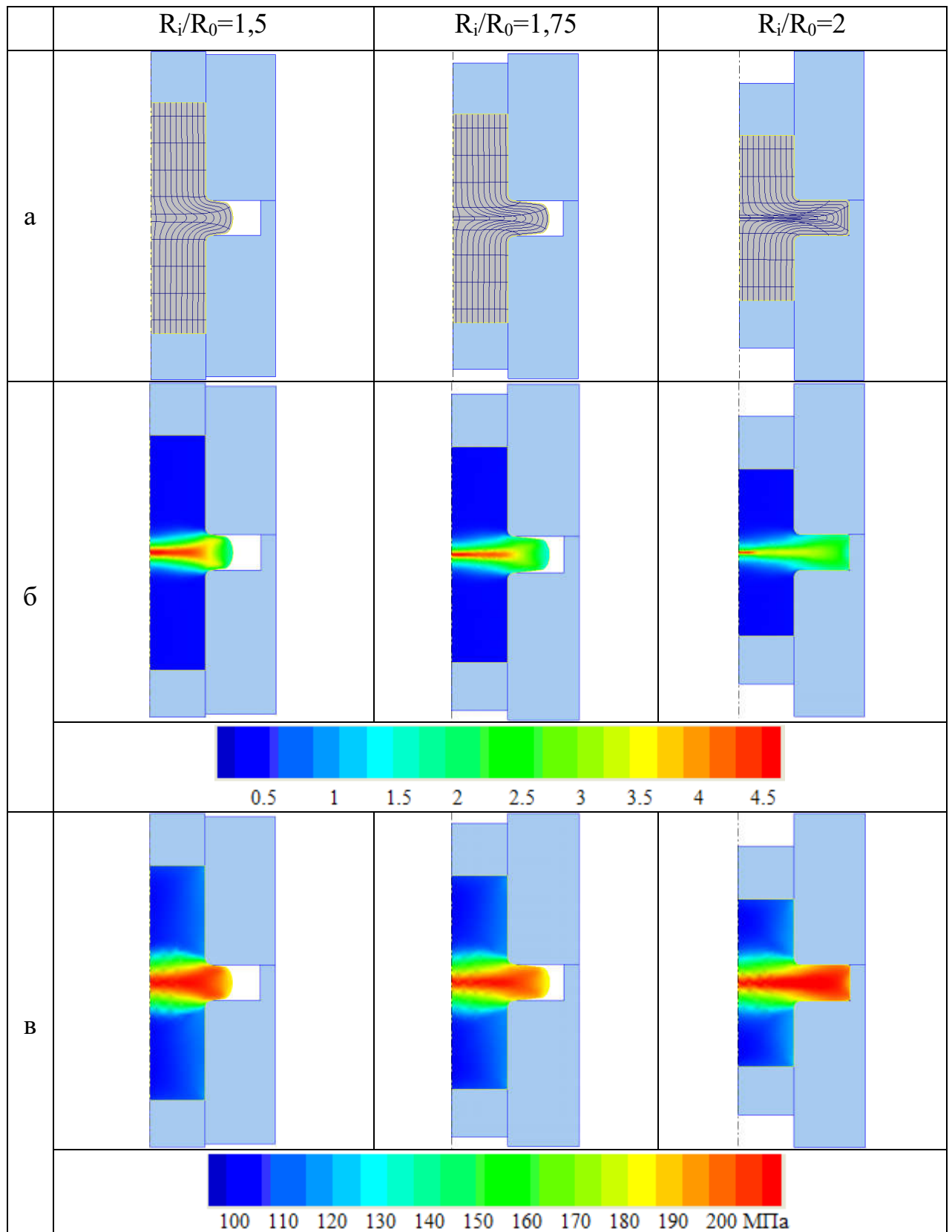


Рисунок 4.44 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на середині стрижня з двосторонньою подачею при $h/R_0=0,65$; $\mu=0,08$

4.2.2 Моделювання силового режиму

Представлені 3 криві залежності сили від ходу пуансона для трьох процесів (рис. 4.45): одностороннього закритого радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки (крива 1), одностороннього закритого радіального видавлювання фланця на торці заготовки (крива 2), двостороннього закритого радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки (крива 3). У момент зіткнення фланців в трьох процесах з вертикальною стінкою отворів матриці починається інтенсивний ріст сили видавлювання через остаточне заповнення порожнини матриці. Протягом всього процесу найбільша сила спостерігається для одностороннього закритого радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки, а найменша сила – для двостороннього закритого радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки. Наприклад, з ходом пуансона $S=35$ мм – сила рівна 1300 кН (крива 1), з ходом повзуна $S=36$ мм – 1280 кН (крива 2), з ходом повзуна $S=37$ мм – 1250 кН (крива 3).

На рис. 4.46 представлені 3 криві залежності сили розкриття від параметра незаповнення «а» для різних процесів (позначення кривих див. на рис. 4.46). Як видно з графіка, зі зменшенням величини параметра незаповнення «а» відбувається збільшення сили розкриття матриці за рахунок того що збільшується площа контакту фланця виробу з верхньою півматрицею. Найбільша сила розкриття на всьому процесі заповнення спостерігається для процесу одностороннього закритого радіального видавлювання фланця на торці заготовки, а найменше – для процесу двостороннього закритого радіального видавлювання фланця в середній частині заготовки. Наприклад, з параметром незаповнення «а»=1 мм – сила рівна 1200 кН (крива 1), з параметром незаповнення «а»=1 мм рівна 1600 кН (крива 2), з параметром незаповнення «а»=1 мм – 800 кН (крива 3). На кривій 1 ми бачимо, що при параметрі незаповнення «а»=3,75 мм – сила рівна 100 кН, на кривій 2 при «а»=5,2 мм – 80 кН, а на кривій 3 при «а»=2,75 мм – 60 кН сила прагне до нуля.

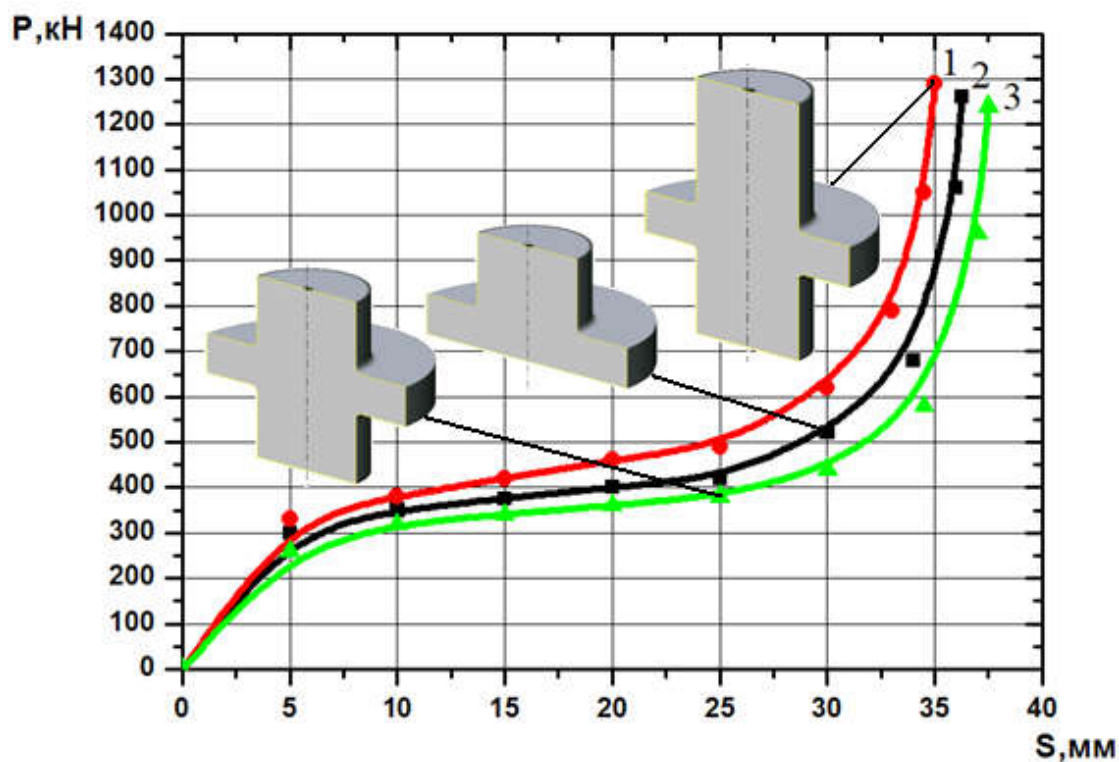


Рисунок 4.45 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона для різних процесів закритого радіального видавлювання при $h/R_0=0,65$

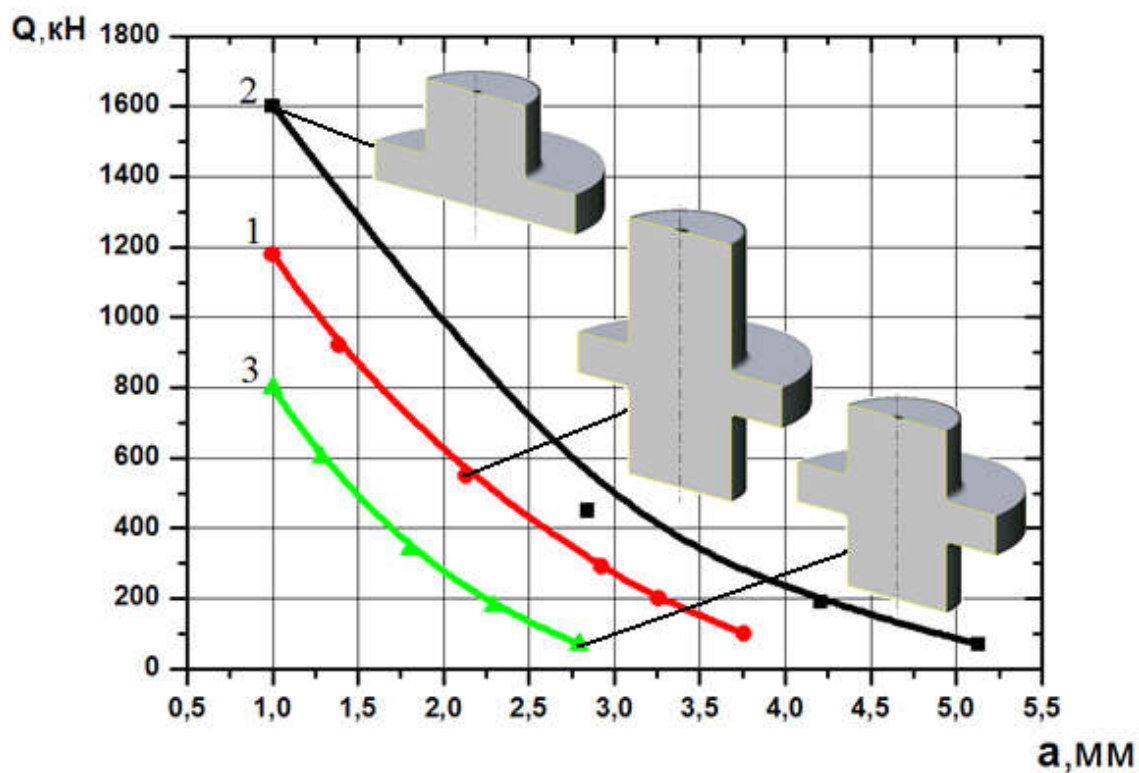


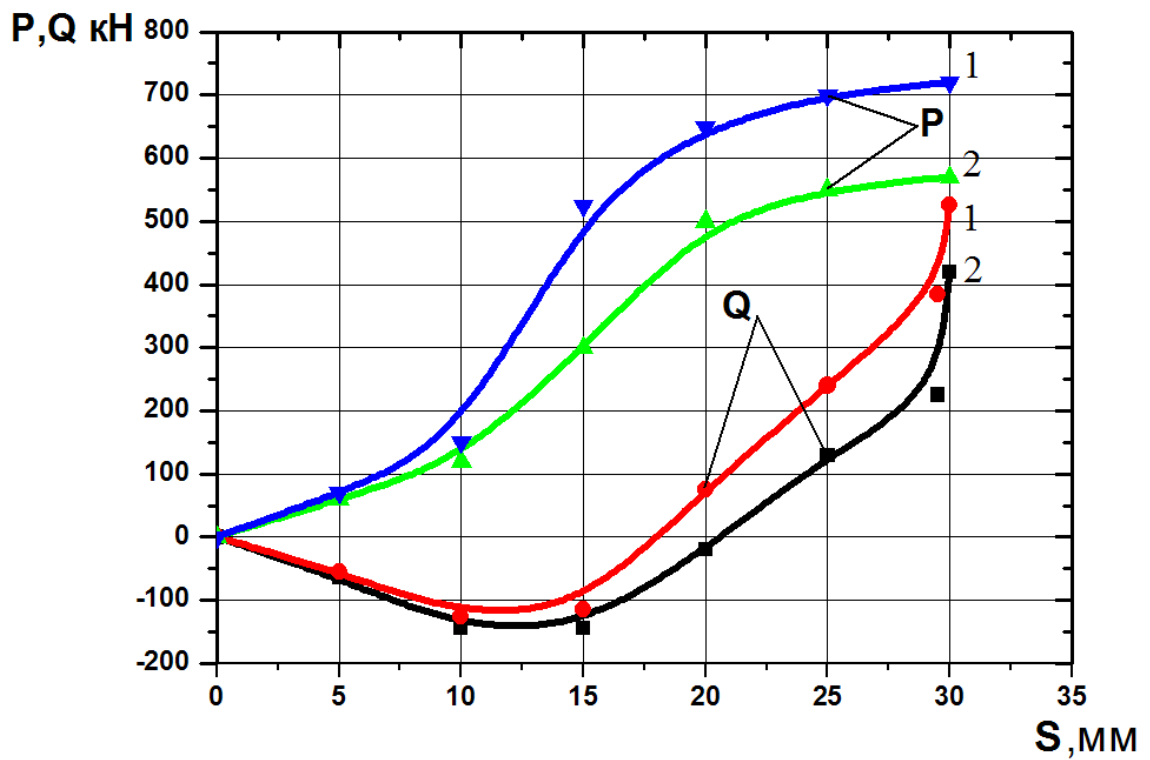
Рисунок 4.46 – Графік залежності сили розкриття матриці від параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$ для різних процесів

При впровадженні технологічних процесів холодного об'ємного штампування, найбільш істотним фактором, що обмежує застосування цих процесів, є низька стійкість інструменту внаслідок високих питомих навантажень (понад 1700 МПа). Навіть використовуючи вельми дорогі інструментальні сталі, наприклад Х12М, Р6М5, не вдається підвищити стійкість інструменту більш, ніж до 2,5...5 тис. штамповок, що є недоліком з точки зору ефективності виробництва. Незважаючи на те, що останнім часом математичне моделювання досягло великих успіхів, внаслідок широкого використання високопродуктивних ЕОМ, експериментальні дослідження енергосилових параметрів є найбільш точними, а часто єдиними способами визначення навантажень на інструмент.

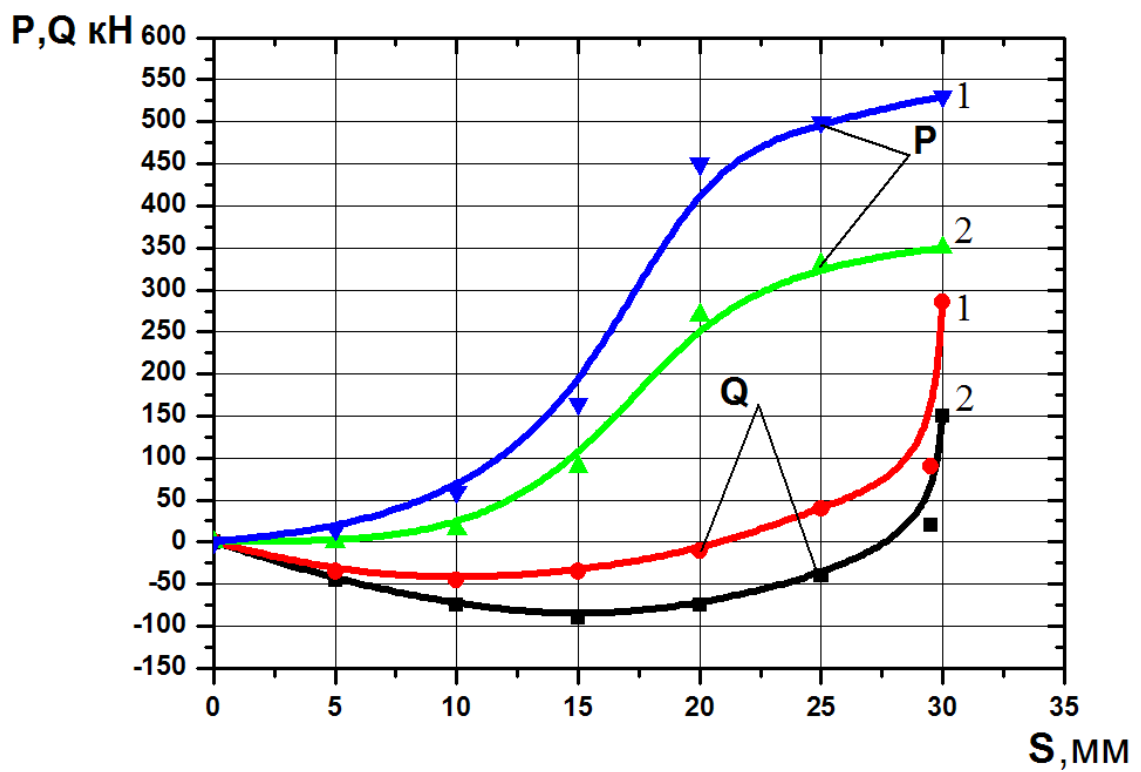
При дослідженнях такого роду, досить зручним і надійним є метод тензометрії. На рис. 4.47 представлені результати експериментальних досліджень процесу радіального видавлювання з односторонньою і двосторонньою подачею металу в радіальну порожнину.

Як видно з графіків, сила деформування на пуансон по ходу повзуна преса безперервно зростає, причому найбільш інтенсивно в початковій стадії. Характер зміни сил розкриття матриць більш складний вид. При односторонній подачі для верхньої матриці, а при двосторонній подачі - для обох матриць, характерно наростання сил в бік зближення матриць під дією сил тертя заготовки об стінку матриці, а потім, починаючи у якійсь точці, спостерігається зростання сил у протилежну сторону (розпірні сили матриць). Після припинення дії деформувальної сили на пуансоні (виключення преса) спостерігається стрибок сили розкриття матриць, який може бути пояснений пружною дією деформованої заготовки, інструменту (матриць) і закінченням дії сил тертя заготовки об стінки матриці. Причому величина стрибка, в основному, залежить від пружних властивостей матеріалу заготовки, висоти поперечної порожнини.

На рис 4.48, а представлений графік, що показує вплив висоти поперечної порожнини і матеріалу заготовки на додатковий стрибок сили



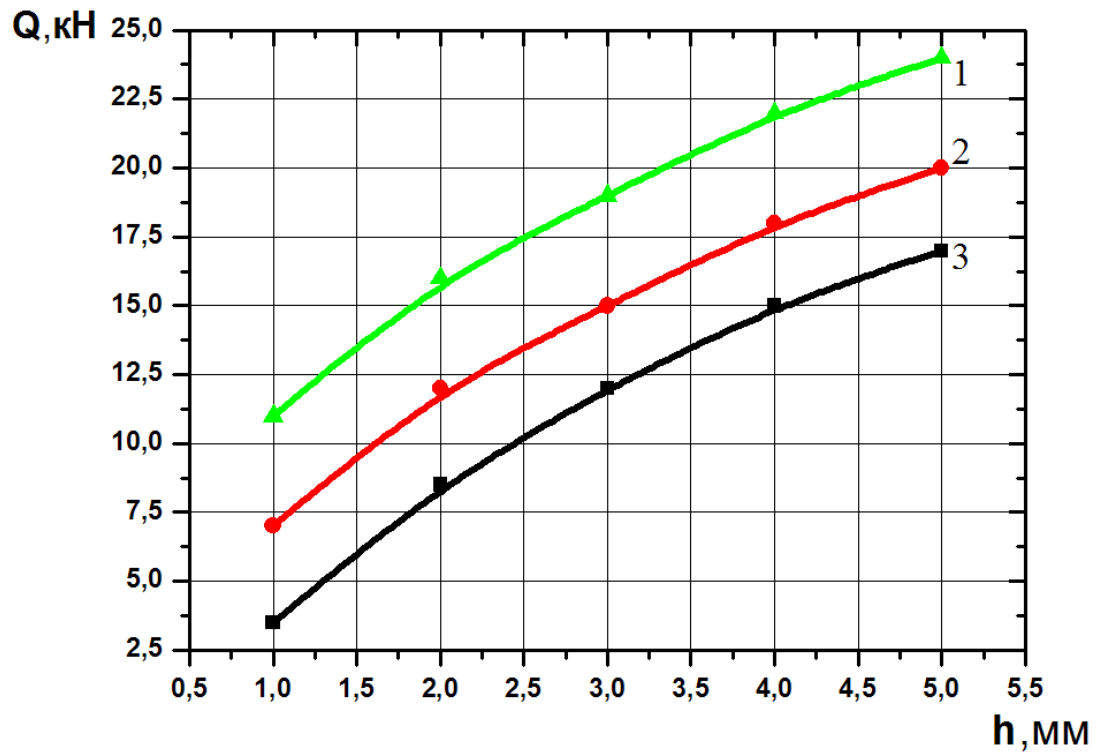
a



б

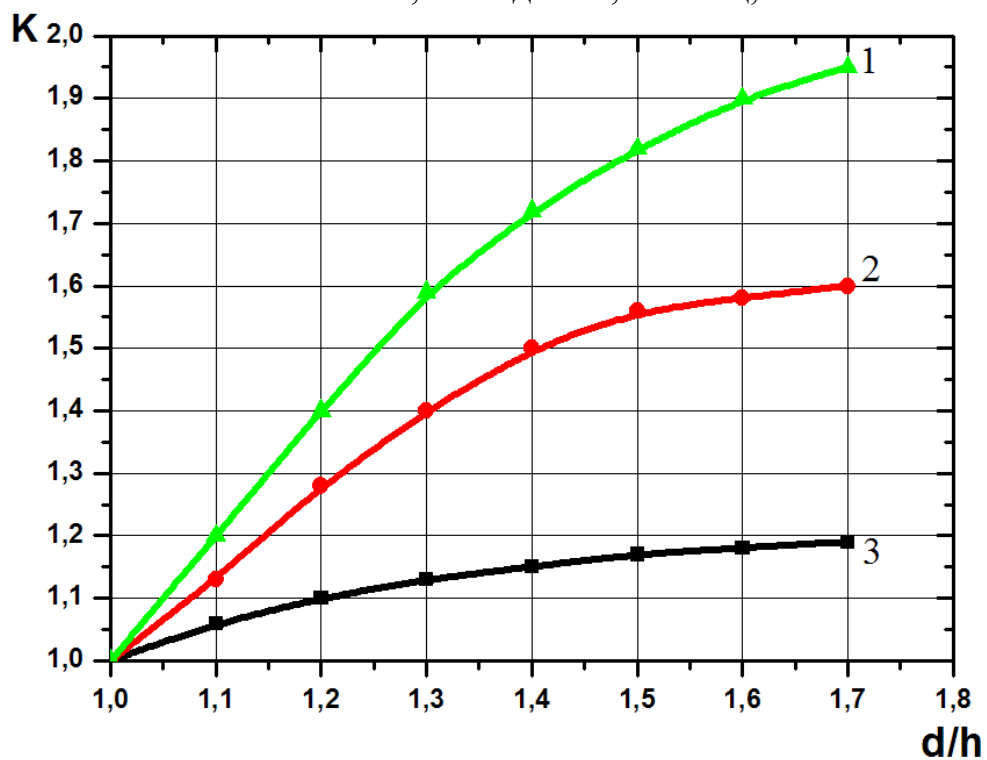
1 - Сталь 10, 2 - Мідь М1

Рисунок 4.47 – Сила видавлювання і сила розкриття матриці з односторонньою (а) і двосторонньою (б) подачею металу в радіальну порожнину



а

1-Сталь 10, 2- Мідь М1, 3- АМЦ,



б

1 - $h/R=0.8$, 2 - $h/R=0.5$, 3- $h/R=0.2$

Рисунок 4.48 – Вплив геометричних параметрів заготовки на величину додаткового збільшення сил розкриття матриці (а) і коефіцієнт розподілу навантажень на пуансоні (б)

розкриття матриць.

Для силового режиму з двосторонньою подачею металу в порожнину характерне зниження силових характеристик на 15...20% в порівнянні з односторонньою подачею.

Позначивши $K=P_1/P_2$, за експериментальними даними, побудований, графік залежності коефіцієнта розподілу навантаження на пуансон від основних факторів (див. рис. 4.48, б). Представлена залежність може бути корисною при проектуванні інструменту, так- як показує, що навантаження на нижньому інструменті може бути значно нижче, ніж в верхньому, що, в свою чергу, дозволяє застосовувати більш дешеві сталі при виготовленні матриць і пуансонів.

4.3 Кінематика процесу формоутворення деталей з фланцем на основі комбінування операцій видавлювання і підсадження

Проведені дослідження показали, що отримання точних фланців можливе за рахунок використання операції підсадження. Позитивний вплив операції підсадження спостерігається як при односторонній подачі, так і при двохсторонній подачі металу в порожнину радіальної течії (рис. 4.49).

Послідовне видавлювання з двосторонньою подачею при радіальному видавлюванні дозволяє отримувати досить великі фланці з рівномірним розподілом інтенсивності деформацій за перерізом. Встановлено, що операцією підсадження при односторонній подачі металу заготовки отримання рівного фланцю можна досягти при $\varepsilon=30\%$ (див. рис. 4.49, а), а при двосторонній подачі $\varepsilon=20\%$ (див. рис. 4.49, б). При послідовному двосторонньому радіальному видавлюванні (рис. 4.50) спостерігається утворення дефекту у вигляді затиску.

Встановлено, що регулювання кінематики руху інструменту, у тому числі і операцій підсадження, можна досягти формоутворення рівного фланцю без дефектів. Рекомендовані ступені деформації на кожному етапі деформування за схемою послідовного двостороннього радіального видавлювання

(див. рис. 4.50). Операцію підсадження також ефективна і при отриманні фланця на торці стрижня. Операція підсадження також ефективна і при отриманні фланця на торці стрижня (рис. 4.51). Позитивний вплив спостерігається і при заповненні кута біля верхньої півматриці (рис. 4.52).

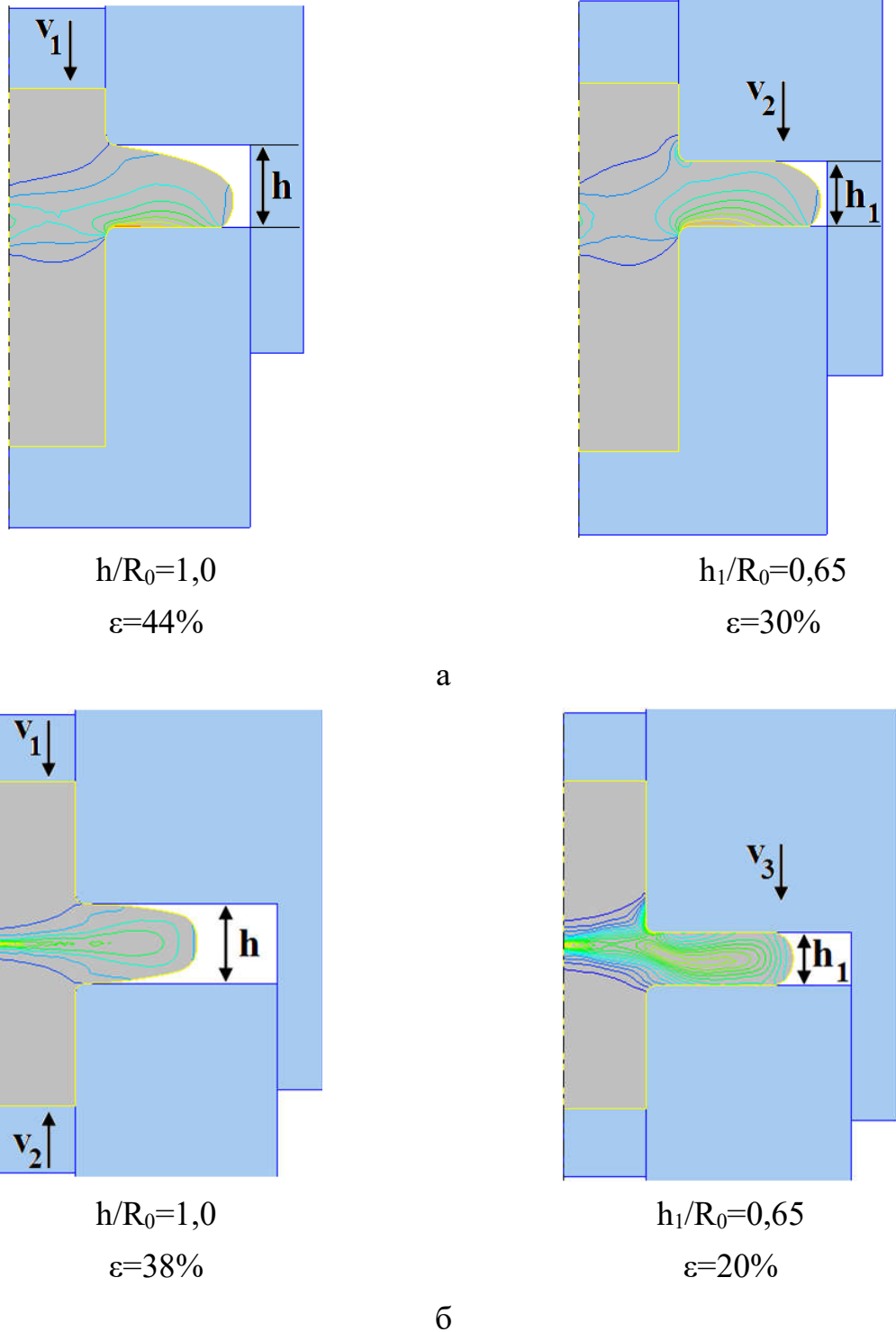


Рисунок 4.49 – Застосування операції підсадження фланця при односторонній (а) та двосторонній (б) подачах при радіальному видавлюванні

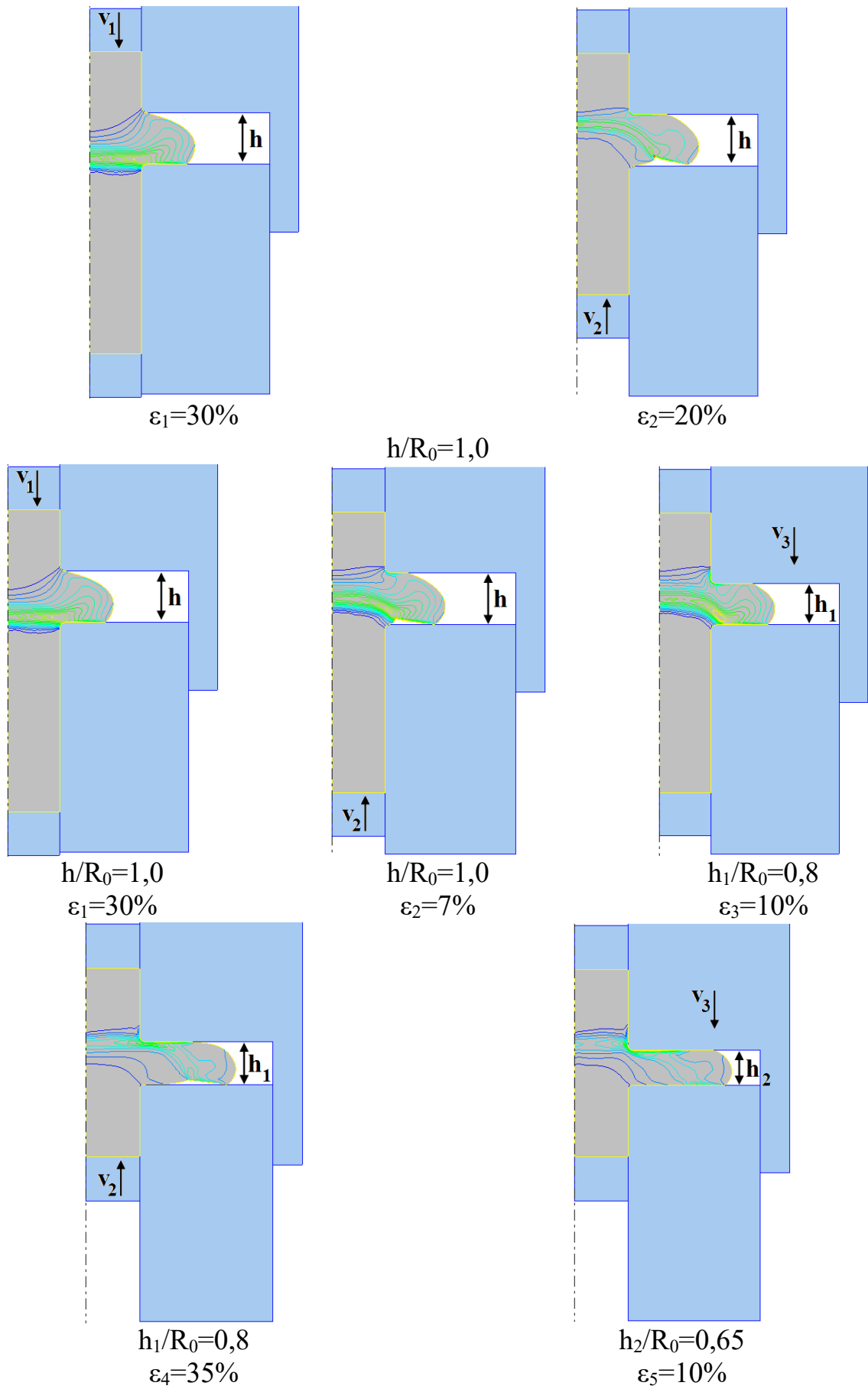


Рисунок 4.50 – Схема послідовного двостороннього радіального видавлювання фланцю і операцією підсадження

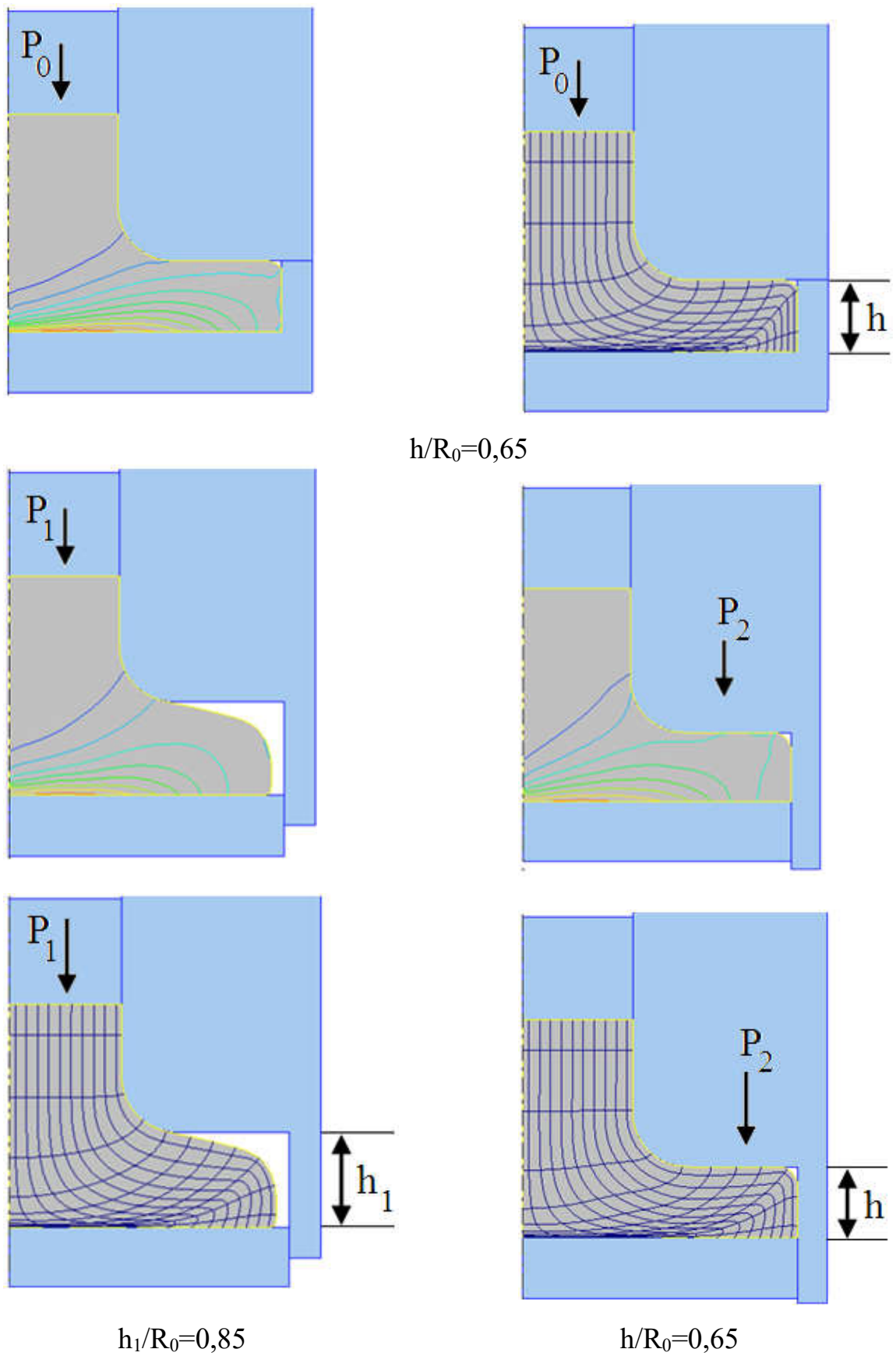
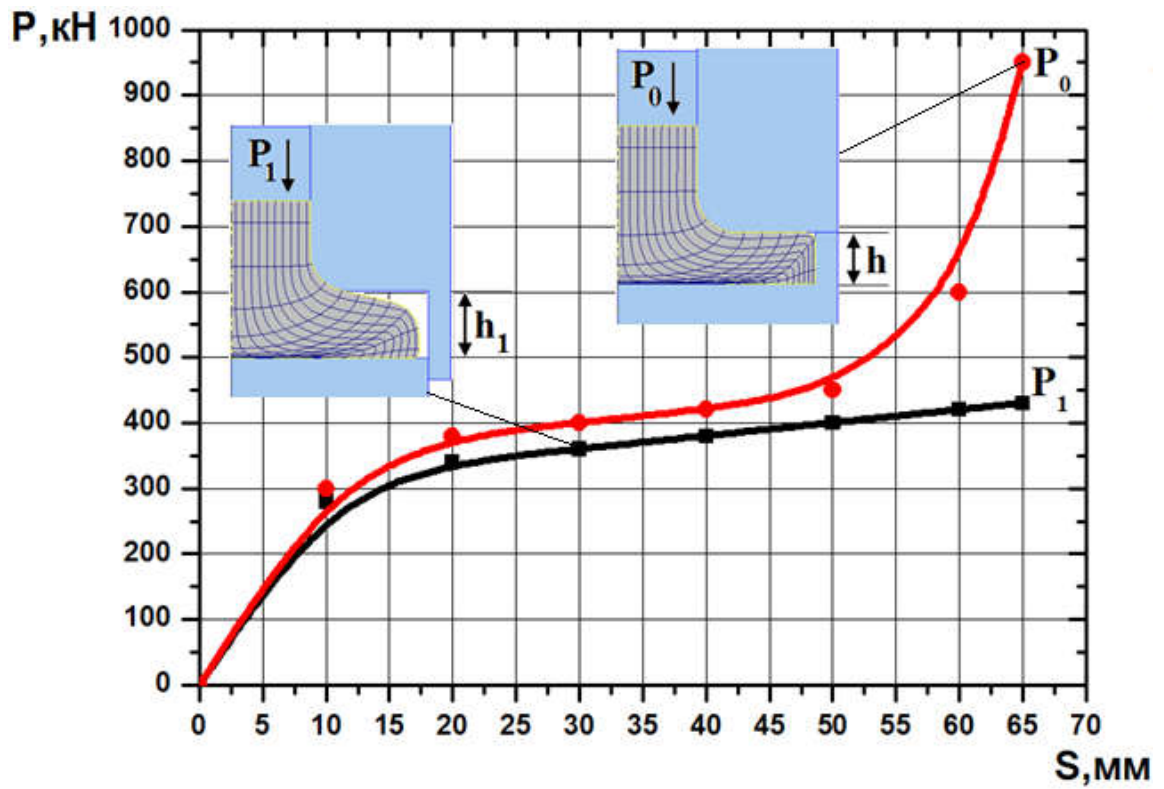
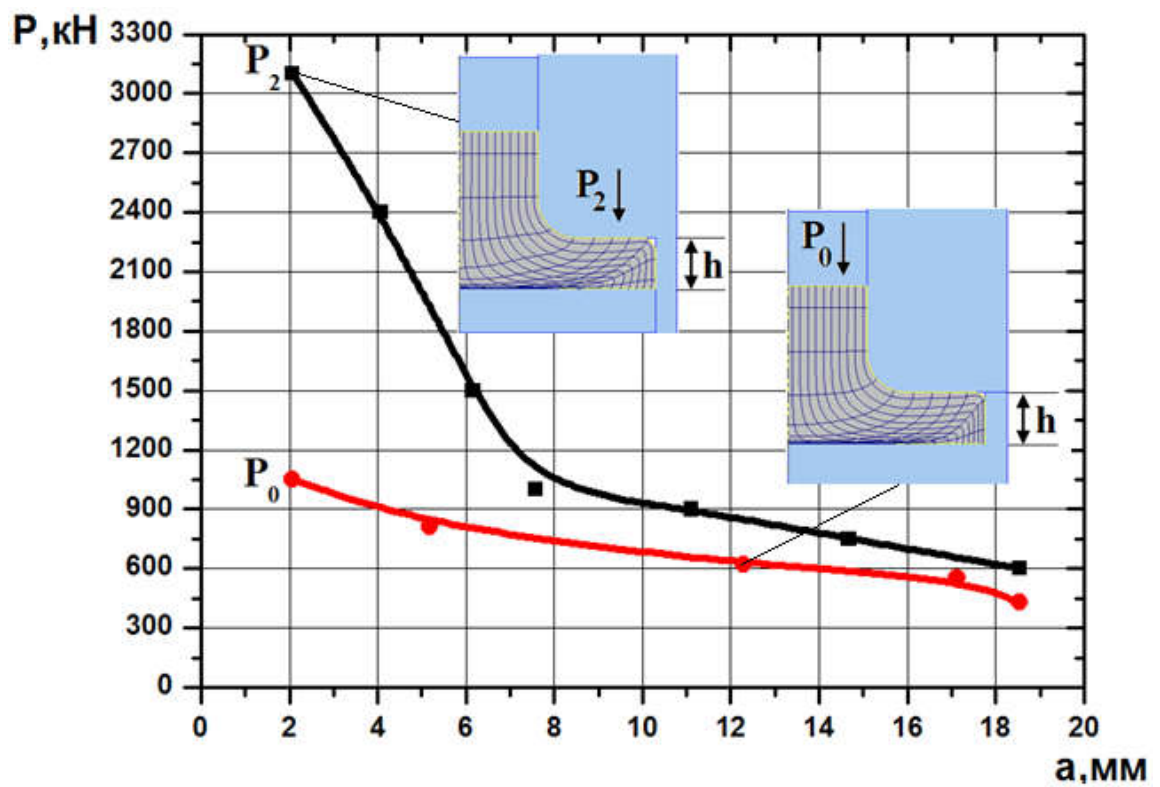


Рисунок 4.51 – Розподіл деформацій і викривлення ділильної сітки при радіальному видавлюванні фланцю на торці стрижня



а



б

Рисунок 4.52 – Порівняння сили закритого радіального видавлювання від ходу з різною висотою фланця при $h/R_0=0,65$ та $h_1/R_0=0,85$ (а) та порівняння сили закритого радіального видавлювання і сили посадки від параметра незаповнення «а» при $h/R_0=0,65$

4.4 Оцінка використання ресурсу пластичності металу при радіальному видавлюванні в роз'ємних матрицях

Для розрахунку використаного ресурсу пластичності скінчено-елементної моделі задавалося поле трасованих точок (по висоті 15 точок, по товщині, в радіальному напрямку, 15 точок). З них вибрано п'ять точок на зовнішній поверхні фланця, за якими було визначено ресурс пластичності при радіальному видавлюванні в роз'ємних матрицях для початку моменту руйнування, який зображений на рис. 4.53.

Для моделювання процесу радіального видавлювання фланця на торці стрижня при односторонній подачі металу та на зовнішній поверхні при односторонній і двосторонній подачі металу обрані параметри (див. підрозділ 4.2.1 та 4.3). Дане теоретичне дослідження ресурсу пластичності процесу проведено за допомогою програми методу скінченних елементів QForm 2D/3D.

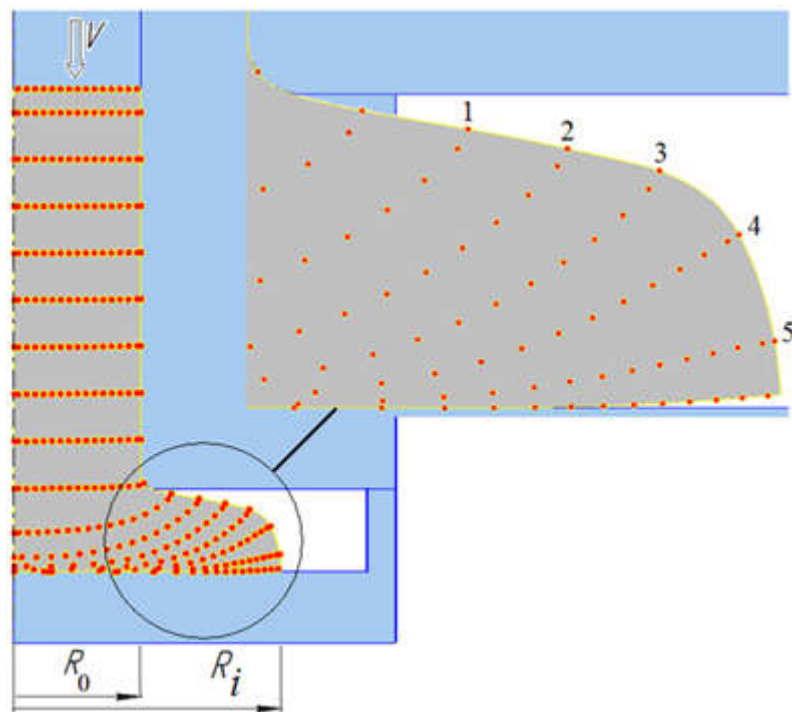


Рисунок 4.53 – Зображення обраних точок на зовнішній поверхні фланця

Результати розрахунків напружено-деформованого стану були

використані для оцінки значень використаного ресурсу пластичності, який визначали за критерієм І. О. Сивака. Компоненти напружено-деформованого стану наведені на рис. 4.54, 4.55.

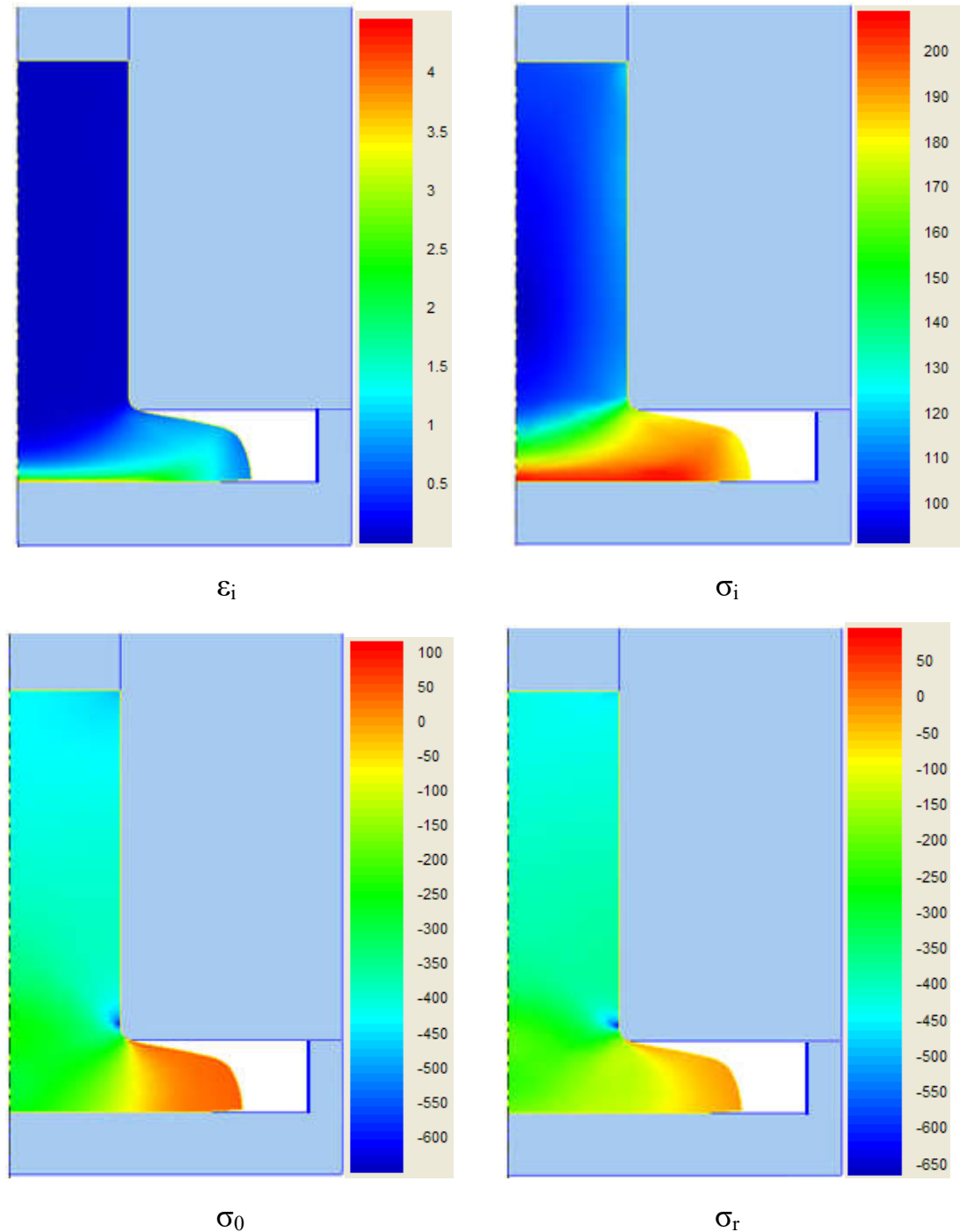


Рисунок 4.54 – Компоненти напружено деформованого стану: інтенсивність деформації (ϵ_i), інтенсивність напружень (σ_i), середнє напруження (гідростатичний тиск) (σ_0), радіальне напруження (σ_r)

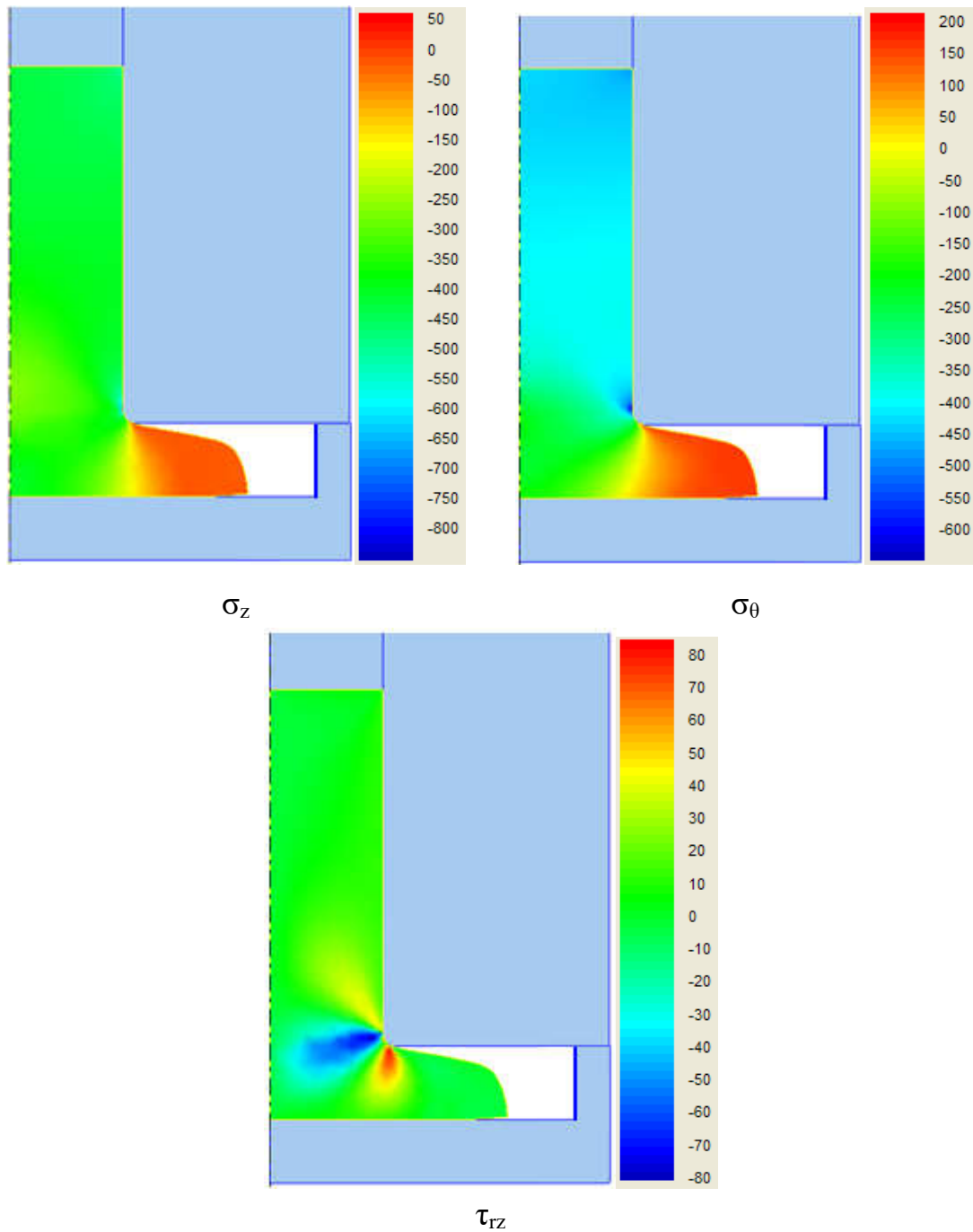


Рисунок 4.55 – Компоненти напружено деформованого стану: осьове напруження (σ_z), тангенціальне напруження (σ_θ), напруження зсуву (τ_{rz})

Відповідно до проведеного моделювання було встановлено, що осередок деформації знаходиться під пуансоном. По лінії, від кромки пуансона до заокруглення верхньої півматриці, відбувається поділ течії металу в радіальному напрямку. Форма фланця має форму «чобота».

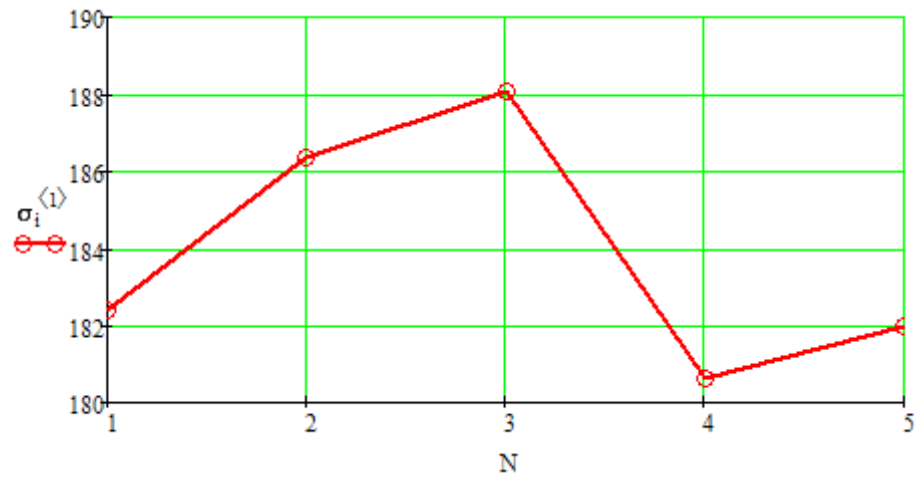
Наявність бочкоподібності на зовнішній поверхні фланця і відхилення поверхні нижнього торця від площинності пояснюється наявністю сил тертя, а також особливостями кінематики течії частинок металу в порожнину, утворену півматрицею і протипуансоном. Головні напруження визначаються з рішення характеристичного рівняння, яке в загальному випадку є кубічним. Розглядалася крива, побудована за трасованими точкам, розташована під перехідною кромкою пуансона поблизу радіуса заокруглення півматриці і на поверхні фланця.

Графіки розподілу вихідних параметрів для розрахунку використаного ресурсу пластичності (рис. 4.56, Г.9 та Г.10) наведені в залежності від номера трасованої точки. Інтенсивність деформації (див. рис. 4.56, а) від 0,8 збільшується до 0,98 і зменшується до 0,73, а потім збільшується до 0,79. Розподіл значень інтенсивного напруження опору деформування (див. рис 4.56, б) від 182 МПа збільшується до 188 МПа і зменшується до 180 МПа, а потім збільшується до 182 МПа. На графіку (див. рис. 4.56, в) розподілу значень середнє напруження (гідростатичного тиску) зменшується до 54 МПа і зростає до 60 МПа. Графіки розподілу головного напруження (див. рис. Г.9) мають мінімальні значення $\sigma_1=1,33$ МПа, $\sigma_2=10,8$ МПа, $\sigma_3=182$ МПа і максимальні $\sigma_1=18$ МПа, $\sigma_2=0,76$ МПа, $\sigma_3=178$ МПа.

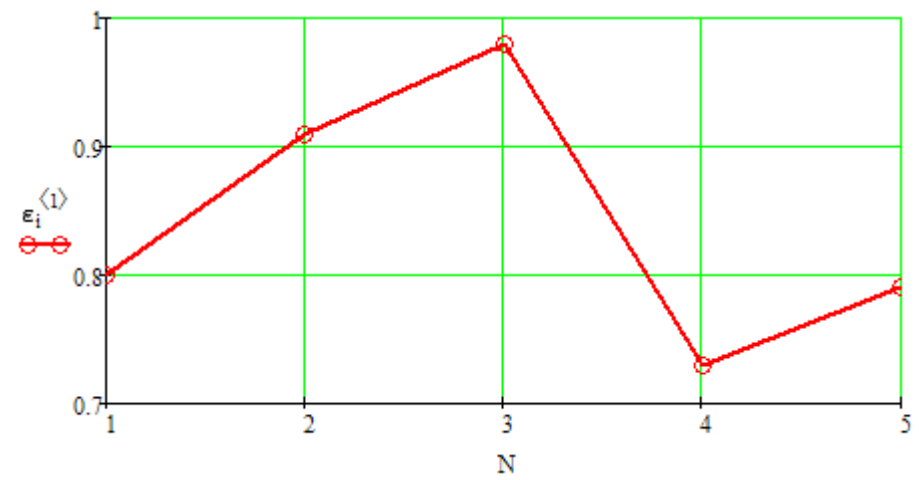
З рішення характеристичного рівняння отримані розподіли головних напружень. Максимальні значення параметра Надаї-Лоде (див. рис. Г.10) складають 0,99, для показника жорсткості напруженого стану – 0,975, для ресурсу пластичності 0,97. Найбільш небезпечною з точки зору вичерпання ресурсу пластичності є зона на зовнішній поверхні фланця в точці 3 при $R_i/R_0=2,05$ і час $S/R_0=1,7$ відбувається руйнування, яке показує сприятливий напружений стан, але при цьому розрахунок використаного ресурсу пластичності доводиться екстраполювати в області діаграми пластичності.

Виходячи з отриманих результатів, проводилося подальше вивчення пластичних здатностей матеріалу: АМцМ. Моделювання процесу здійснювалося до повного вичерпання ресурсу пластичності матеріалу $\psi \geq 1$.

а



б



в

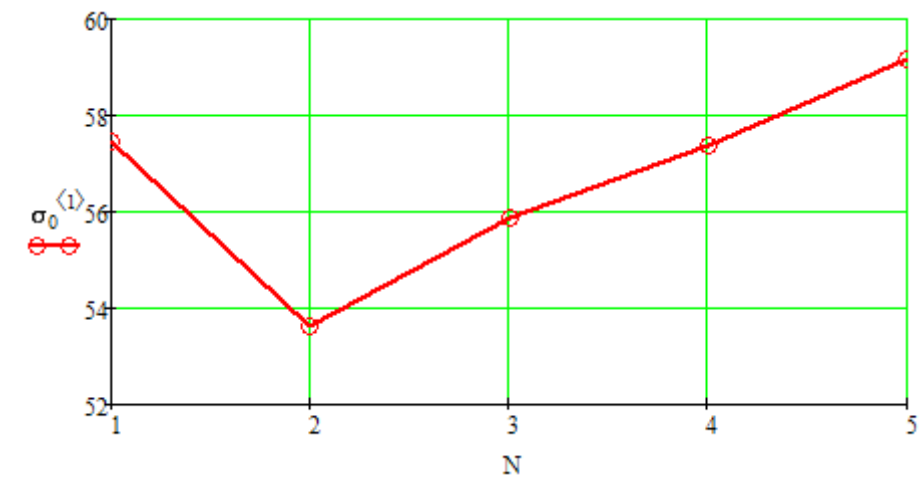


Рисунок 4.56 – Графіки розподілу інтенсивності деформації (а), інтенсивності напружень (б), середнього напруження (гідростатичного тиску) (в) в залежності від положення трасованої точки

Поверхня граничних деформацій для АМцМ: $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1.1 \cdot e^{(0.42 \cdot \mu_\sigma - 0.51 \cdot \eta)}$.

Результати представлені у вигляді залежності ресурсу пластичності від логарифмічної деформації (рис. 4.57). Встановлено, що при досягненні значення логарифмічної деформації $\varepsilon_i=1,01$ наступить руйнування фланцю.

Для процесу радіального видавлювання з односторонньою (рис. 4.58) та двосторонньою (рис. 4.59) подачею спостерігається незначне збільшення ресурсу пластичності $\varepsilon_i=1,018$ (рис. 4.60) та $\varepsilon_i=1,0$ (рис. 4.61).

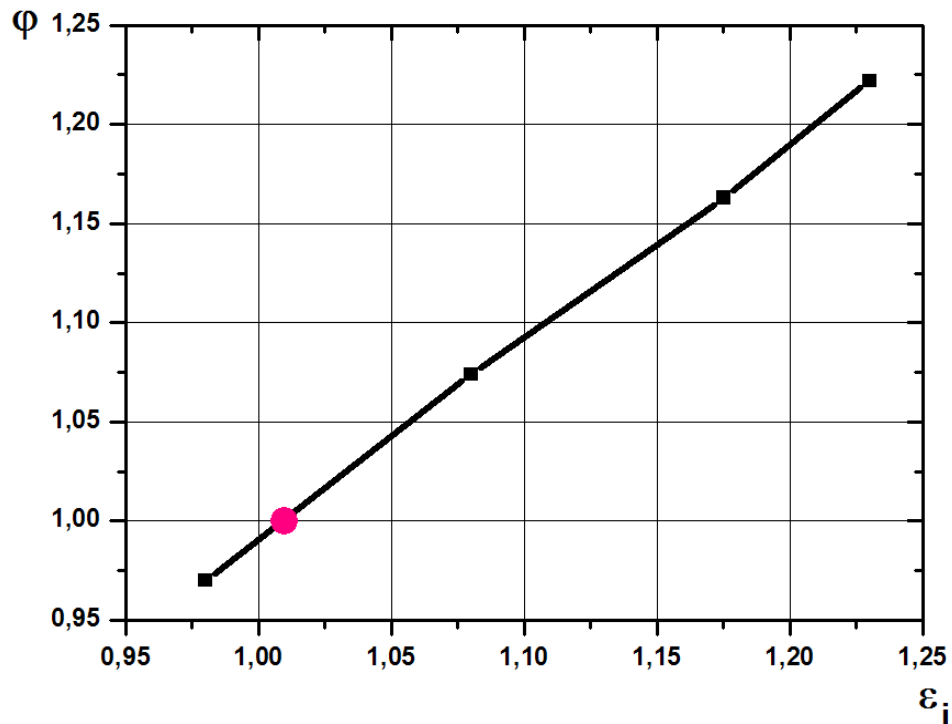


Рисунок 4.57 – Графік залежності ресурсу пластичності від логарифмічної деформації для алюмінієвого сплаву АМцМ в точці можливого руйнування №3, $R_i/R_0=2,05$

4.5 Визначення параметрів силового режиму кінематичних варіантів радіального видавлювання методом планування експерименту

Схеми поетапної зміни деформованого стану при радіальному видавлюванні деталей із зовнішнім фланцем, отримані в пакеті QForm, 2D/3D наведені на рис. 4.62, графіки залежності сила видавлювання і сила розкриття матриці представлені на рис. 4.63.

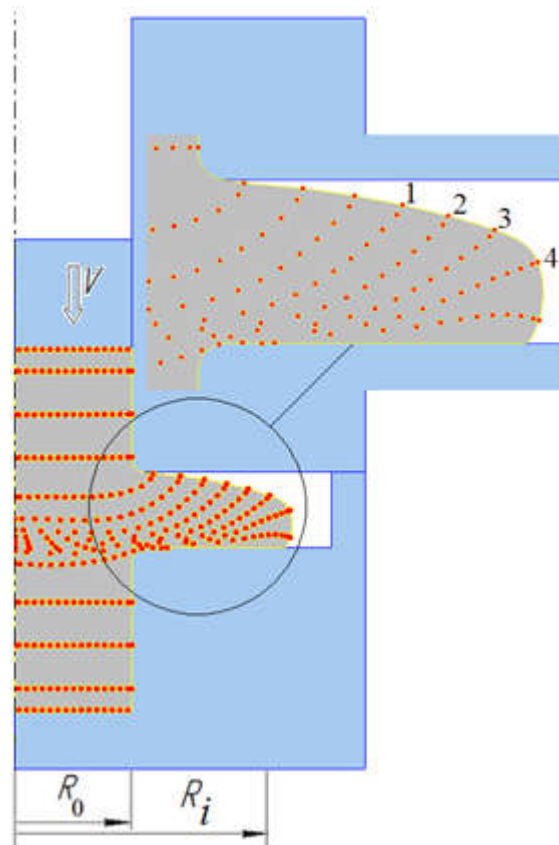


Рисунок 4.58 – Зображення обраних точок на зовнішній поверхні фланця при односторонній подачі металу

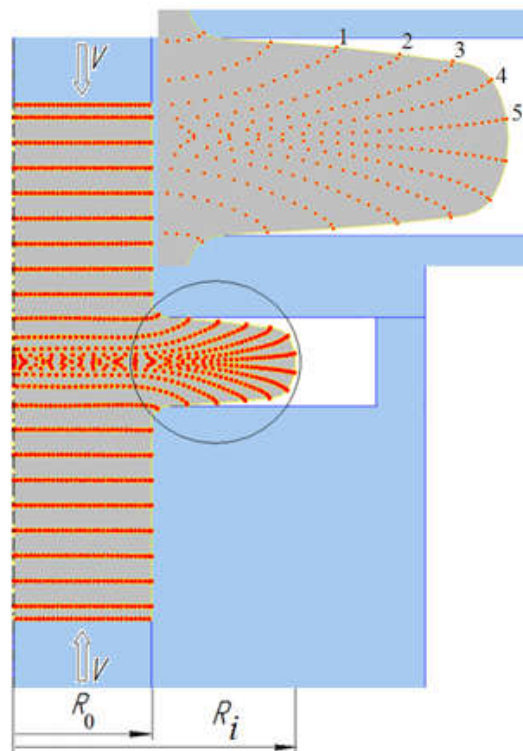


Рисунок 4.59 – Зображення обраних точок на зовнішній поверхні фланця при двосторонній подачі металу

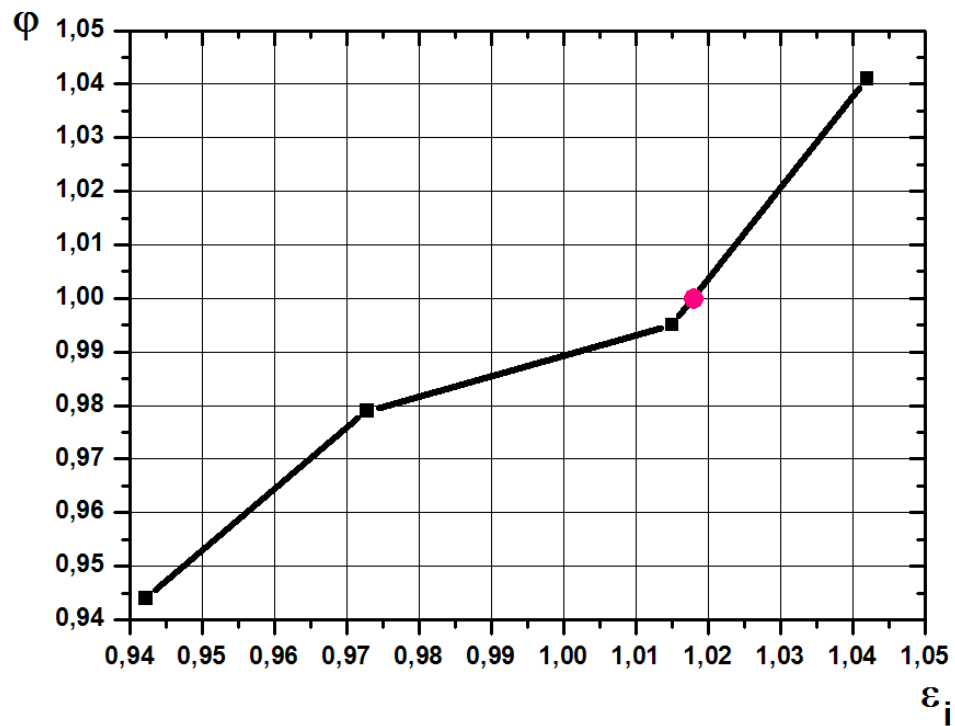


Рисунок 4.60 – Графік залежності ресурсу пластичності від логарифмічної деформації для алюмінієвого сплаву АМцМ в точці можливого руйнування №3 при односторонній подачі металу $R_i/R_0=2,25$

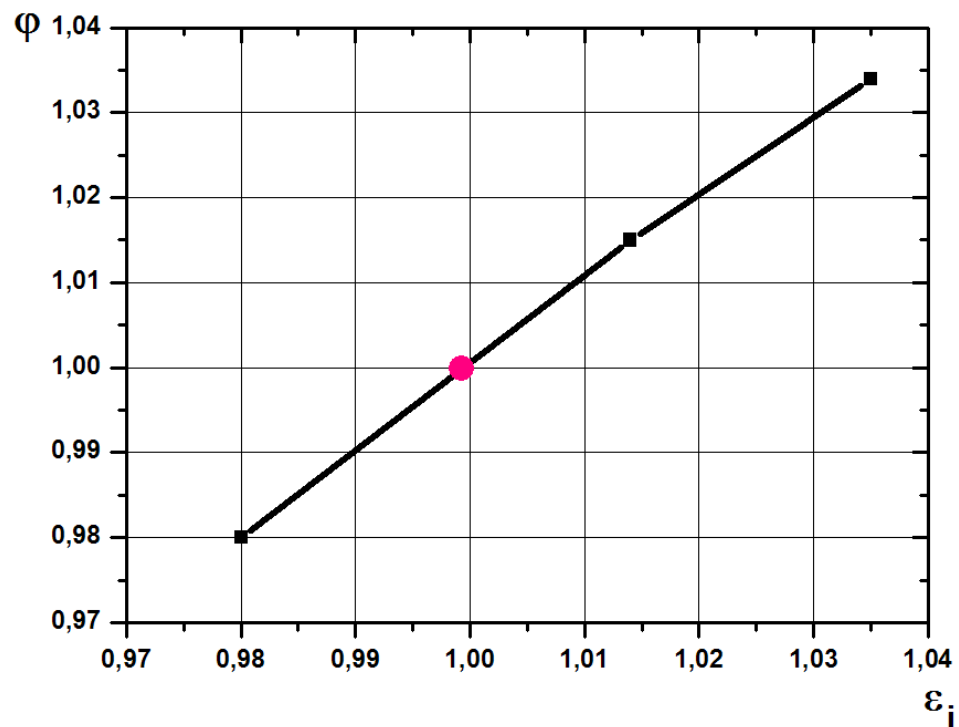


Рисунок 4.61 – Графік залежності ресурсу пластичності від логарифмічної деформації для алюмінієвого сплаву АМцМ в точці можливого руйнування №3 при двосторонній подачі металу $R_i/R_0=1,95$

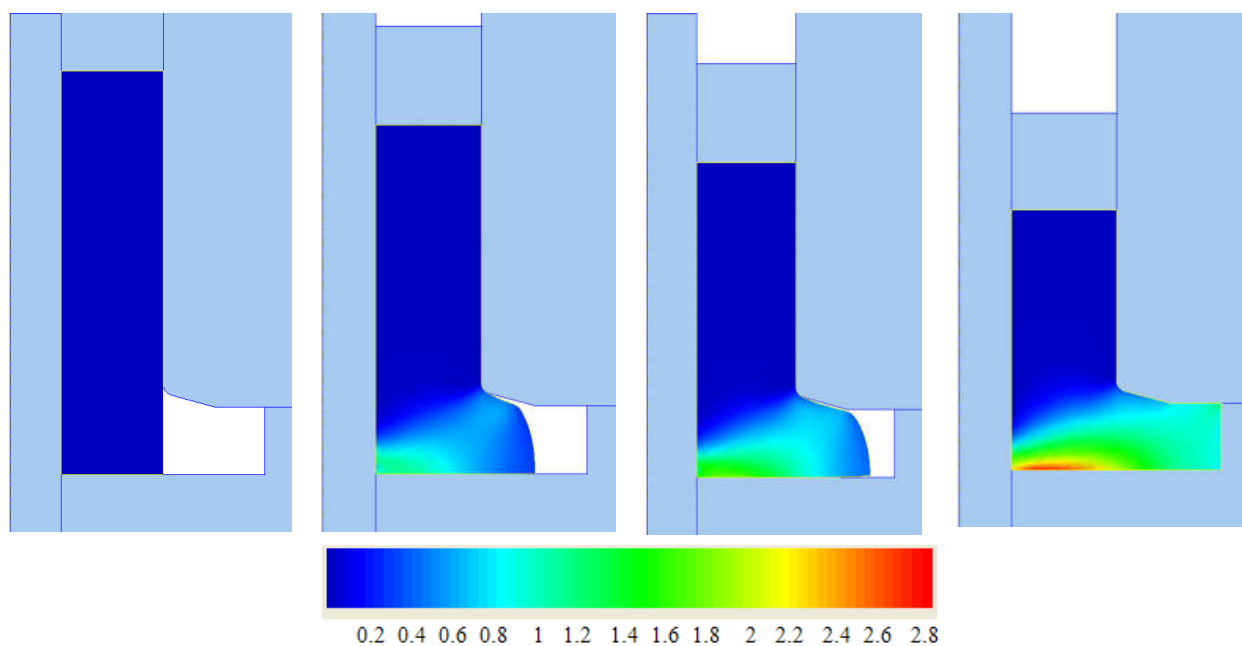
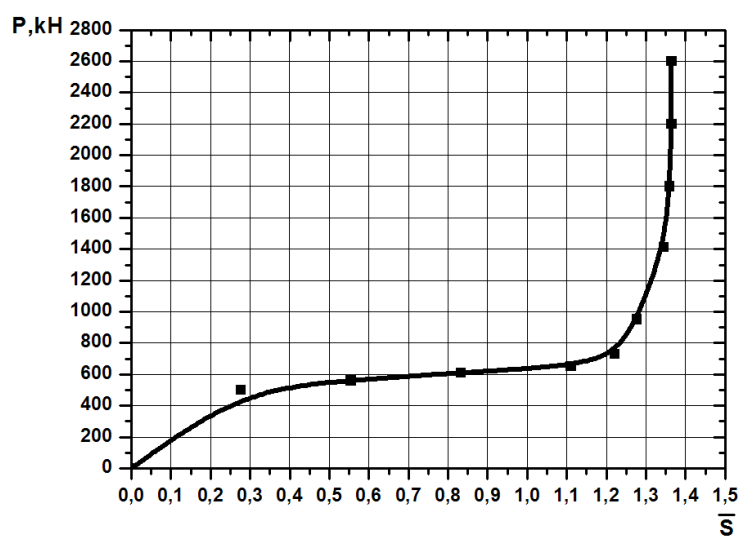


Рисунок 4.62 – Схеми поетапна формозміни заготовки при радіальному відвалюванні

а



б

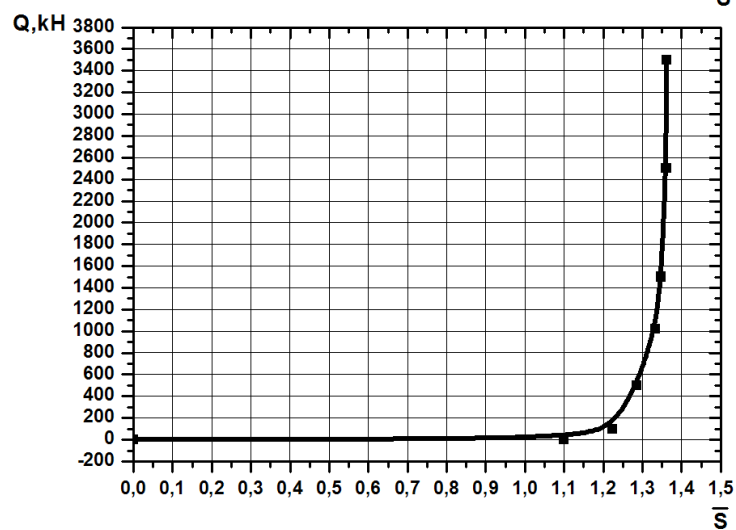


Рисунок 4.63 – Графіки залежності сили видавлювання (а) і сили розкриття матриці (б)

Відповідно до проведеного моделювання, було встановлено, що осередок деформації має параболічний характер; осередок деформації по висоті дорівнює висоті фланця; максимальне значення деформації має місце біля внутрішньої стінки у нижнього торця фланця.

Для визначення залежності сила видавлювання і сила розкриття полуматриці від різних параметрів процесу використовувався метод планування експерименту. Варіювалися наступні параметри: кут на інструменті α , відносний радіус фланця ($\bar{R}=R/t$), відносна висота фланця ($\bar{h}=h/t$). Інтервали варіювання факторів і їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому і нижньому рівнях вказані в таблиці рівнів факторів (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Рівні факторів

Фактори	$X_1 (\alpha)$	$X_2 (\bar{R})$	$X_3 (\bar{h})$
Основний рівень (X_{i_0})	15	2.25	0.45
Інтервал варіювання (ΔX_i)	15	0.25	0.2
Верхній рівень ($x_i=1$)	30	2.5	0.65
Нижній рівень ($x_i=-1$)	5	2	0.25

З використанням методики, описаної в розділі 2, були отримані залежності сила, тиску, приведенного тиску (4.22) видавлювання, а також залежності сила, тиску, приведенного тиску (4.23) розкриття матриці від варіюваних факторів.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{радіальне}} = & 636.8 - 19 \cdot \frac{\alpha - 15}{15} + 604 \cdot \frac{R - 2.25}{0.25} - 115 \cdot \frac{h - 0.45}{0.2} + \\
 & + \left(8.75 \cdot \frac{\alpha - 15}{15} \cdot \frac{R - 2.25}{0.25} \right) - 33.75 \cdot \frac{\alpha - 15}{15} \cdot \frac{h - 0.45}{0.2} - 16.25 \cdot \frac{R - 2.25}{0.25} \cdot \frac{h - 0.45}{0.2} + \\
 & + 73.1 \cdot \left(\frac{\alpha - 15}{15} \right)^2 + \left[468.1 \cdot \left(\frac{R - 2.25}{0.25} \right)^2 + 113.1 \cdot \left(\frac{h - 0.45}{0.2} \right)^2 \right] \quad (4.22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{розкриття}}^{\text{радіальне}} = & 0 + 161 \cdot \frac{\alpha - 15}{15} + 1.04 \cdot 10^3 \cdot \frac{R - 2.25}{0.25} - 62 \cdot \frac{h - 0.45}{0.2} + \\
& + \left(92.5 \cdot \frac{\alpha - 15}{15} \cdot \frac{R - 2.25}{0.25} \right) - 85 \cdot \frac{\alpha - 15}{15} \cdot \frac{h - 0.45}{0.2} + 82.5 \cdot \frac{R - 2.25}{0.25} \cdot \frac{h - 0.45}{0.2} + \\
& + 185 \cdot \left(\frac{\alpha - 15}{15} \right)^2 + \left[810 \cdot \left(\frac{R - 2.25}{0.25} \right)^2 + 190 \cdot \left(\frac{h - 0.45}{0.2} \right)^2 \right]
\end{aligned} \quad (4.23)$$

На рис. 4.64, 4.65, Г.11...Г.14 представлені залежності приведенного тиску, тиску, сила видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від кута на інструменті, відносної висоти фланця і радіусу фланця при різних параметрах процесу.

З представленого графіка (див. рис. 4.64, 4.65) видно, що збільшення фаски α , при інших рівних параметрах, призводить до збільшення поверхні контактного тертя і тим самим тягне за собою збільшення значень силових характеристик. Аналогічний характер впливу фаски на інструменті спостерігається і для значень розкриття матриці. Як було зазначено вище, збільшення даного параметру показує менше відхилення форми фланцю і тим самим збільшується тиск на матрицю з боку металу. Зазначимо, що зміна відносного радіусу фланця незначно впливає на значення сили видавлювання. Відхилення значень від середнього до 5%. Це пов'язано з тим, що осередок деформування по ходу протікання всього процесу не змінюється. Зміна відносного радіусу фланцю впливає лише на значення розкриття матриці (див. рис. 4.65, б).

Збільшення будь-яких відносних розмірів призводить до збільшення силових характеристик.

Збільшення висоти фланцю зменшує силу деформування за рахунок зменшення ступеня деформування (див. рис. Г.13, Г.14). На основі отриманих кривих (див. рис. Г.14), можна зробити висновок, що існує оптимальне значення відносної висоти фланцю, що дорівнює 0,5, при якому спостерігається мінімум значень силових характеристик не залежно від обраної величини фаски на інструменті.

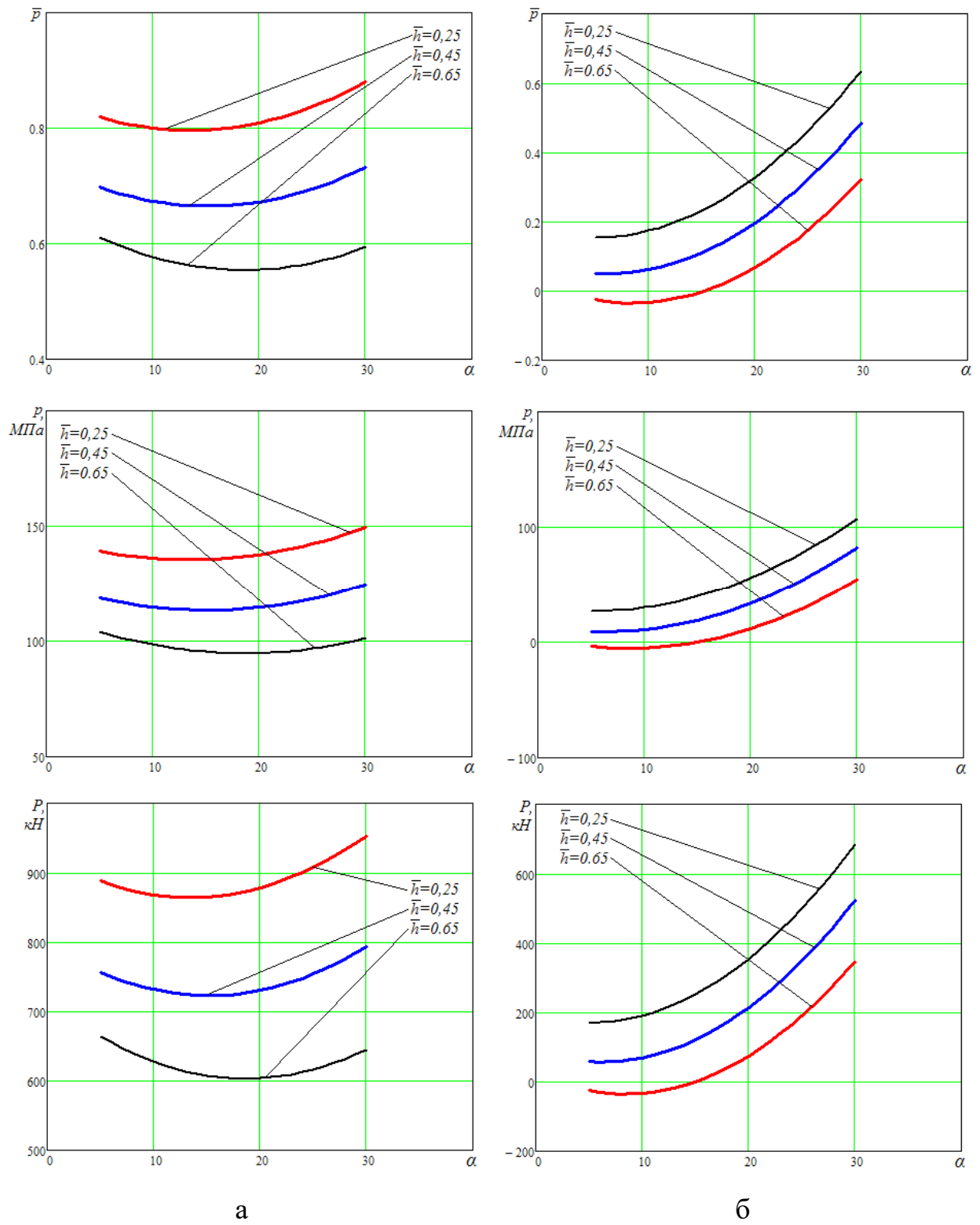


Рисунок 4.64 – Графіки залежності приведенного тиску, тиску та сили видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від кута фаски на інструменті при різних відносних висотах фланця

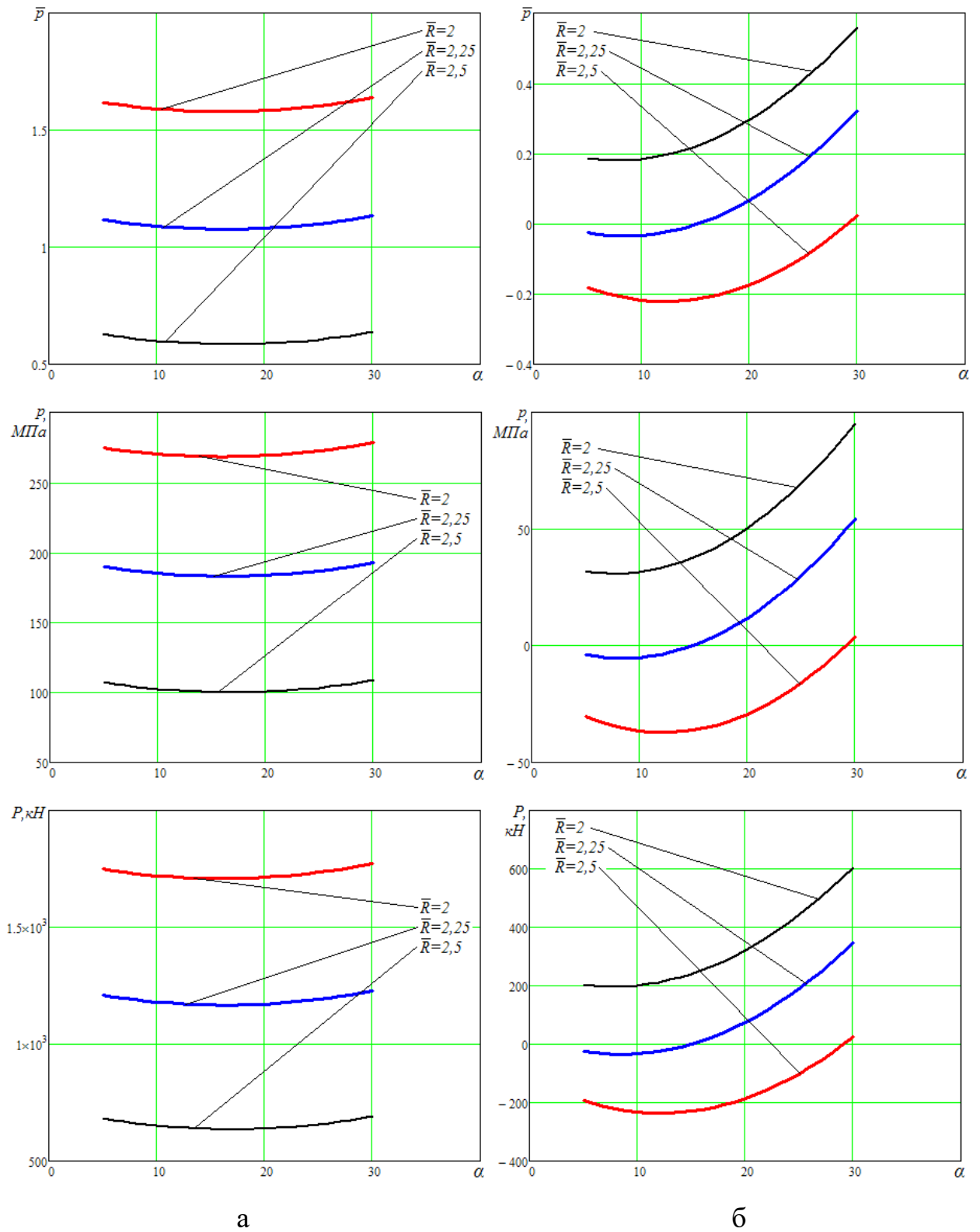


Рисунок 4.65 – Графіки залежності приведенного тиску, тиску та сили видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від кута фаски на інструменті при різних відносних радіусах фланця

4.6 Дослідження процесу утворення дефектів типу утягнень при радіальному видавлюванні фланця на оправці

Основною проблемою при виготовленні деталей з фланцем є утворення утягнення в процесі закритого радіального видавлювання. На виникнення утягнення впливають механічні і пластичні властивості матеріалу. Головним завданням для поліпшення якості деталі, що виготовляється, є визначення умов появи даного дефекту при різних співвідношеннях розмірів видавлюємої заготовки. Моделювання проводилося на основі методу скінченних елементів за допомогою програми QForm 2D/3D.

Перспективним методом отримання осесиметричних деталей з фланцями є холодне видавлювання і, зокрема, закрите радіальне видавлювання, що характеризується витіканням металу заготовки в поперечному напрямку і заповненні радіальної порожнини роз'ємної матриці.

У фланців, які одержують поперечним радіальним видавлюванням, є характерні форми (грибоподібність, клиновидність та ін.), зумовлені особливостями пластичної течії в поперечному напрямку. При формоутворенні методами точного об'ємного штампування порожнистих деталей з фланцями, що перевищують по висоті товщину стінки заготовки, з'являються характерні відхилення форми у вигляді утягнень, складок і затисків металу.

Характерними дефектами для процесу закритого радіального видавлювання фланців на порожнистих заготовках є утягнення, які з'являються на внутрішній поверхні порожнистої заготовки при значеннях висоти приймальної порожнини, що перевищують товщину стінки трубчастої заготовки.

У всіх випадках деформування в зазначеному діапазоні відносних товщин фланця на якість формоутворення починає впливати і такий параметр, як товщина стінки вихідної трубчастої заготовки. Строго кажучи, слід аналізувати співвідношення товщини фланця і товщини стінки. Ще

одним важливим параметром є співвідношення товщини і ширини фланця $h/(R_1-R_0)$, яке відображає здатність фланця до стійкої деформації. На роздачу отвору впливає як значення відносної товщини фланця, так і умови тертя на торці нижньої півматриці. При наявності в зоні контакту торця заготовки з півматрицею навіть незначного тертя, воно надає гальмуючий вплив на заготовку, що призводить до утворення утягнення на деякому віддаленні від торця заготовки.

У вигляді неприлягання зовнішнього контуру деталі до поверхні матриці утягнення є характерним дефектом форми також і для процесу закритого радіального видавлювання. Величина утягнення залежить від багатьох факторів, одним з яких є форма перехідної кромки матриці. Утягнення на внутрішній поверхні трубчастих деталей можна усунути виконанням радіального видавлювання в приймальню порожнину змінної, поступово і узгоджено збільшуємої висоти. При поетапному збільшенні висоти порожнини утягнення у видавленого фланця утворюються на зовнішній поверхні по периметру обіду фланця. Для попередження утягнення на внутрішній поверхні заготовки формують також технологічний борт, який розгладжують при зворотному ході.

4.6.1 Особливості бездефектного формоутворення заготовок при радіальному видавлюванні

Утягнення виникає внаслідок зміни напрямку деформування верхніх шарів металу (безпосередньо під пуансоном) з горизонтального на вертикальне, (рис. 4.66...4.68). Усувається зниженням швидкості деформування.

Моделювання процесу радіального видавлювання фланця на торці трубчастої заготовки (видавлювання на оправці) показало, що при певних геометричних параметрах процесу спостерігається поява на деталях дефекту типу утягнення.

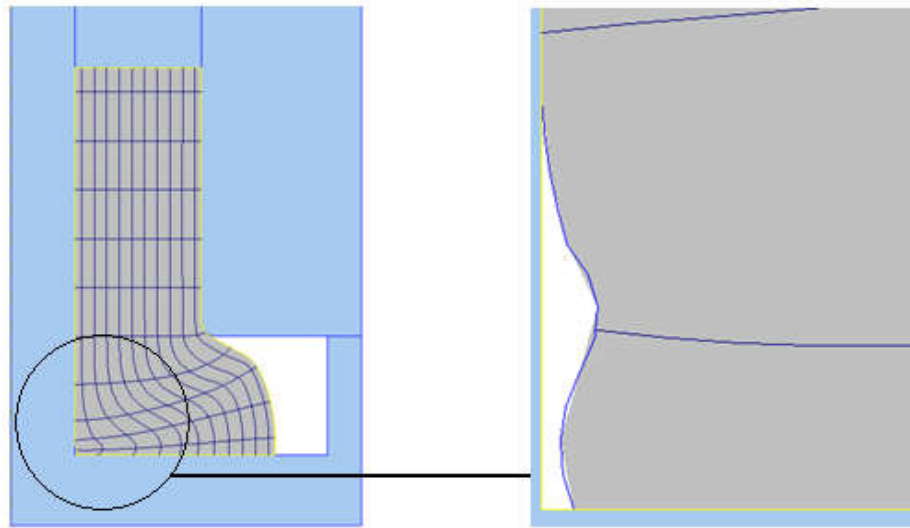
Також помітно, що максимальні інтенсивності деформацій і напружень зосереджені в зоні появи утягнення.

Обрані наступні параметри для моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці стрижня: R_0 – зовнішній радіус заготовки ($R_0=27$ мм), R – радіус фланця ($R=45$ мм), R_1 – внутрішній радіус заготовки ($R_1=9$ мм), $t = R_0 - R_1$, h – висота приймальної порожнини для видавлювання фланця ($h=8$ мм), r – радіус заокруглення кромки інструменту ($r=2$ мм), f – фаска інструменту ($f=2$ мм), L – висота заготовки ($L=70$ мм).

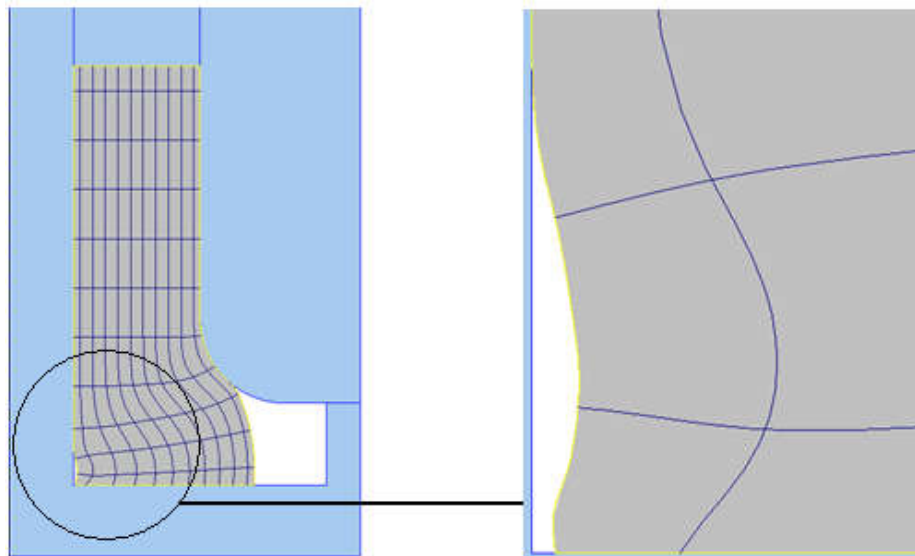
На графіках (рис. 4.69...4.71) показано, при яких поєднаннях значень дефект типу утягнення буде з'являтися.

На схемі (див. рис. 4.66 а) розглядається процес появи утягнення при відносній висоті фланця $\bar{S}=0,85$, максимальні інтенсивності деформацій і напружень зосереджені в зоні появи утягнення. На графіку (див. рис. 4.69) помітно, що з відносною висотою фланця $\bar{h}=0,1$ і відносним ходом деформувального пуансона $\bar{S}=0,2$ до значень $\bar{h}=0,8$ з відносним ходом $\bar{S}=1,66$ утягнення не спостерігається, а значить, відбувається заповнення металом порожнини під фланець. Далі, при $\bar{h}=0,85$ з відносним ходом понад $\bar{S}=0,30$; при $\bar{h}=0,9$ понад $\bar{S}=0,18$; при $\bar{h}=0,95$ понад $\bar{S}=0,13$ і при $\bar{h}=1,0$ понад $\bar{S}=0,10$ з'являється утягнення. На схемі (див. рис. 4.66 б) розглядається процес появи утягнення при відносному радіусі заокруглення кромки інструменту ($r/R_0=0,66$). На рис. 4.70 видно, що з відносною висотою фланця $\bar{h}=0,11$ і відносним ходом деформувального пуансона $\bar{S}=1,3$ до значень $\bar{h}=0,61$ з відносним ходом $\bar{S}=1,45$ утягнення не спостерігається. Далі, при $\bar{h}=0,66$ з відносним ходом понад $\bar{S}=0,05$ і при $\bar{h}=0,72$ понад $\bar{S}=0,04$ з'являється утягнення. На схемі (див. рис. 4.66 в) розглядається процес появи утягнення при відносній фасці на інструменті ($f/R_0=0,44$). На рис. 4.71 видно, що з відносною висотою фланця $\bar{h}=0,12$ і відносним ходом деформуючого пуансона $\bar{S}=1,31$ до значень $\bar{h}=0,38$ з відносним ходом $\bar{S}=1,4$ утягнення не спостерігається. Далі, при $\bar{h}=0,44$ з відносним ходом понад $\bar{S}=0,15$ з'являється утягнення.

а



б



в

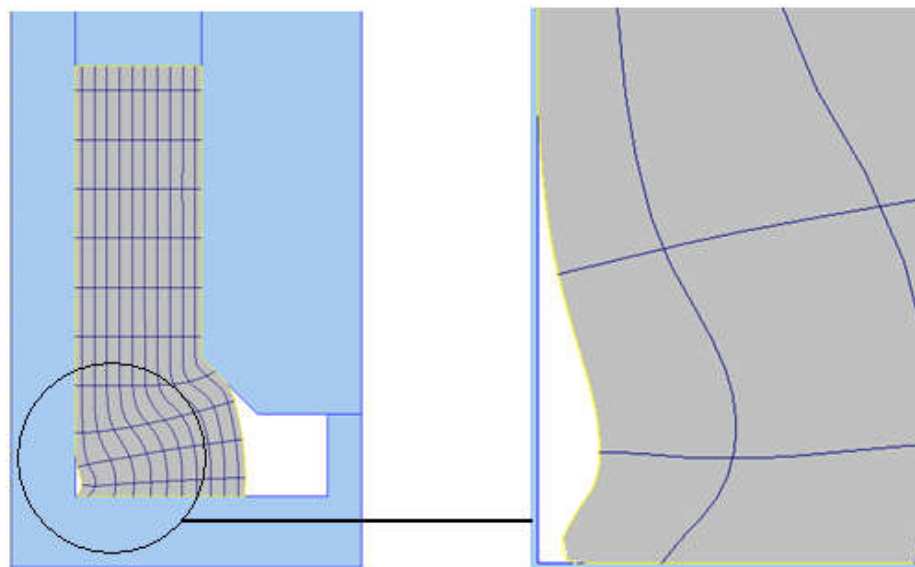


Рисунок 4.66 – Схеми моделювання появи утягнення при відносній висоті фланця $h/t=0,85$ (а), радіусі заокруглення кромки інструменту $r/t=0,66$ (б), і фасці на інструменті $f/t=0,44$ (в)

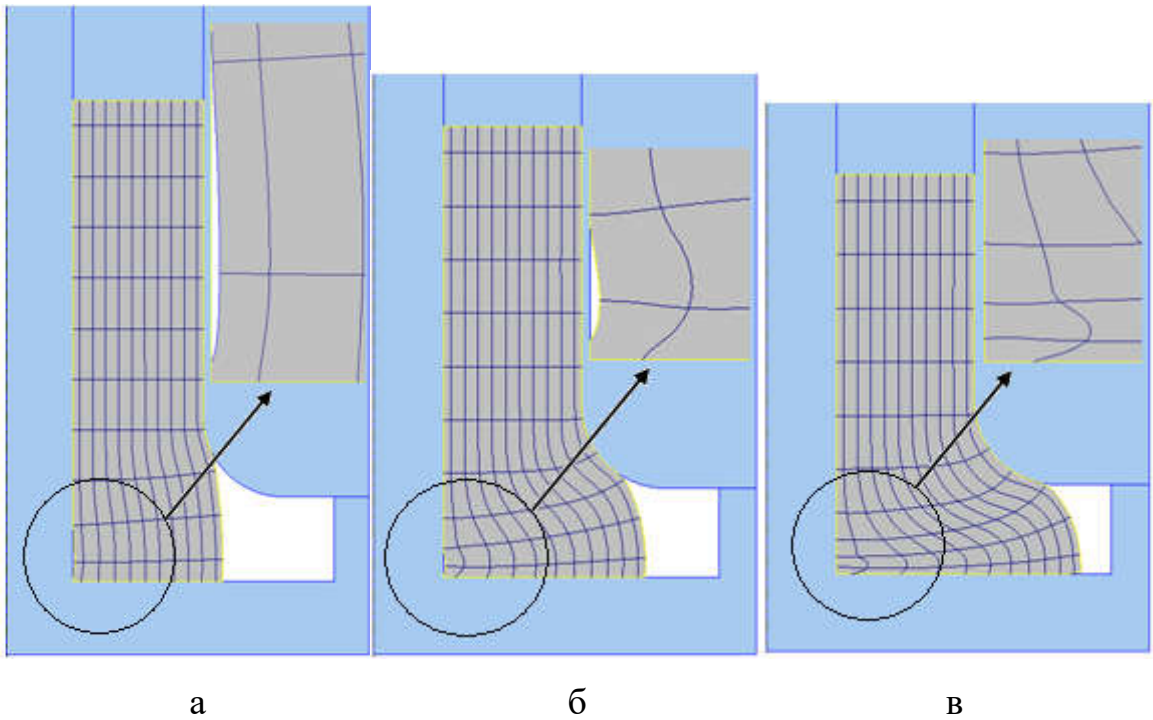


Рисунок 4.67 – Схема моделювання появи і заповнення утягнення при радіусі заокруглення кромки інструменту $r/t=0,6$: а – $\bar{S}=0,2$; б – $\bar{S}=0,6$; в – $\bar{S}=1,0$

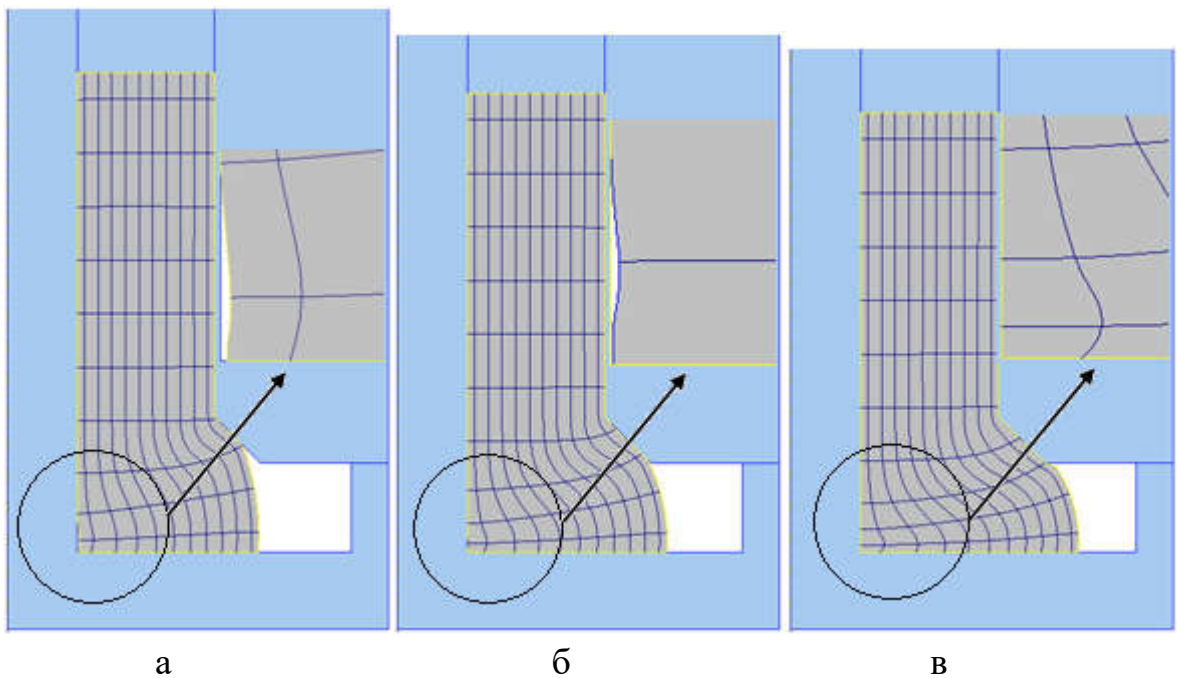


Рисунок 4.68 – Схема моделювання появи і заповнення утягнення при радіусі фасці на інструменті $f/t=0,33$: а – $\bar{S}=0,4$; б – $\bar{S}=0,55$; в – $\bar{S}=0,7$

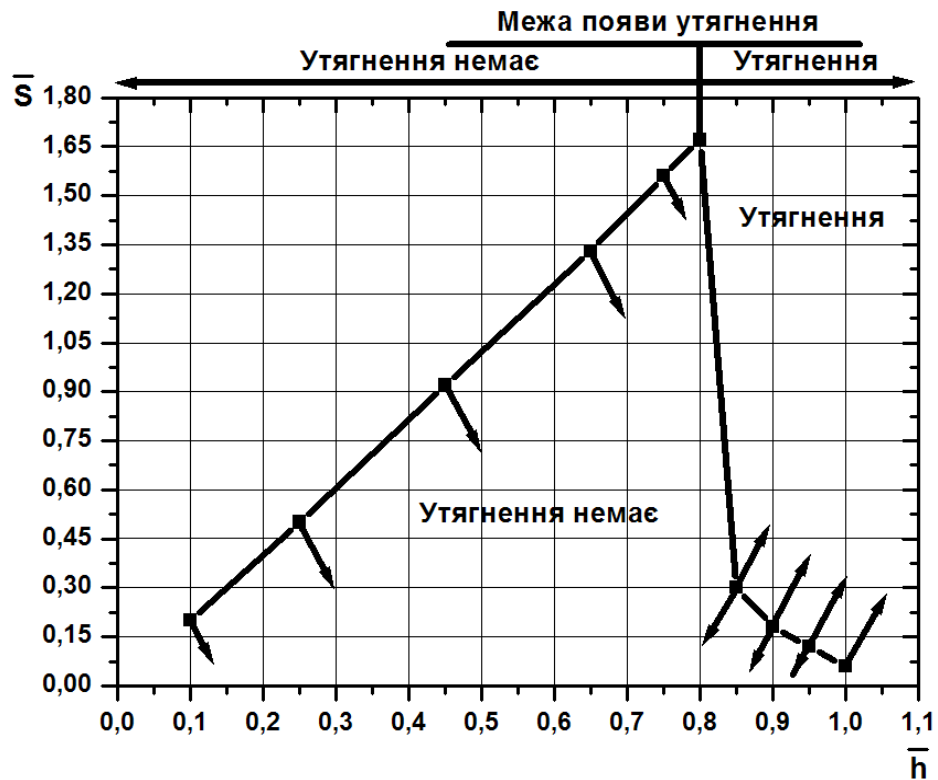


Рисунок 4.69 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона ($\bar{S}$) і відносної висоти фланця ($\bar{h}$)

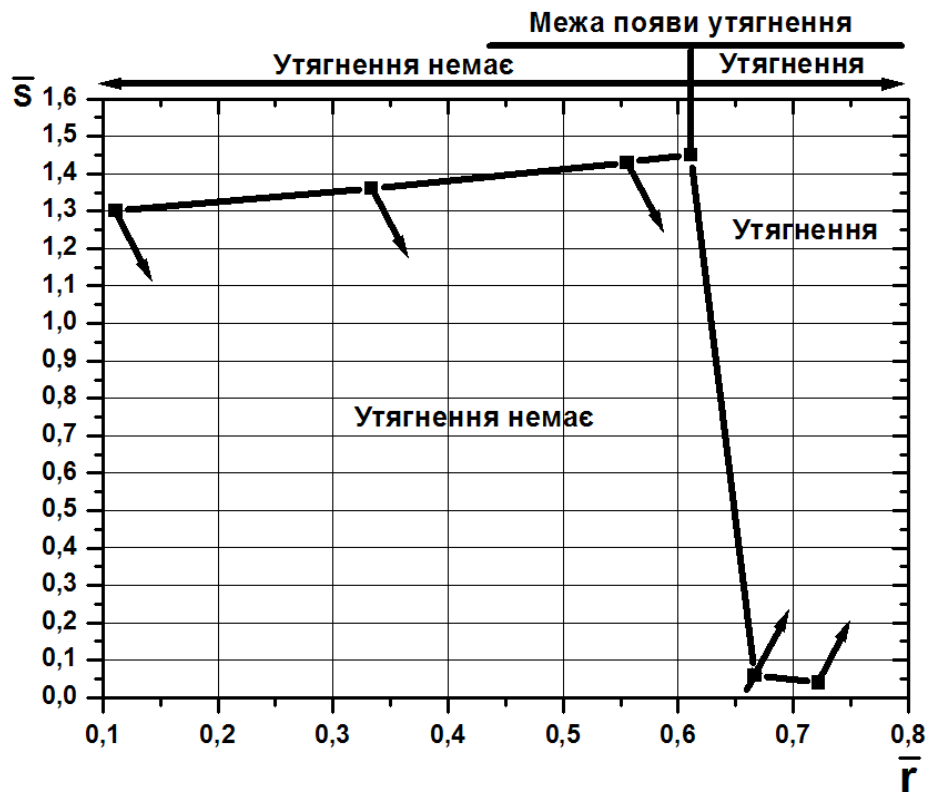


Рисунок 4.70 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона ($\bar{S}$) при відносному радіусі заокруглення кромки інструмента $\bar{r}$

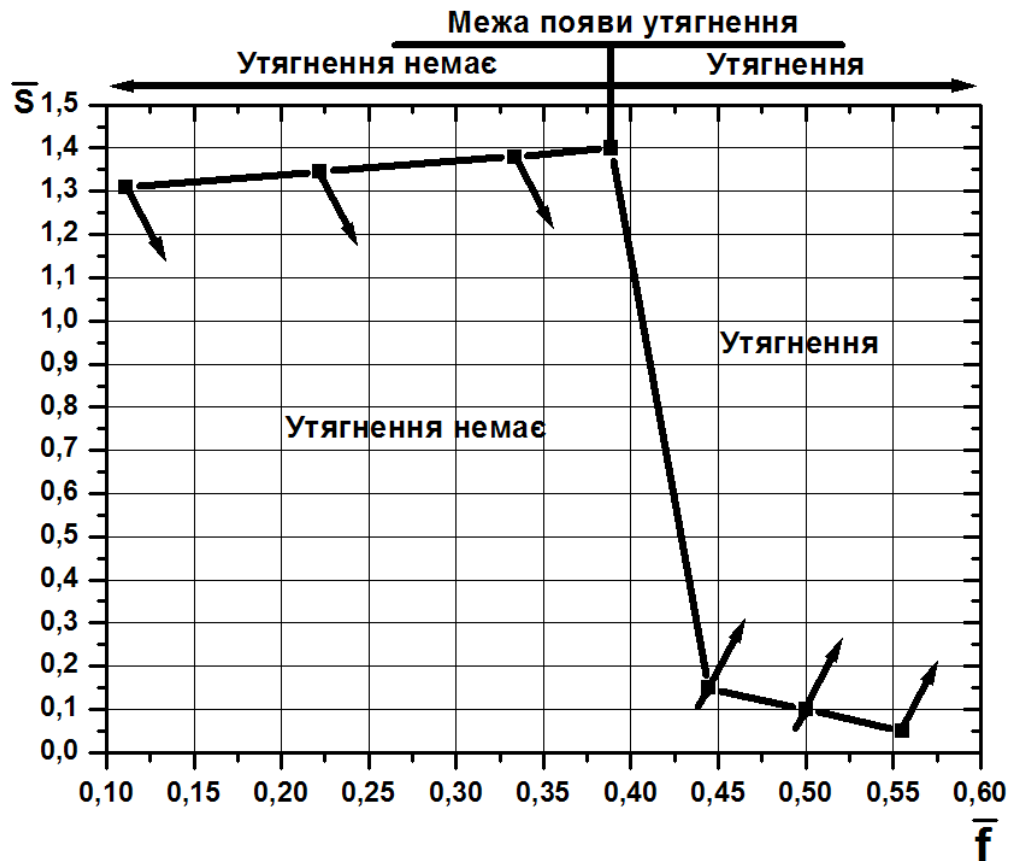


Рисунок 4.71 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона ($\bar{S}$) при відносному значенні фасок на інструменті $\bar{f}$

Для моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці стрижня на оправці (рис. 4.72) обрані параметри, які наведені в підрозділі 4.6, за винятком параметра α – кут конуса в отворі верхньої півматриці ($\alpha=15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$).

На рисунках Г.15...Г.18 показано, при яких поєднаннях значень дефект типу утягнення буде з'являтися.

На рисунку Г.15 розглядається процес появи утягнення з кутом інструменту в середній частині фланця $\alpha=40^\circ$. З рис. 4.73 видно, що на діаграмі область, розташована нижче критичної лінії, відповідає бездефектному видавлюванню деталей, наприклад: з відносною висотою фланця $\alpha=0^\circ$ та відносним ходом деформувального пуансона $\bar{S}=1,31$ до

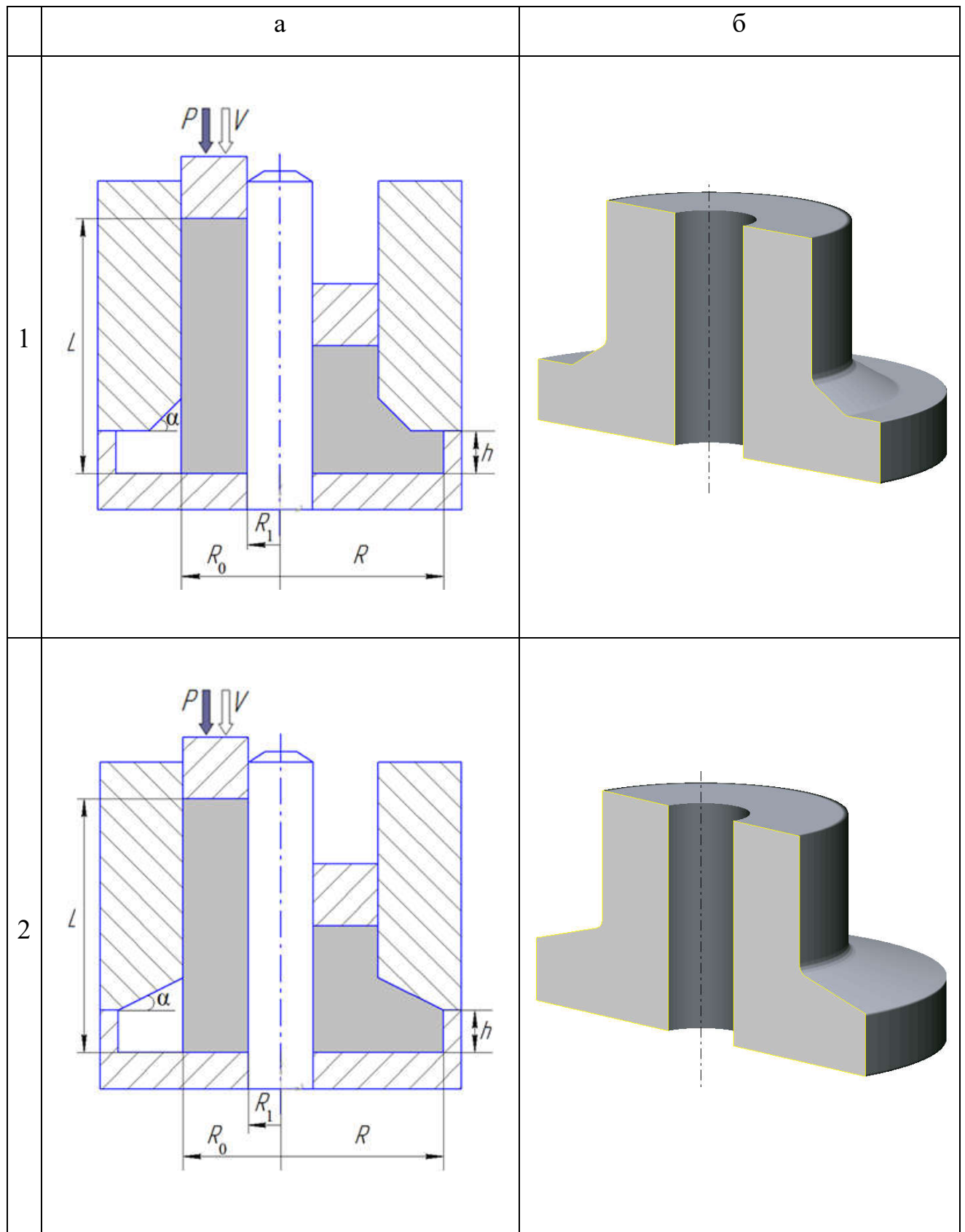


Рисунок 4.72 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця (а) на торці оправлення з односторонньою подачею з кутом інструмент в середній частині фланця (1), і на торці фланця (2) і отриманий напівфабрикат (б)

значень $\alpha=35^\circ$ з відносним ходом $\bar{S}=1,45$ утягнення не спостерігається. Далі, при $\alpha=40^\circ$ з відносним ходом понад $\bar{S}=0,15$ і при $\alpha=45^\circ$ понад $\bar{S}=0,1$ з'являється утягнення.

На рис. Г.17 розглядається процес появи утягнення з кутом інструменту на торці фланця $\alpha=16^\circ$.

На рис. 4.74 видно, що з відносною висотою фланця $\alpha=0^\circ$ та відносним ходом деформувального пуансона $\bar{S}=1,3$ до значень $\alpha=15^\circ$ з відносним ходом $\bar{S}=1,55$ утягнення не спостерігається. При виборі геометричних параметрів процесу, які потрапляють в область, розташовану вище критичної лінії, прогнозується утворення утягнення, наприклад: при $\alpha=16^\circ$ з відносним ходом понад $\bar{S}=0,3$; при $\alpha=20^\circ$ понад $\bar{S}=0,2$ і при $\alpha=30^\circ$ понад $\bar{S}=0,1$ з'являється утягнення.

Керуючись отриманими графіками, можна прогнозувати бездефектне отримання фланців як на оправці, так і з суцільної заготовки.

4.6.2 Регулювання кінематики процесу радіального видавлювання фланця

У цьому розділі розглянуто схеми закритого радіального видавлювання деталей типу втулок з фланцем із застосуванням додатково рухомого інструменту.

Дефекти типу утягнень виникають переважно через радіальний плин металу при наближенні пуансона до зони розташування фланця.

Розглянуто процес виникнення дефектів форми типу утягнень при закритому радіальному видавлюванні деталей з фланцем і встановлено характер впливу технологічних параметрів на процес появи утягнень. Оцінено можливості прийомів підйому півматриці і формування технологічного бурту, спрямованих на усунення або зниження утягнень при видавлюванні фланців.

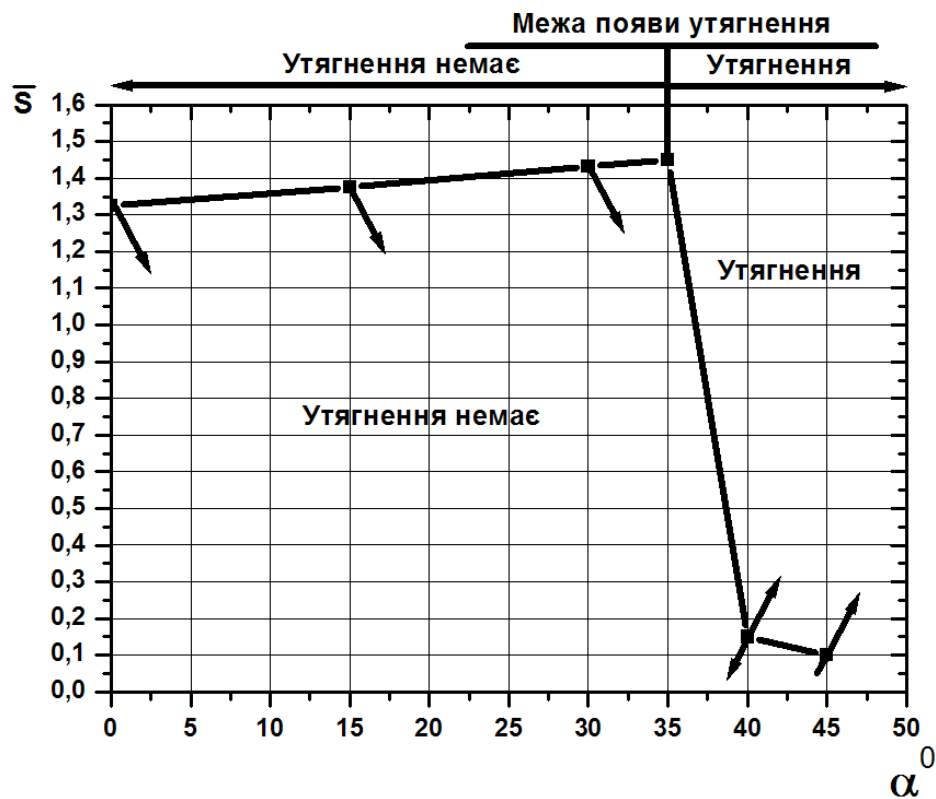


Рисунок 4.73 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона ($\bar{S}$) і кута інструменту в середній частині фланця (α)

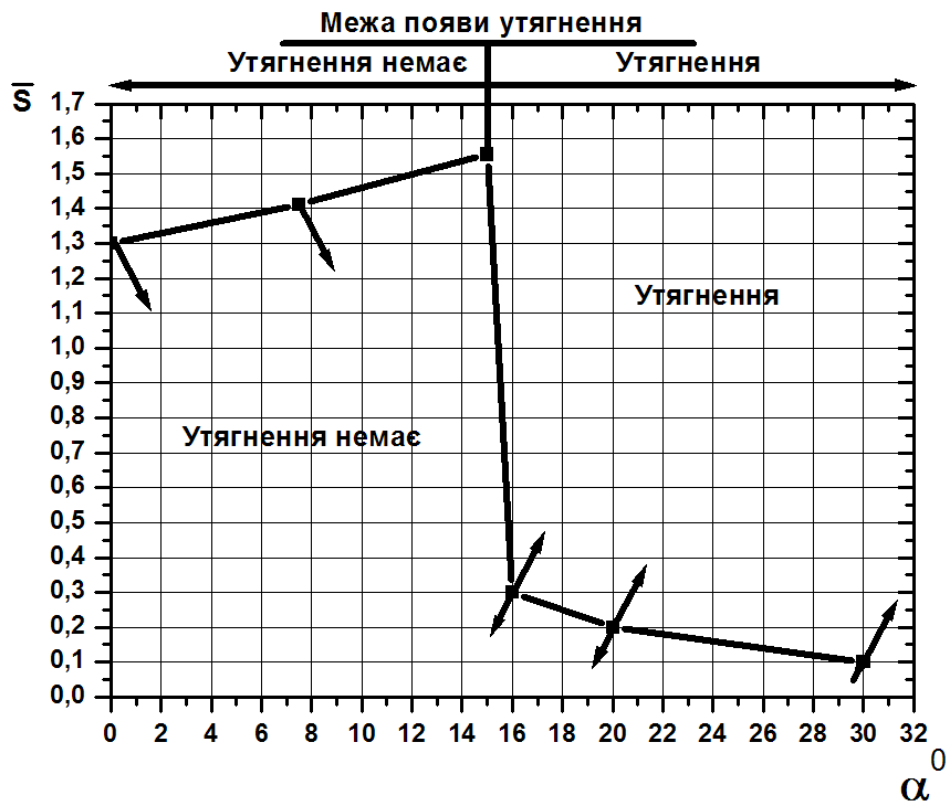


Рисунок 4.74 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона ($\bar{S}$) і кута інструмента на торці фланця (α)

Для усунення дефектоутворення типу утягнень був використаний кінематичний спосіб із застосуванням додаткового рухомого інструменту. Швидкість пуансона $v=1$ мм/с. В силу симетрії розглядається одна половина схеми (а) і отриманий напівфабрикат (б), представлені на рис. 4.75.

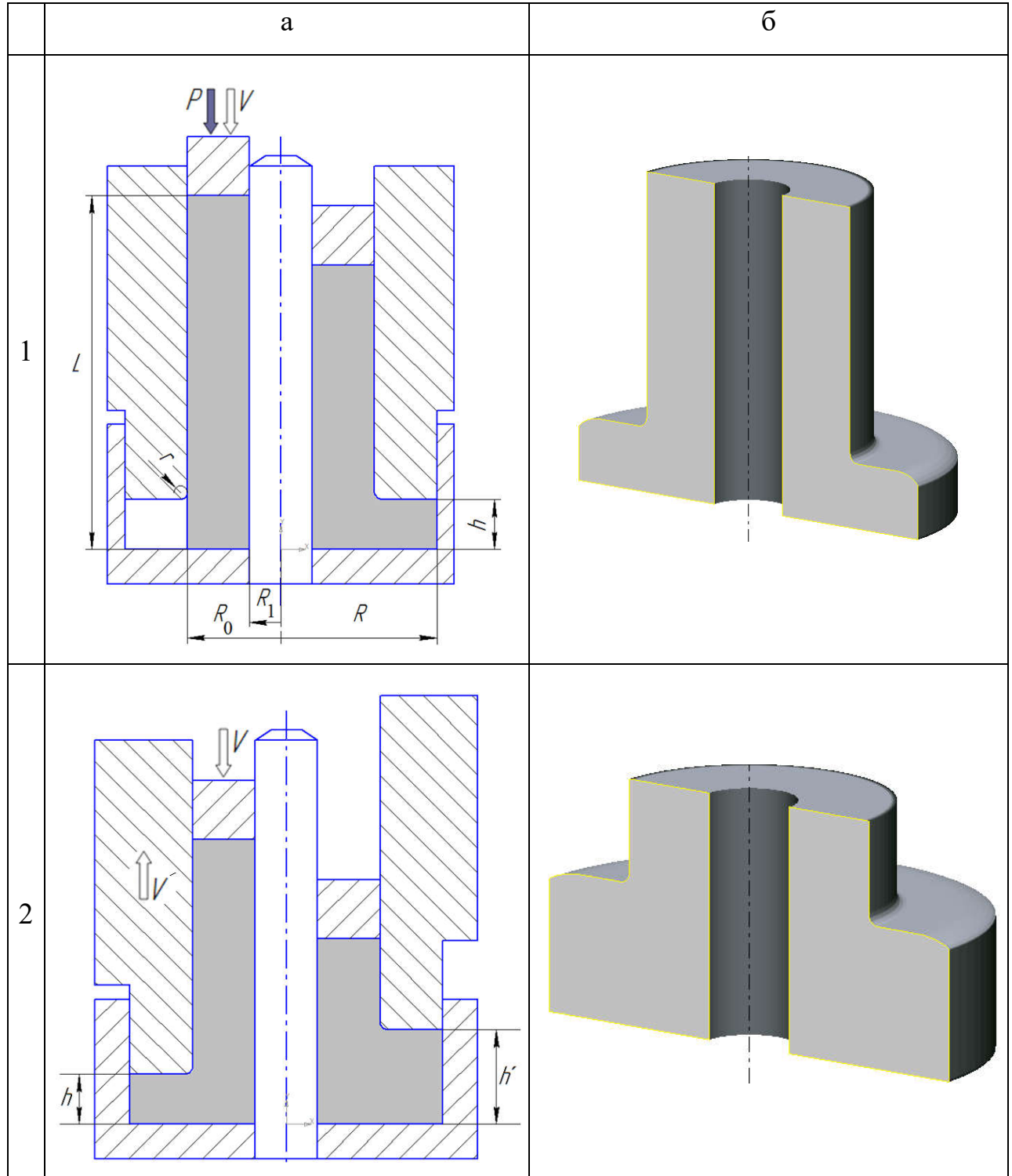


Рисунок 4.75 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця (а) на торці оправлення (1), і з додатковою рухливою матрицею (2) з односторонньою подачею і отриманий напівфабрикат (б)

Для моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця на торці оправки (див. рис. 4.75) обрані параметри, які наведені в підрозділ 4.7.

На рис. 4.76 показана діаграма залежності швидкості руху матриці від відносної висоти фланця. Швидкість руху матриці залежить від перерізу фланця і може досягати 0,1...0,65 від швидкості пуансона. Наприклад, при відносній висоті фланця $\bar{h}=0,9$ відносних швидкість руху матриці буде $V'/V=0,40$.

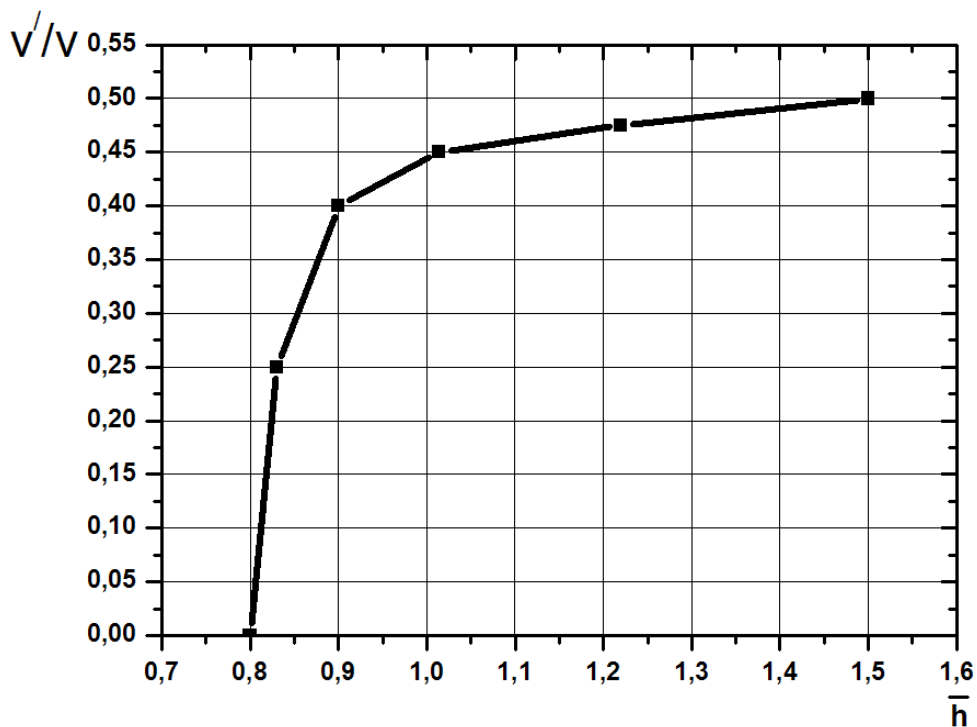


Рисунок 4.76– Діаграма залежності швидкості руху матриці від різних відносних висот фланця

Формування фланця на середині втулки на оправці можливе з односторонньою (рис. 4.77) та двосторонньою (рис. 4.78) подачами. На рис. 4.79 помітно, що з відотною висотою фланця $\bar{h}=0,1$ і відносним ходом деформувального пуансона $\bar{S}=0,25$ до значень $\bar{h}=1,45$ з відносним ходом $\bar{S}=3,0$ утягнення не спостерігається. Далі, при $\bar{h}=1,51$ з відносним ходом понад $\bar{S}=2,25$ з'являється утягнення.

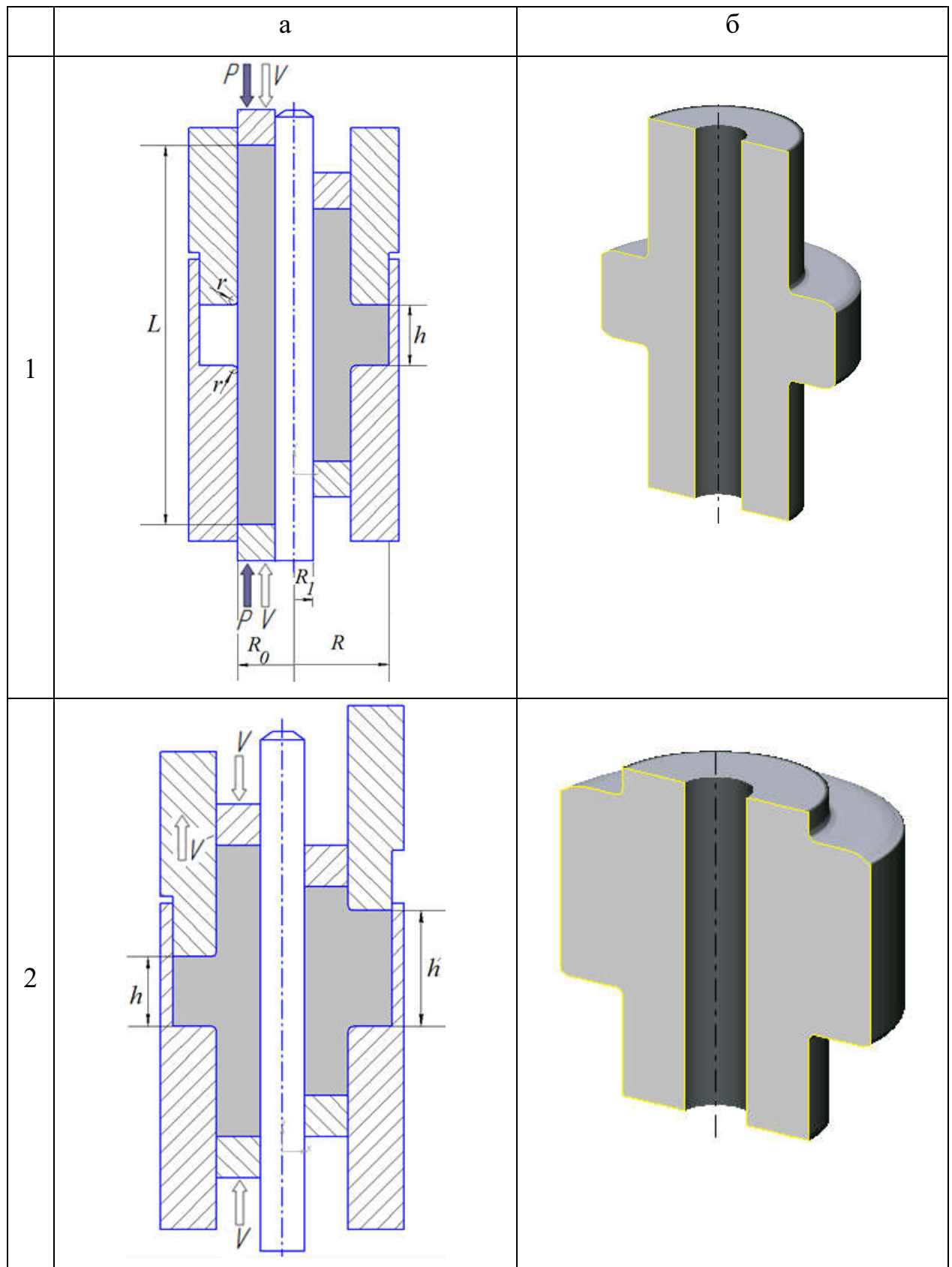


Рисунок 4.78 – Схема процесу закритого радіального видавлювання фланця (а) на середині стрижня на оправці (1), і з додатково рухомою матрицею (2) з двосторонньою подачею і отриманий напівфабрикат (б)

За результатами математичних експериментів побудована діаграма для визначення значень геометричних розмірів процесу радіального видавлювання, при яких більш ймовірно утворення відхилень форми у вигляді утягнення (рис. 4.80).

Наприклад, при відносній висоті фланця $\bar{h}=1,75$ відносних швидкості руху матриці буде $V'/V=0,40$.

Аналогічні графіки отримані і для двосторонньої подачі металу в радіальну порожнину.

На рис. 4.81 помітно, що з відносною висотою фланця $\bar{h}=0,1$ і відносним ходом деформувального пуансона $\bar{S}=0,3$ до значень $\bar{S}=1,6$ з відносним ходом – 3,25 утягнення не спостерігається. Далі, при $\bar{h}=1,66$ з відносним ходом понад $\bar{S}=1,3$; при $\bar{h}=1,7$ понад $\bar{S}=0,65$; і при $\bar{h}=1,75$ понад $\bar{S}=0,2$ з'являється утягнення.

На рис. 4.82 показана діаграма залежності швидкості руху матриці від відносної висоти фланця.

Швидкість руху матриці залежить від перерізу фланця і може досягати 0,1...0,65 від швидкості пуансона.

Наприклад, при відносній висоті фланця $\bar{h}=1,85$ швидкість руху матриці буде дорівнювати відносній $V'/V=0,85$.

У цьому розділі розглянуто схеми радіального видавлювання деталей типу втулок з фланцем із застосуванням додатково рухливого інструменту.

На першій стадії радіального видавлювання фланця на торці труби рухається тільки головний деформувальний інструмент.

Коли набирається фланець, починає підніматися роз'ємна матриця зі швидкістю, рівною $V_2/V_1=0,475$ від швидкості пуансона, збільшуючи висоту порожнини під фланець.

За цією схемою можливо отримувати деталі типу втулки з високим фланцем, уникаючи при цьому утворення утягнення.

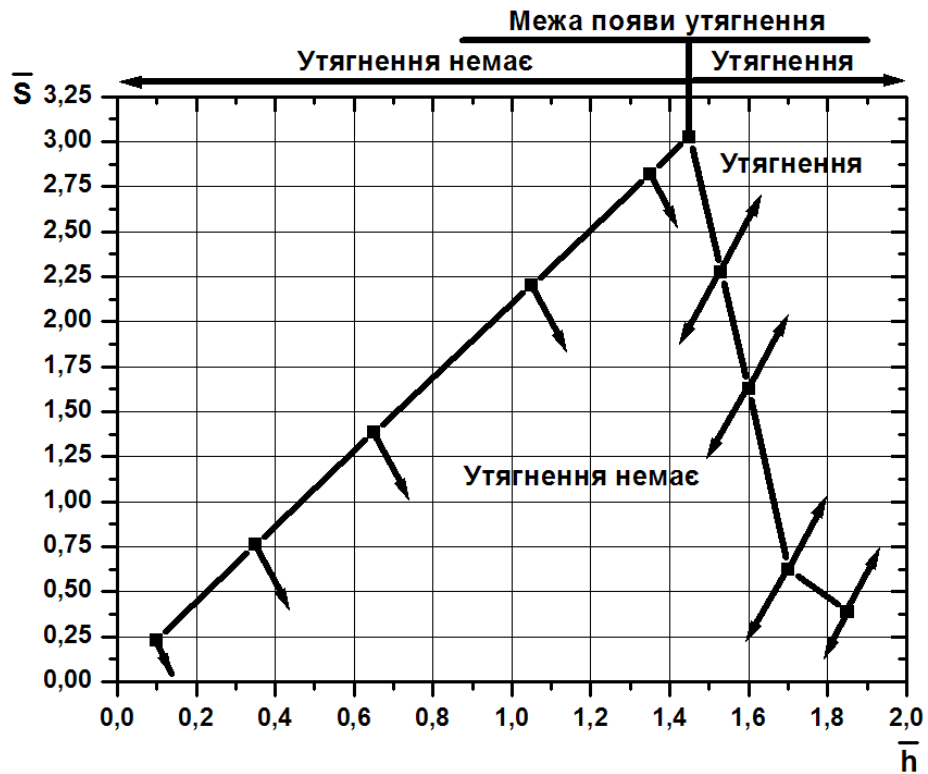


Рисунок 4.79 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона і з різними відносними висотами фланця з односторонньою подачею

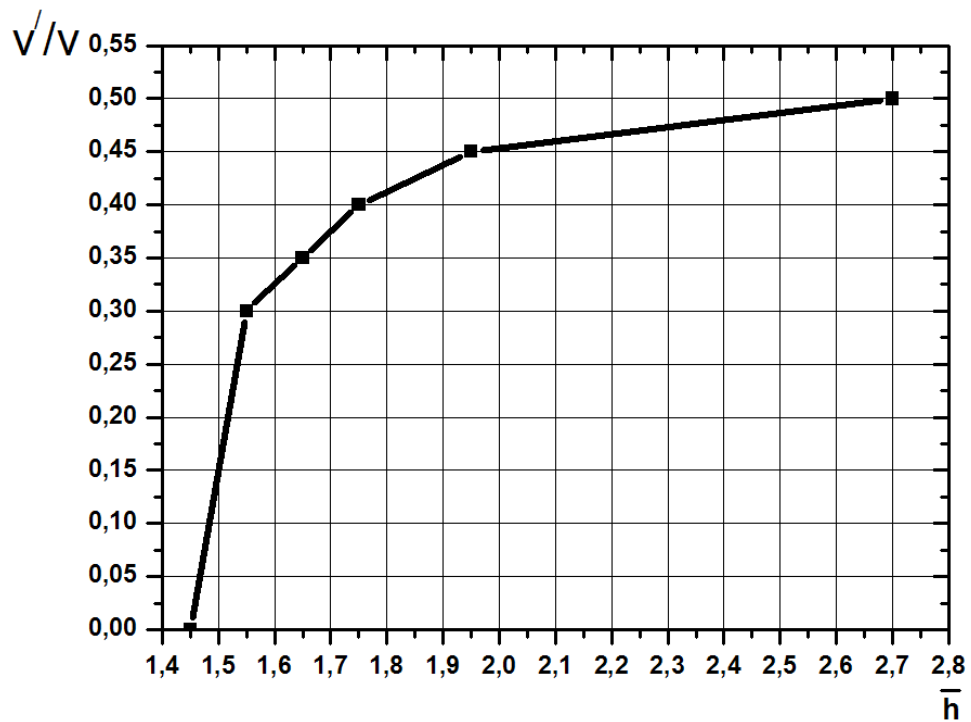


Рисунок 4.80 – Діаграма залежності швидкості руху матриці від різних відносних висот фланця

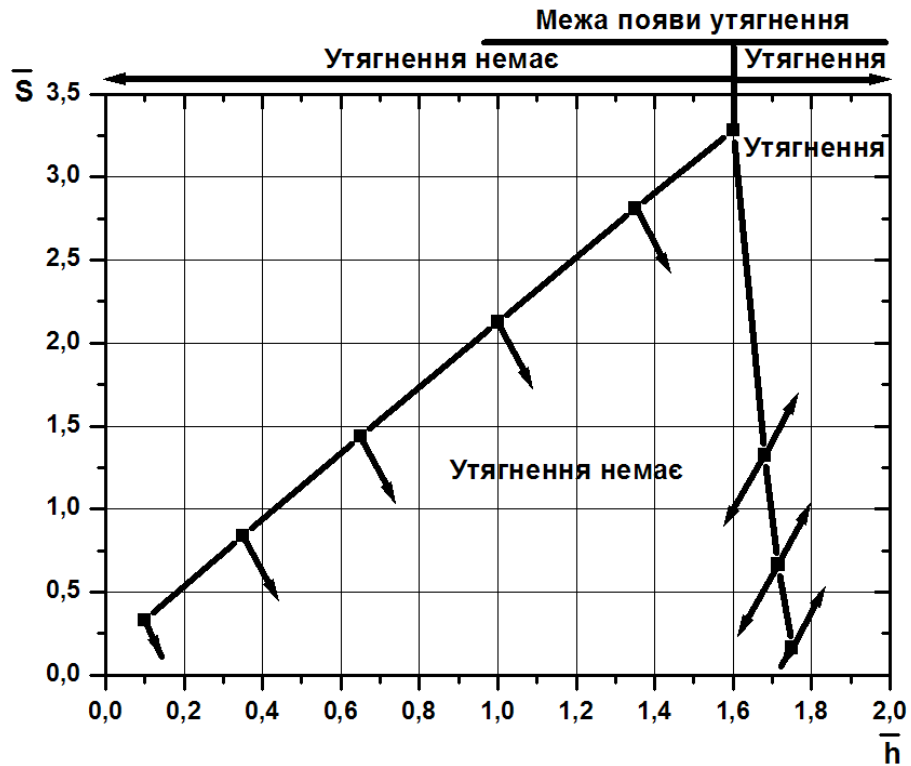


Рисунок 4.81 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона і з різними відносними висотами фланця з двосторонньою подачею

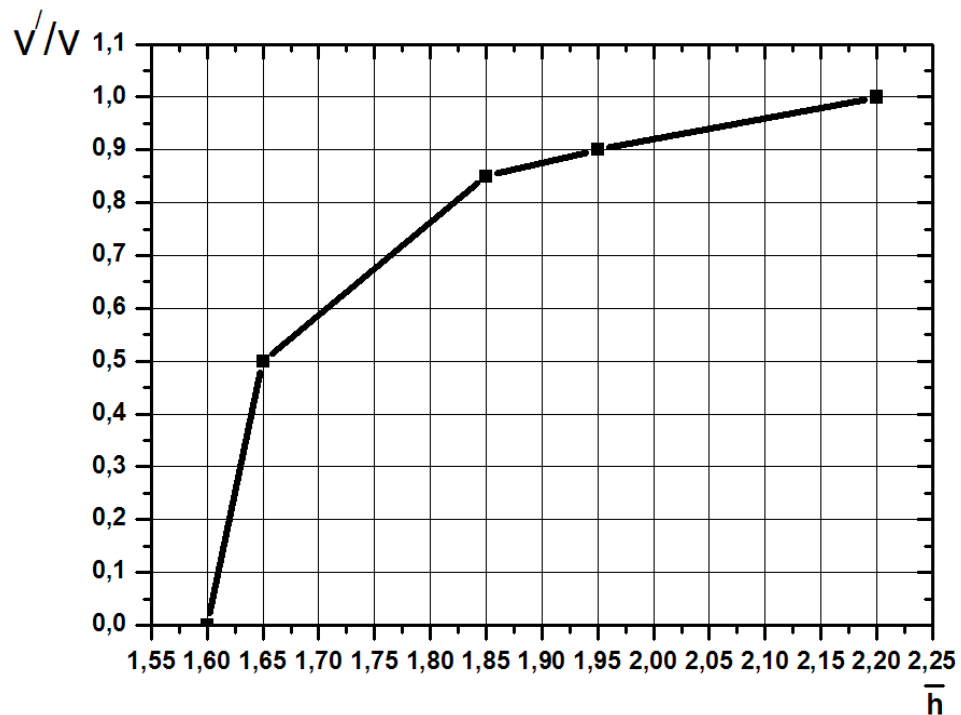


Рисунок 4.82 – Діаграма залежності швидкості руху матриці від різних відносних висот фланця

Схема процесу представлена на рис. 4.83.

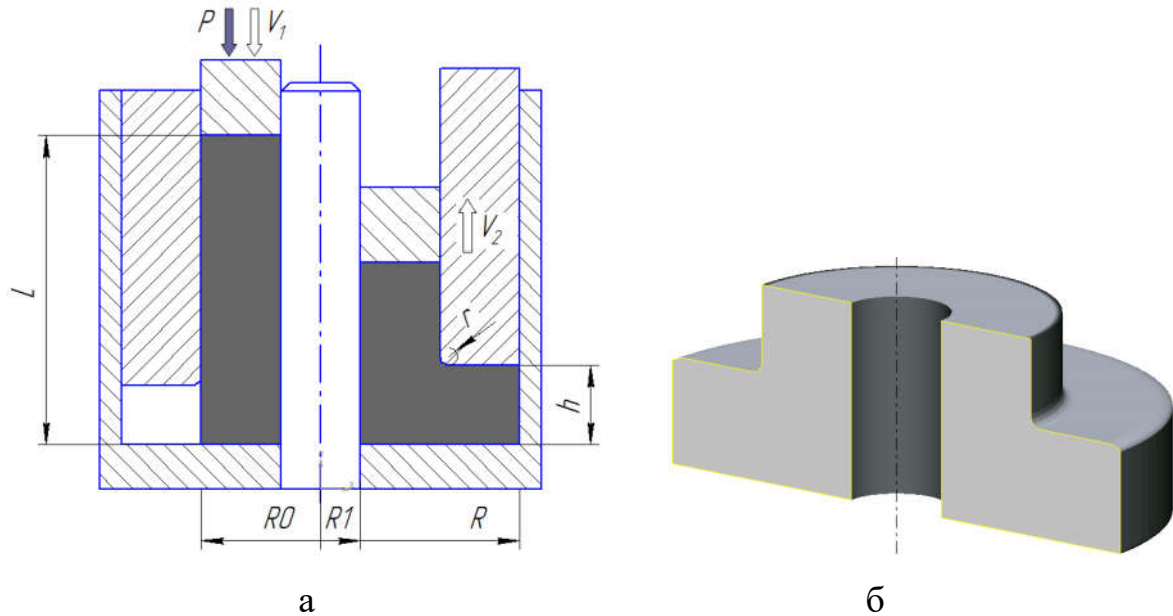


Рисунок 4.83 – Схема радіального видавлювання фланця на торці труби з односторонньою подачею і з додатково рухливою матрицею (а) та напівфабрикат (б) ($t=R_0-R_1$)

На рис. 4.84 представлені результати моделювання процесу при різних геометричних параметрах, які наведені вище, такі, як викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій по осередку деформації і розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перерізі заготовки. Як видно з отриманої моделі, осередок деформації по висоті обмежується висотою приймальної порожнини під фланець, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в нижній частині осередку деформації. Інтенсивність напружень по осередку деформації розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення. Максимальне значення інтенсивності деформацій знаходиться в межах 4,5. Максимальне значення інтенсивності напружень 200 МПа. При моделюванні процесу радіального видавлювання, при отриманні деталі з певними геометричними параметрами, вдавалося уникнути утягнення. Процес здійснювався за наступною схемою: спочатку проводиться видавлювання фланця з дещо меншою висотою, ніж необхідна, так щоб співвідношення h/t не потрапляло в область появи утягнення.

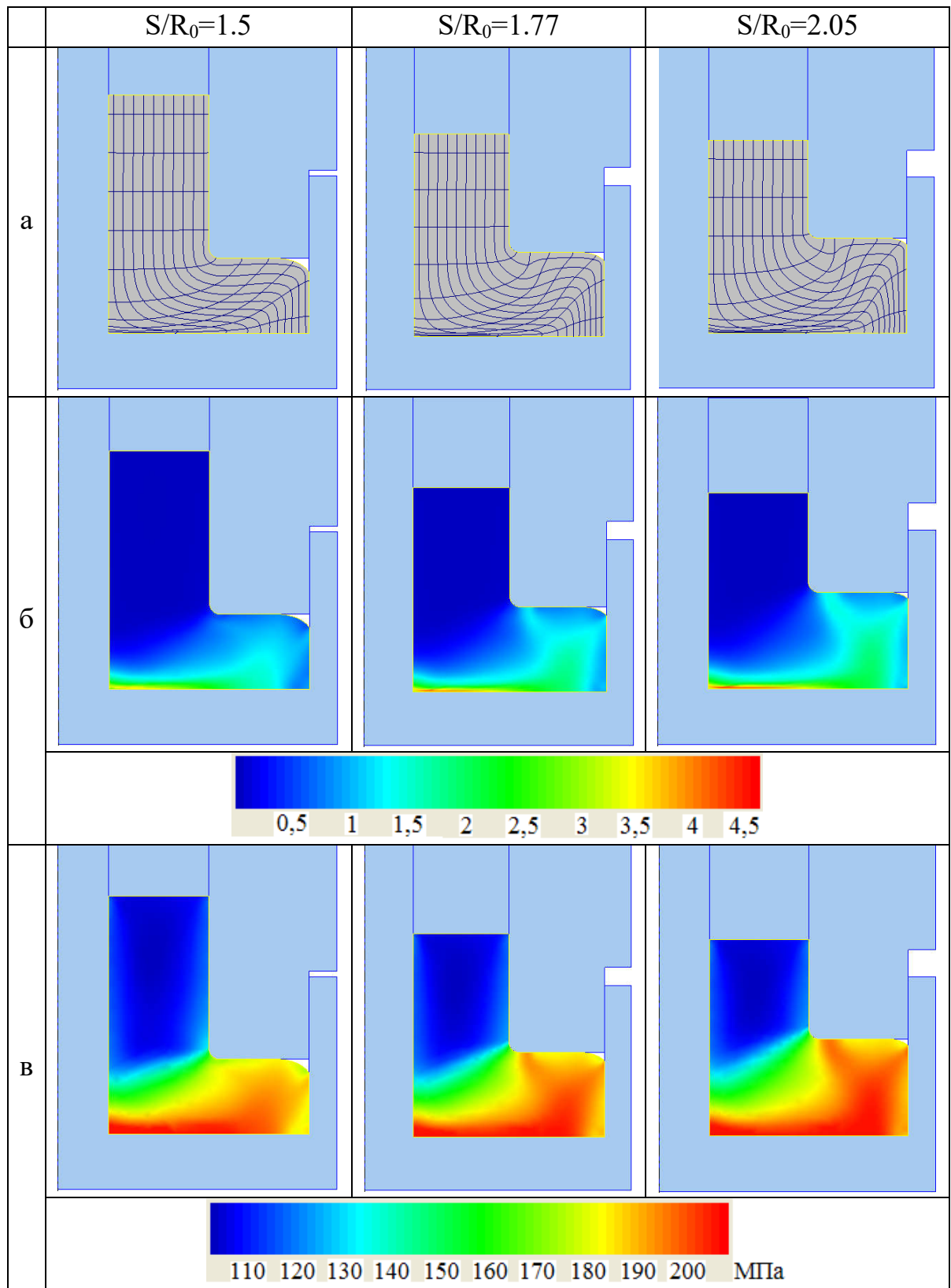


Рисунок 4.84 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня на оправці при від $h/t = 0,75$ до $h/t = 1,0$

Взяті такі вихідні значення h/t , рівні 0,75, необхідне значення $h/t=1,0$. При геометричних параметрах, рівних вихідним, починали радіальне видавлювання. Коли порожнина під фланець повністю заповнювалася, виконували підняття півматриці і збільшення висоти порожнини.

4.7 Визначення залежності приведенного тиску радіального видавлювання в рухомій матриці енергетичним методом

Отримання високих фланців радіальним видавлюванням можливе з застосуванням рухомої верхньої матриці, що дозволяє уникнути дефектоутворення. Визначення силових характеристик для такого процесу проводиться на основі енергетичного балансу потужності. Для плоскої задачі використовується окремий випадок енергетичного балансу потужностей – метод верхньої оцінки. Приймаємо допущення, що тертя на поверхні контакту між металом і інструментом відсутнє. Прийняте кінематично можливе поле ліній ковзання і годограф швидкостей показані на рис. 4.85.

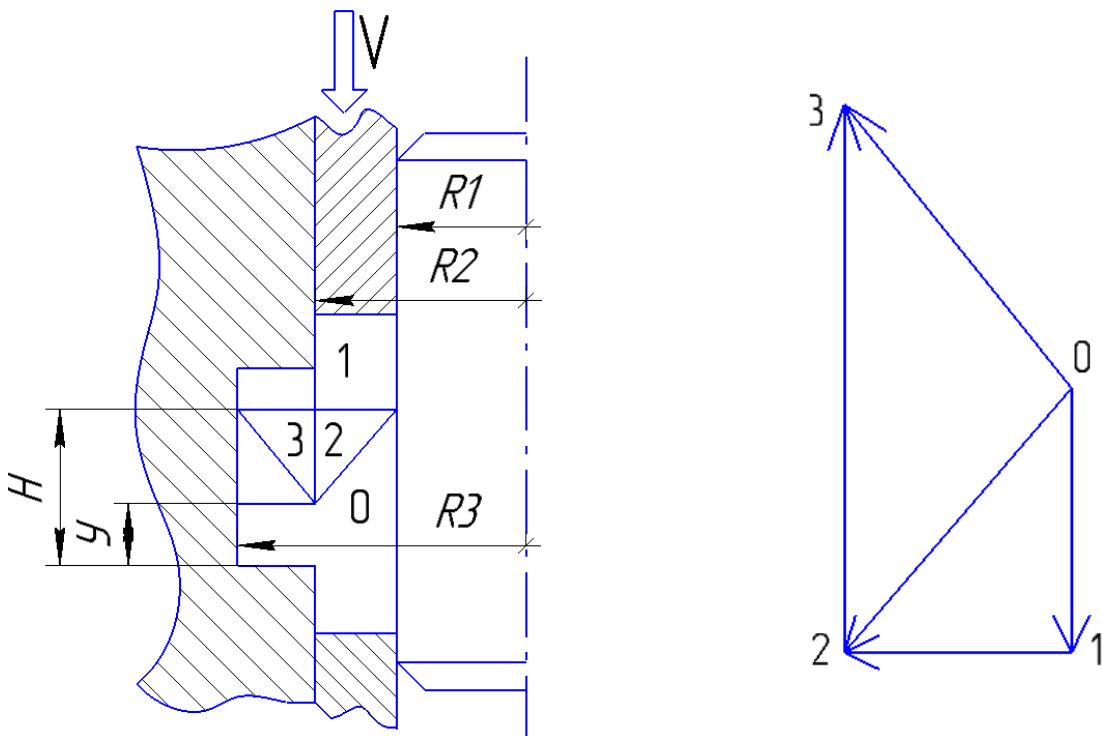


Рисунок 4.85 – Кінематично можливе поле ліній ковзання і годограф швидкостей

У загальному випадку питома сила деформування розраховується за формулою:

$$\bar{p} = \frac{1}{2 \cdot B \cdot V_0} (\sum V_{ij} l_{ij} + 2 \cdot \mu_s \sum V_{ik} l_{ik}). \quad (4.24)$$

де B – ширина інструменту, що деформує;

V_0 – швидкість переміщення інструменту;

V_{ij}, l_{ij} – відповідно швидкість зрізу і довжина ліній ковзання;

V_{ik}, l_{ik} – відповідно швидкість течії на контакті металу і інструменту і довжина лінії контакту.

Для даного випадку розривного поля швидкостей, при відсутності тертя на контакті формула набуде вигляду:

$$\bar{p} = \frac{1}{2 \cdot B \cdot V_0} (l_{12} V_{12} + l_{20} V_{20} + l_{23} V_{23} + l_{30} V_{30}), \quad (4.25)$$

Значення довжин ліній зрізу та їх швидкості наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Значення довжин ліній зрізу та їх швидкості (див. рис. 4.85)

l_{ij}	V_{ij}
$l_{12} = R_2 - R_1$	$V_{12} = \frac{(R_2 - R_1) \cdot V_0}{H - y}$
$l_{23} = H - y$	$V_{23} = V_0 + V_0 \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_3 - R_2}$
$l_{20} = \sqrt{(R_2 - R_1)^2 + (H - y)^2}$	$V_{20} = \sqrt{V_0^2 + \frac{(R_2 - R_1)^2 \cdot V_0^2}{(H - y)^2}}$
$l_{30} = \sqrt{(H - y)^2 + (R_3 - R_2)^2}$	$V_{30} = \sqrt{V_0^2 + \frac{(R_2 - R_1)^2 \cdot V_0^2}{(H - y)^2}} \cdot \frac{\sqrt{(H - y)^2 + (R_3 - R_2)^2}}{\sqrt{(R_2 - R_1)^2 + (H - y)^2}}$

Тоді формула для розрахунку приведенного тиску радіального видавлювання матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{p} = & \frac{1}{2 \cdot B \cdot V_0} \left((R_2 - R_1) \cdot \frac{(R_2 - R_1) \cdot V_0}{(H - y)} + \sqrt{(R_2 - R_1)^2 + (H - y)^2} \cdot \sqrt{V_0^2 + \frac{(R_2 - R_1) \cdot V_0^2}{(H - y)^2}} + \right. \\ & + (H - y) \cdot (V_0 + V_0 \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_3 - R_2}) + \sqrt{(H - y)^2 + (R_3 - R_2)^2} \cdot \sqrt{V_0^2 + \frac{(R_2 - R_1)^2 \cdot V_0^2}{(H - y)^2}} \cdot \\ & \cdot \frac{\sqrt{(H - y)^2 + (R_3 - R_2)^2}}{\sqrt{(R_2 - R_1)^2 + (H - y)^2}} \end{aligned} \quad (4.26)$$

У такому вигляді формула є громіздкою і не підлягає оптимізації, оскільки залежить від конкретних розмірів осередку деформації. Для можливості дослідження процесу необхідно скористатися відносними параметрами, наприклад, відносною глибиною проникнення осередку деформації $m = \frac{H - y}{R_2 - R_1}$, і відносною шириною осередку деформації $n = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$. Після підстановки цих параметрів в формулу визначення приведенного тиску вона значно спрощується і набуває вигляду:

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{m} + \sqrt{1 + m^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{m^2}} + \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot m + \sqrt{1 + \frac{1}{m^2}} \cdot \frac{m^2 + n^2}{\sqrt{1 + m^2}} \right], \quad (4.27)$$

При оптимізації цієї формули за відносними параметрами m і n за допомогою програми MatCad були отримані і проаналізовані дані, проілюстровані на рис. 4.86 та 4.87. З графіків видно, що залежність приведенного тиску від відносної глибини проникнення осередку деформації m має мінімум в проміжку від 1 до 1.5 залежно від значень відносної ширини осередку деформації. Залежність же приведенного тиску від відносної ширини осередку деформації також має мінімум в області значень $n=(1..1,5)$ в залежності від відносної глибини проникнення осередку деформації m .

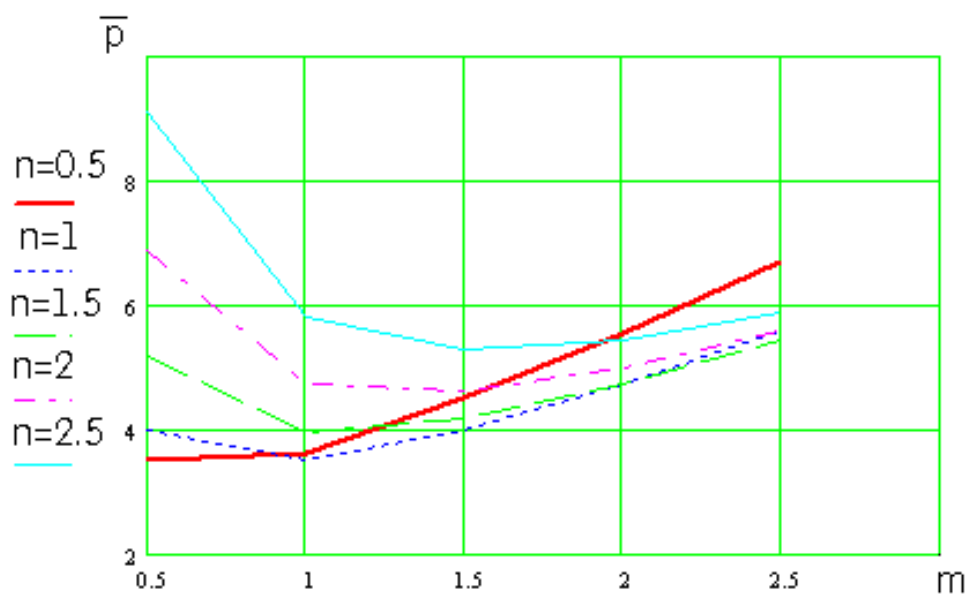


Рисунок 4.86 – Графік залежності приведенного тиску деформування від відносної глибини проникнення осередку деформації m при різних значеннях відносної ширини осередку деформації n

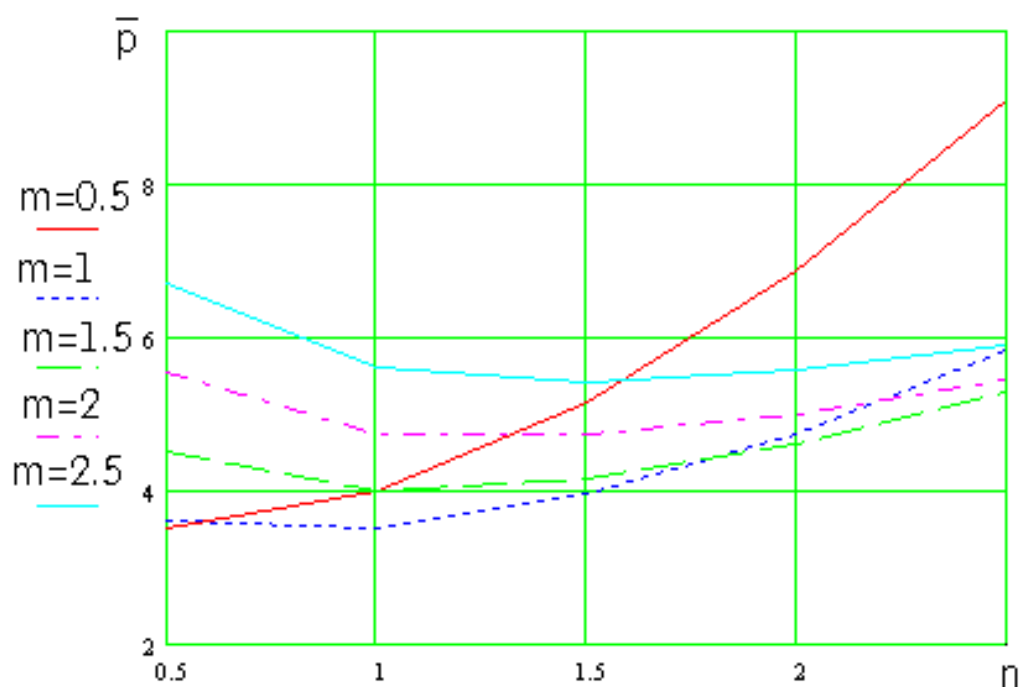


Рисунок 4.87 – Графік залежності приведенного тиску деформування від відносної ширини осередку деформації n при різних значеннях відносної глибини проникнення осередку деформації m .

Більш повним аналіз буде при розрахунку осесиметричної задачі.

Суть методу полягає у виборі кінематично можливого поля швидкостей, яке б відповідало граничним умовам, умові нестисненості матеріалу і визначенні потужності сил, що входять в рівняння енергетичного балансу. Розрахункова схема процесу показана на рис. 4.88

Зона 1 є жорсткою і переміщається разом з інструментом. У зонах 3 і 2 відбувається деформування, для них необхідно скласти кінематичні граничні умови (табл. 4.7). На основі загального виду кінематично можливого поля швидкостей для осесиметричної задачі:

$$\begin{cases} V_z = C_1 \cdot z + C_2 \\ V_r = -\frac{C_1}{2}r + \frac{C_3}{r} \end{cases} \quad (4.28)$$

визначаємо постійні інтегрування C_1 , C_2 , C_3 (табл. 4.8).

Швидкості деформації (табл. 4.9) визначаємо за співвідношенням Коші, які мають вигляд:

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad (4.29)$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad (4.30)$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r}. \quad (4.31)$$

Для знаходження інтенсивності деформації (табл. 4.10) скористаємося виразом:

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\theta^2 + \dot{\varepsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{v}_{r_z}^2}. \quad (4.32)$$

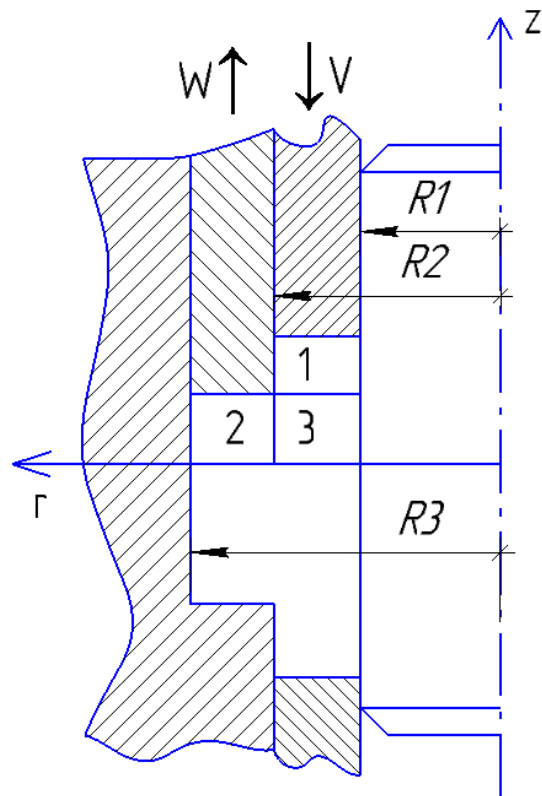


Рисунок 4.88 – Розрахункова схема процесу радіального видавлювання з рухомою матрицею

Таблиця 4.7 – Кінематичні граничні умови осередку деформування (див. рис. 4.88)

Зона	Координата	Значення швидкості
3	$z = 0$	$V_z = 0;$
	$z = H$	$V_z = -V_0;$
	$r = R_1$	$V_r = 0;$
	$r = R_2$	$V_r = V_0 \cdot \lambda_1, \text{ де } \lambda_1 = \frac{(R_2 - R_1)}{2 \cdot R_2 \cdot H}$
2	$z = 0$	$V_z = 0;$
	$z = H$	$V_z = W_0, \text{ де } W_0 = \frac{V_0(R_2^2 - R_1^2)}{(R_3^2 - R_2^2)};$
	$r = R_2$	$V_r = V_0 \cdot \lambda_1;$
	$r = R_3$	$V_r = 0$

Таблиця 4.8 – Кінематично можливі поля швидкостей (КВПШ) в осередку деформування (див. рис. 4.88)

Зона	КВПШ
3	$\begin{cases} V_z = -\frac{V_0}{H} \cdot z; \\ V_r = \frac{V_0}{2H} r - \frac{V_0}{2Hr} R_1^2. \end{cases}$
2	$\begin{cases} V_z = \frac{W_0}{H} \cdot z; \\ V_r = -\frac{W_0}{2H} r - \frac{W_0}{2Hr} R_2^2. \end{cases}$

Таблиця 4.9 – Значення швидкостей деформації (див. рис. 4.88)

Зона	Значення
3	$\dot{\varepsilon}_z = -\frac{V_0}{H};$
	$\dot{\varepsilon}_r = \frac{V_0}{2H} + \frac{V_0}{2Hr^2} \cdot R_1^2;$
	$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_0}{2H} - \frac{V_0}{2Hr^2} \cdot R_1^2.$
2	$\dot{\varepsilon}_z = \frac{W_0}{H};$
	$\dot{\varepsilon}_r = -\frac{W_0}{2H} - \frac{W_0}{2Hr^2} \cdot R_2^2;$
	$\dot{\varepsilon}_\theta = -\frac{W_0}{2H} + \frac{W_0}{2Hr^2} \cdot R_2^2.$

Таблиця 4.10 – Інтенсивність деформації в осередку деформування
(див. рис. 4.88)

Зона	Значення
3	$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{V_0^2}{H^2} + \left(\frac{V_0}{2H} + \frac{V_0}{2Hr^2} \cdot R_1^2 \right)^2 + \left(\frac{V_0}{2H} - \frac{V_0}{2Hr^2} \cdot R_1^2 \right)^2 \right)} = \frac{V_0}{H} \sqrt{1 + \frac{R_1^4}{3r^4}}.$
2	$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{W_0^2}{H^2} + \left(-\frac{W_0}{2H} - \frac{W_0}{2Hr^2} \cdot R_2^2 \right)^2 + \left(-\frac{W_0}{2H} + \frac{W_0}{2Hr^2} \cdot R_2^2 \right)^2 \right)} = \frac{W_0}{H} \sqrt{1 + \frac{R_2^4}{3r^4}}.$

Для знаходження приведенного тиску деформування знаходимо інтервал значення сил деформування, тертя та зрізу.

$$N_{\partial 1} = \sigma_s \int_0^{2\pi} \int_0^H \int_{R_1}^{R_2} \frac{V_0}{h\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3r^4 + R_1^4}}{r^2} \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \left[\frac{R_1^2}{2} \cdot \ln \left| \frac{3(\sqrt{R_1^4 + 3R_2^4} - R_1^2)}{\sqrt{R_1^4 + 3R_2^4} + R_1^2} \right| + \frac{R_1^2}{2} \cdot \ln \left| \frac{3(\sqrt{R_1^4 + 3R_1^4} - R_1^2)}{\sqrt{R_1^4 + 3R_1^4} + R_1^2} \right| \right], \quad (4.33)$$

$$N_{\partial 2} = \sigma_s \int_0^{2\pi} \int_0^H \int_{R_2}^{R_3} \frac{W_0}{h\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3r^4 + R_2^4}}{r^2} \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \left[\frac{R_2^2}{2} \cdot \ln \left| \frac{3(\sqrt{R_2^4 + 3R_3^4} - R_2^2)}{\sqrt{R_2^4 + 3R_3^4} + R_2^2} \right| + \frac{R_2^2}{2} \cdot \ln \left| \frac{3(\sqrt{R_2^4 + 3R_2^4} - R_2^2)}{\sqrt{R_2^4 + 3R_2^4} + R_2^2} \right| \right], \quad (4.34)$$

$$N_{c1} = 2 \cdot \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{V_0}{2H} r - \frac{V_0}{2Hr} R_1^2 \right) dr r d\theta = \frac{2\sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi}{\sqrt{3}H} \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{3} - R_1^2 (R_2 - R_1) \right), \quad (4.35)$$

$$N_{c2} = \int_0^H \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{V_0}{H} z + \frac{W_0}{H} z \right) dz r d\theta = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} (V_0 + W_0) H \pi r, \quad (4.36)$$

$$N_c = \int_{R_2}^{R_3} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{W_0}{2H} + \frac{W_0}{2Hr^2} R_2^2 \right) dr r d\theta = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{W_0 \pi}{H} ((R_3^2 - R_2^2) + R_2^2 \ln(R_3 - R_2)), \quad (4.37)$$

$$Nm = \int_0^H \int_0^{2\pi} 2\mu_s \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_0}{H} z dz r d\theta = \frac{4}{\sqrt{3}} \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot r \cdot \pi. \quad (4.38)$$

Після підсумовування всіх потужностей сил деформування та заміни реальних параметрів процесу відносними, тобто $m = \frac{H}{R_2 - R_1}$ та $n = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$,

отримуємо вираз для знаходження наведеного тиску деформування:

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot V \cdot \pi \cdot \left(\frac{R_1^2}{2} \cdot \ln \left(\frac{3(\sqrt{R_1^4 + 3 \cdot R_2^4} - R_1^2)}{\sqrt{R_1^4 + 3 \cdot R_2^4} + R_1^2} \right) + \sqrt{R_1^4 + 3R_2^4} - 2R_1^2 \right) + \\ & + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V(R_2^2 - R_1^2)}{(n \cdot (R_2 - R_1) + R_2)^2 - R_2^2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{R_2^2}{2} \cdot \ln \left(\frac{3 \cdot (\sqrt{R_2^4 + 3(n(R_2 - R_1) + R_2)^4} - R_2^2)}{\sqrt{R_2^4 + 3(n(R_2 - R_1) + R_2)^4} + R_2^2} \right) + \right. \\ & + \left. (\sqrt{R_2^4 + 3(n(R_2 - R_1) + R_2)^4} - 2R_2^2) \right) + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 \cdot V \cdot \pi}{m(R_2 - R_1)} \cdot \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{3} - R_1^2 \cdot (R_2 - R_1) \right) + \\ & + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V \cdot (R_2 + R_1)}{n(R_2 - R_1) \cdot (n(R_2 - R_1) + 2 \cdot R_2)m} \cdot \pi \cdot (n(R_2 - R_1)(n(R_2 - R_1) + 2R_2) + R_2^2 \cdot \ln(n(R_2 - R_1))) + \\ & + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(V + \frac{V \cdot (R_2 + R_1)}{n(n(R_2 - R_1) + 2R_2)} \right) m(R_2 - R_1) \pi R_2 + \frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_s \cdot \mu_s \cdot V \cdot R_1 \cdot \pi \\ \bar{p} = & \frac{\sigma_s \cdot V \cdot \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{(4.39)} \end{aligned}$$

При оптимізації цієї формули за відносними параметрами m і n були отримані і проаналізовані дані, проілюстровані на рис. 4.89 та 4.90. Аналіз отриманих формул показує, що оптимальне значення відносної глибини проникнення осередку деформації відповідає мінімуму наведеного тиску, що належить проміжку $m=(1..1,5)$. Також при збільшенні відносної ширини осередку деформації спостерігається зниження приведенного тиску у всьому інтервалі варіювання що, не може відповідати дійсності і пов'язане з невідповідністю розрахункової схеми осередку деформації реальній картині течії металу в проміжку $n>(1.5..2)$.

При порівнянні отриманих результатів двома методами встановлено, що зіставлення розрахункових виразів, отриманих енергетичним методом з рішеннями МВО показує їх гарний збіг при значеннях відносної ширини

$$\text{фланця } \frac{R_2 - R_1}{R_3 - R_2} = 1..1.5.$$

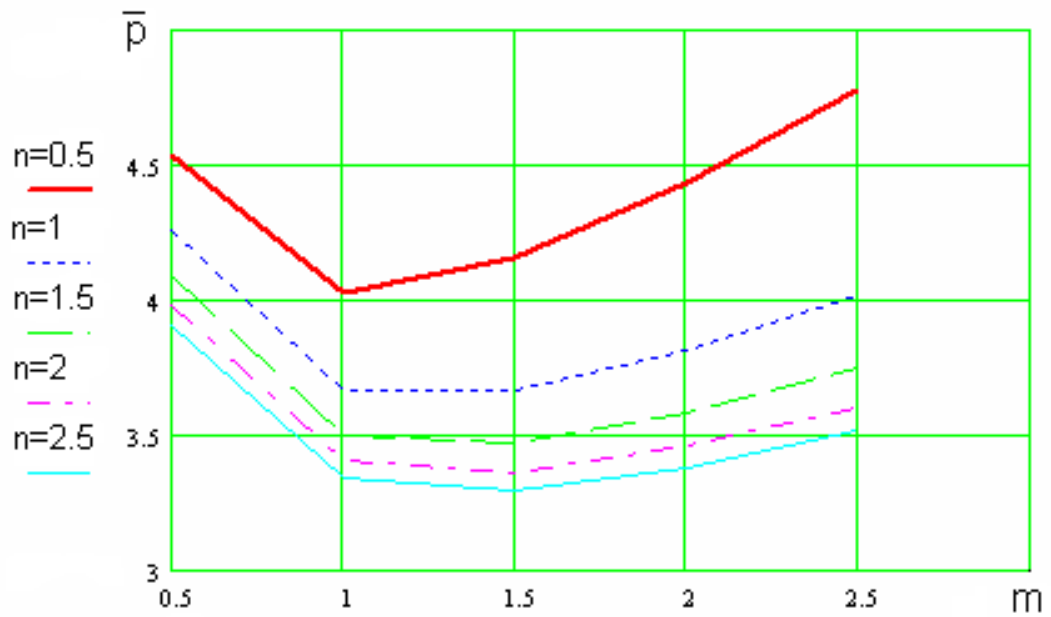


Рисунок 4.89 – Графіки залежності приведенного тиску від відносної глибини проникнення осередку деформації m при різних значеннях відносної ширини осередку деформації n

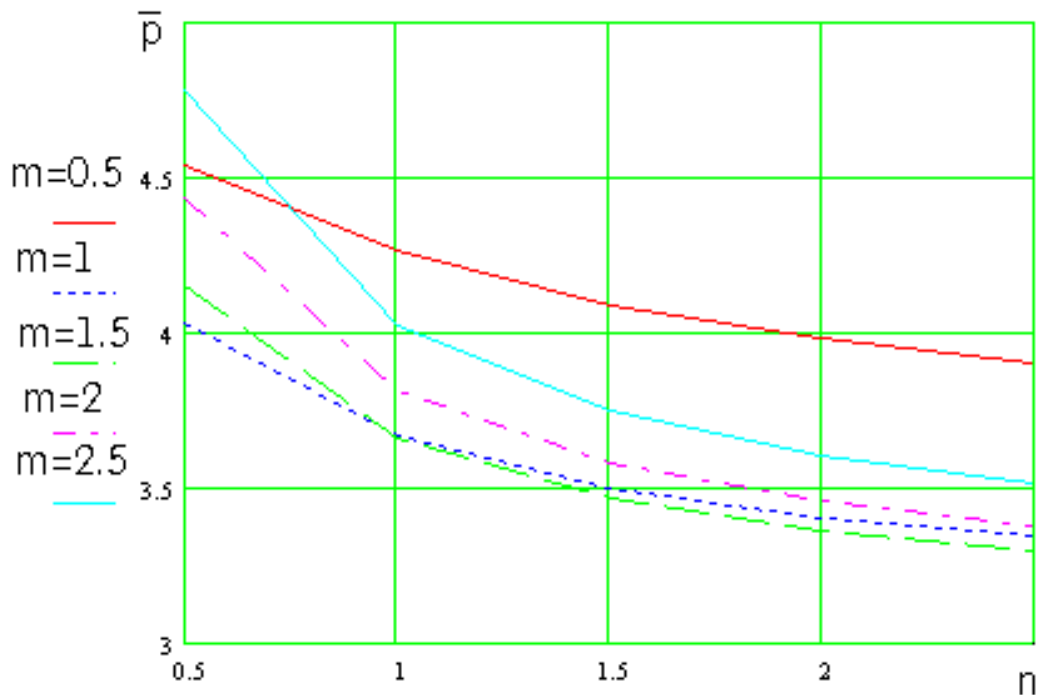


Рисунок 4.90 – Графік залежності приведенного тиску деформування від відносної ширини осередку деформації n при різних значеннях відносної глибини проникнення осередку деформації m

4.8 Експериментальне дослідження процесу радіального видавлювання і його кінематичних варіантів

Мета експериментальних досліджень полягає в проведенні якісного і кількісного аналізу деформованого стану, перевірки розрахункових залежностей, виведених в результаті теоретичного аналізу; встановленні закономірностей формозміни, які не піддаються аналітичному визначенню, але необхідні для обґрунтування та вибору раціональних схем і режимів деформування.

Аналіз силового режиму радіального видавлювання, оцінка особливостей формозміни і відомості, необхідні для прогнозування якості штамповок, оцінки надійності та працездатності штампового оснащення з роз'ємними матрицями.

Для досягнення цілей дослідження і коректного вирішення поставлених завдань в даній роботі застосовується комплексний підхід в підготовці і проведенні експериментальних досліджень, який передбачає етап проведення постановочних досліджень для виявлення значущих чинників, етап проведення досліджень для підтвердження результатів, отриманих шляхом теоретичних, їх зіставлення і перевірки адекватності розроблених математичних моделей. Залежно від достовірності визначення та завдання граничних умов на контактних поверхнях в значній мірі залежить точність експериментальної перевірки результатів теоретичного аналізу силових і деформаційних режимів процесів формозміни.

Оцінка особливостей формозміни дозволяє отримати важливу інформацію, необхідну для прогнозування якості штамповок, оцінки деформовності і ступеня використання запасу пластичності матеріалу, а також для розрахунків енергосилового режиму процесів деформування.

Найважливішим показником, що характеризують процес холодного об'ємного штампування і, зокрема, процесу радіального видавлювання, є номінальна сила процесу. Цей показник є визначальним при конструюванні деформувального інструменту і виборі обладнання, на якому буде здійснюватися технологічний процес видавлювання.

На початковому етапі дослідження процесів отримання деталей з фланцями і виявлення найбільш сприятливої схеми деформування з точки зору рівномірного розподілу деформацій були проведені установчі експерименти. Проводилися експерименти з витіснення деталі з фланцем в середній частині стрижня з односторонньою подачею і деталі з фланцем на торці стрижня з односторонньою подачею. Дослідження силового режиму були проведені на випробувальній машині МС 2000 силам 2000 кН. Силовий режим процесу реєструвався за допомогою тензометричних месдоз, підключених до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) L-Card E-440 і ЕОМ. Запис силового режиму проводився осциллографом-спектроаналізатором L-Graph, з пакету програмного забезпечення АЦП.

Експериментальне дослідження процесу радіального видавлювання фланцю на торці стрижня з односторонньою подачею в роз'ємних матрицях використовувалось для заготовки Ø 28 та висотою 70мм з матеріалу АМцМ. В якості технологічного мастила в експериментах з витіснення використовувалося мастило ВНИИНП-232. В результаті моделювання визначено силовий режим і напружено деформований стан процесу радіального видавлювання фланця, на торці стрижня з односторонньою подачею за допомогою методу скінченних елементів (рис. 4.91). Порівняння отриманих деталей показано на рис. 4.93. Для порівняння силового режиму при отриманні фланцю на середині втулки використовувалася заготовка Ø 21 мм і висотою 50 мм з матеріалу АМцМ. На рис. 4.92 і 4.94 показані результати моделювання та експеримент.

З порівняння отриманих результатів залежності сила процесу радіального видавлювання фланця на торці стрижня з односторонньою подачею від відносного ходу інструменту за допомогою експерименту та програми QForm 2D (рис. 4.95) та при отриманні фланцю на середині втулки (рис. 4.96) видно, що значення сила деформування, отримані експериментально, вище розрахованих методом скінченних елементів на 10...12%. Як вже зазначалося в попередніх розділах, для формозміни порожнистих заготовок характерне виникнення утягнень, що є причиною

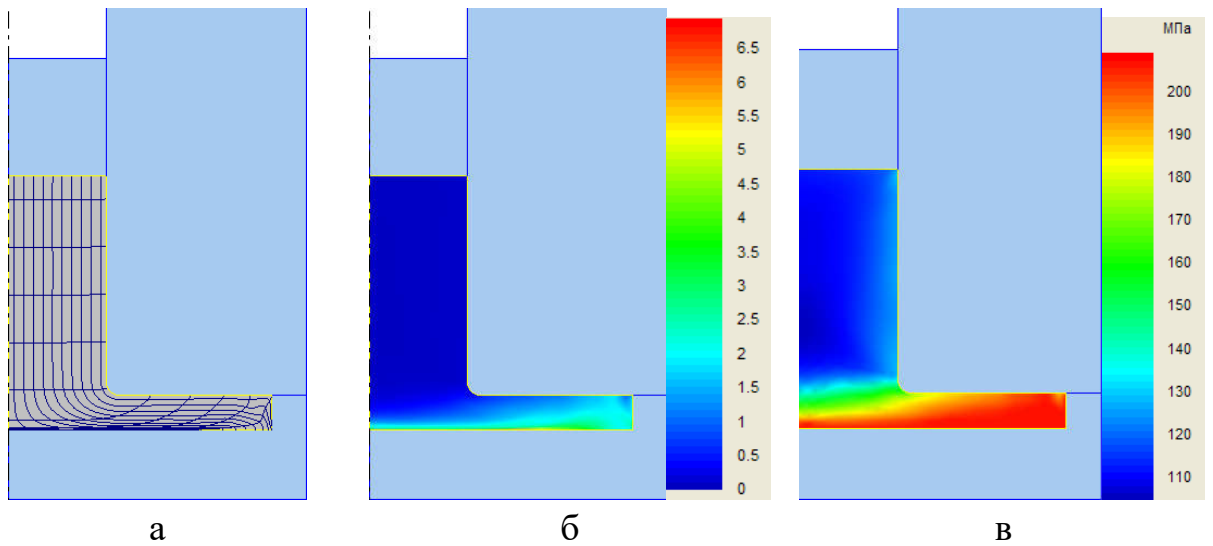
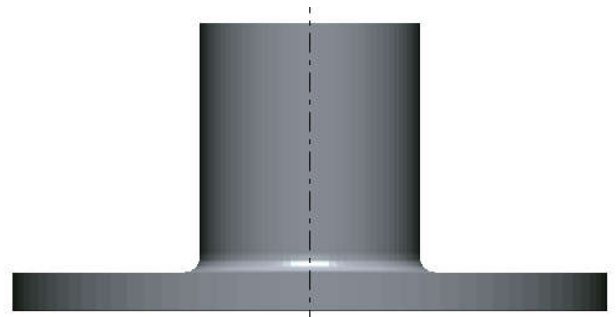


Рисунок 4.91 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею



а



б

Рисунок 4.92 – Напівфабрикат, отриманий в результаті експерименту (а) і результат моделювання отриманий в програмі QForm 2D (б)

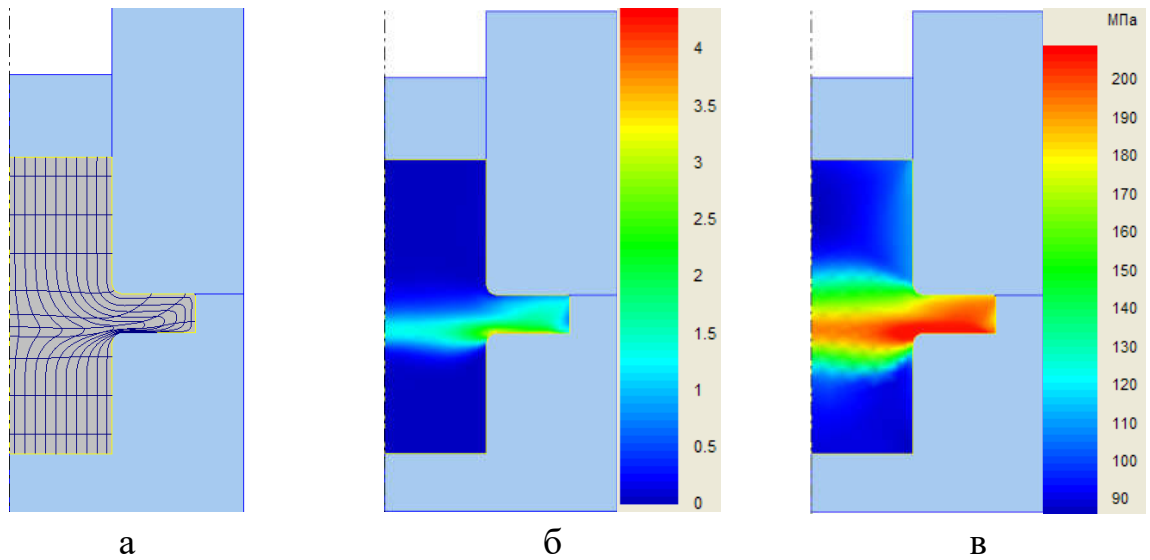


Рисунок 4.93 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) при радіальному видавлюванні фланця з односторонньою подачею

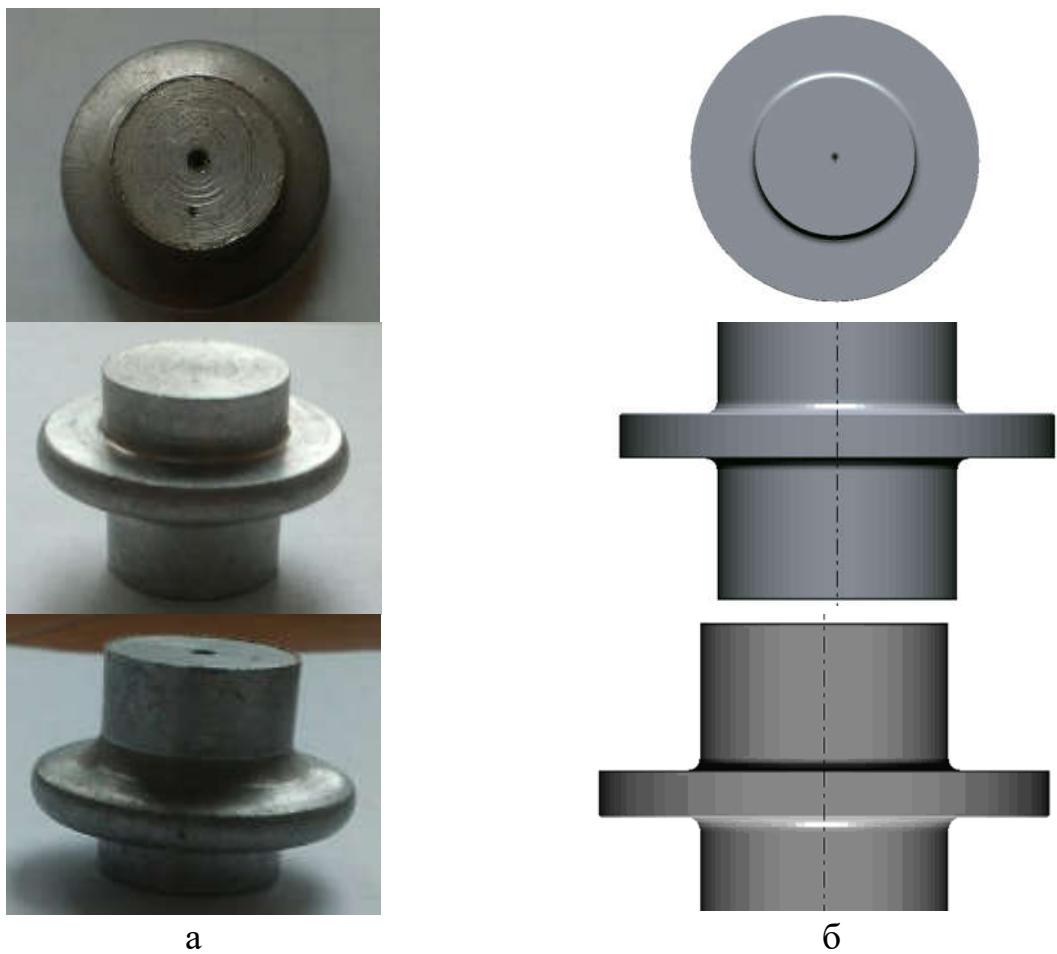


Рисунок 4.94 – Напівфабрикат, отриманий в результаті експерименту (а) і результат моделювання, отриманий в програмі QFORM 2D (б)

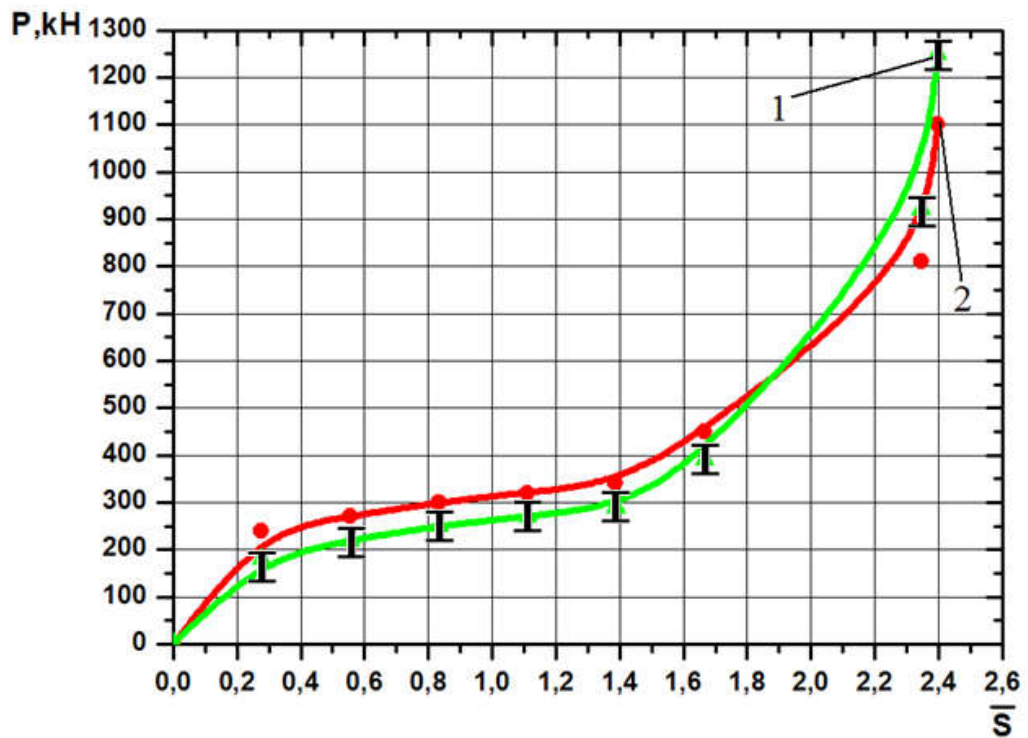


Рисунок 4.95 – Графік залежності сили процесу радіального видавлювання фланця від відносного ходу інструменту (1-експеримент, 2-MCE)

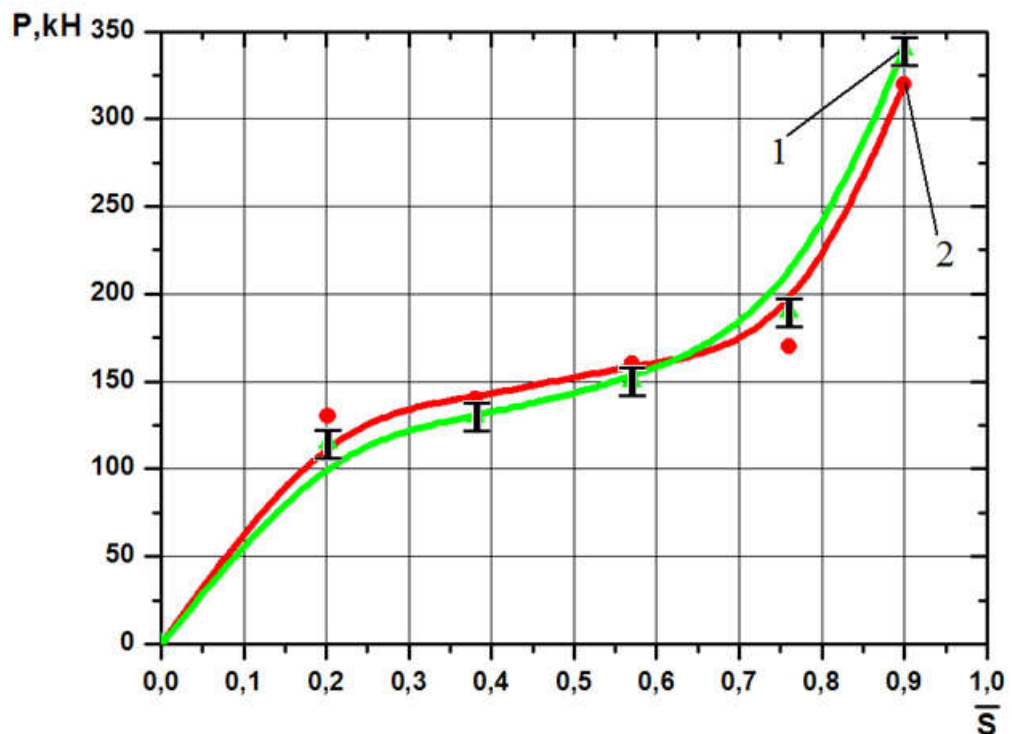


Рисунок 4.96 – Графік залежності сили процесу радіального видавлювання фланця на середині стрижня від відносного ходу інструменту (1-експеримент, 2-MCE)

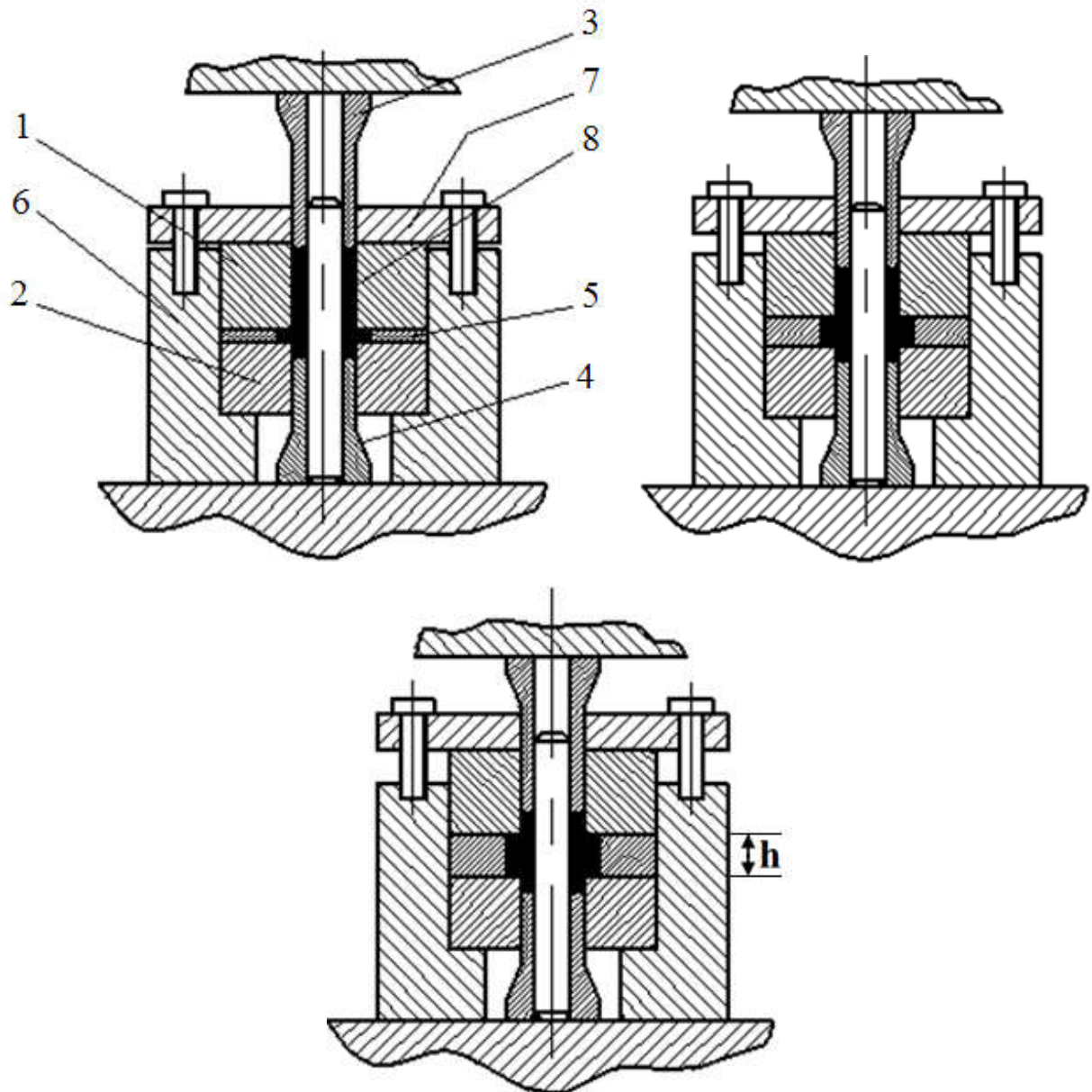
складкоутворення. Для деталей типу втулок з фланцем характерне збільшення внутрішнього діаметра в зоні утворення фланця. Роздача отвору з нижнього краю втулки відбувається на початку процесу і слабо залежить від його подальшого перебігу при вільному видавлюванні. Але обмеження одержуваного фланця по зовнішньому діаметру усуває цей недолік, і межі деталі оформляються чітко. У втулок з потовщенням при значеннях висоти порожнини, що перевищують товщину стінки заготовки в 1.5-2 рази, на внутрішній поверхні на початку процесу з'являється кругове утягнення, що перетворюється в торці видавлювання в складку (табл. 4.11...4.14). Глибина складок залежить від відносної висоти приймальної порожнини і може досягти значень, рівних товщині стінки заготовки. Для зниження подібних відхилень форм було здійснено видавлювання дослідної партії деталей на гідравлічному пресі з використанням універсальної оснастки. Схема експерименту наведена на рис. 4.97. Видавлювання проводилось з різними варіантами обмеження течії металу в порожнину під фланець: перший - коли порожнина під фланець зверху жорстко замикалася, видавлювання відбувалося в три стадії з постадійним збільшенням висоти порожнини (див. табл. 4.12, зразок 3), і другий, коли порожнина під фланець зверху не обмежувалася, а видавлювання проводилось в дві стадії (див. табл. 4.14).

При видавлюванні за першим варіантом утягнення не утворювалося ні на одній зі стадій процесу і був отриманий фланець на заготовці відносною висотою $\frac{h}{R-R_0}=2,5$ і шириною $\frac{R-R_0}{R-R_1}=1$. Однак при цьому на зовнішній поверхні фланця утворювалися напливи через гальмування шарів металу зрізом на межі жорсткої зони і пластичної. Для усунення напливів на зовнішній поверхні фланця необхідно виконувати видавлювання з безперервним підйомом матриці.

Проведені експерименти по другому варіанту показують, що при видавлюванні металу без обмеження течії металу у фланці в осьовому напрямку не вдається уникнути появи утягнення. Тому для уникнення

утягнення і оформлення граней необхідно створювати при деформації підпір фланця в осьовому напрямку.

Також експериментально було досліджено процес видавлювання з протиутягненням. При цьому видавлювання виконували в три стадії (рис. 4.98). На першій стадії (див. рис 4.98, а) виконували видавлювання внутрішнього фланця, який повинен компенсувати з'являється на другій



1 – верхня півматриця; 2 – нижня півматриця; 3 – пуансон;
4 – протипуансон; 5 – обмежуваче кільце; 6 – контейнер; 7 – притискне кільце; 8 – заготовка

Рисунок 4.97 – Схема експериментального штампа з рухомою матрицею

Таблиця 4.11 – Дані експериментів по радіальному видавлювання втулок з фланцем. Матеріал: Свинець

№	Заготовка DхdхL, мм	Висота фланцю, мм	Хід, мм	$\bar{p}$	Сила, кН	Примітка	Отримана деталь
				σ_s , МПа			
1	36x28x53	8	24,4	3,4	33	Радіус заокруглення нижньої матриці 4 мм, фаска на верхній матриці 1,5 мм. Утворюється утягнення.	
				24			
2a	36x28x52	5	9,7	3,3	32	Видавлювання виконувалося без обмеження течії металу в радіальному напрямку. При цьому утягнення не утворювалася, однак фланець мав ступінчасту форму.	
26		8	12,3	24	27		
3	36x28x52	8	6,6	2,7	23	Радіус заокруглення нижньої матриці 4 мм, фаска на верхній матриці 1,5 мм. Явно видно початок утворення утягнення	
				21			

Таблиця 4.12 – Дані експериментів по радіальному видавлювання втулок з фланцем. Матеріал: Алюміній

№	Заготовка DxdxL, мм	Висота фланцю, мм	Хід, мм	$\bar{p}$	Сила, кН	Примітка	Отримана деталь
				σ_s , МПа			
1	36x28x40	7.5	6.5	0.9	53	Радіус заокруглення нижньої матриці 4 мм, фаска на верхній матриці 1.5 мм. Явно видно початок утворення утягнення.	
				140			
2	36x28x40	5	6.3	1.2	75	Радіус заокруглення нижньої матриці 4 мм, фаска на верхній матриці 1.5 мм. Утворюється утягнення.	
				140			
3а	36x28x40	5	5.5	2.8	93	Верхня матриця з гострою кромкою, нижня з фаскою 1.5 мм. Утягнення не утворювалася на жодній стадії процесу однак по зовнішній поверхні фланець з напливами.	
3б		8	6.5	140	120		
3в		10	5.4		155		

Таблиця 4.13 – Дані експериментів з матрицею, що безперервно рухається

№	Заготовка DxdxL, мм	Висота фланцю, мм	Хід, мм	$\bar{p}$	Сила, кН	Примітка	Отримана деталь	
				σ_s , МПа				
Матеріал: Свинець								
1a	36x28x48	3	7	6.9	25	Утягнення не утворюється		
				24				
16		5-10	13		67			
Матеріал: Алюміній								
2a	36x28x50	3	7	2.3	77	Утворюється утягнення через інтенсивний рух матриці		
				140				
26		5-10	13		130			
3	36x28x50	5-10	15	3.6	205			
				140				

№	Заготовка DxdxL, мм	Висота фланцю, мм	Хід, мм	$\bar{p}$	Сила, кН	Примітка	Отримана деталь		
				σ_s , МПа					
Матеріал: Алюміній									
4a	36x28x50	3	2	5.3	106	Утворюється утягнення через інтенсивний рух матриці			
				140					
4б		5-10	9.5		303				
5a	36x28x50	3	2	2.2	120				
		5-10	9.5	140	125				
5б									

Таблиця 4.14 – Дані експериментів з витіснення з протиутягненням

№	Заготовка DхdхL, мм	Висота фланцю, мм	Хід, мм	$\bar{p}$	Сила, кН	Примітка	Отримана деталь	
				σ_s , МПа				
Матеріал: Свинець								
1а	36х28х50	10	5	3.8	37	Утягнення не утворюється, проте при випресовані частина метала затікає в порожнину оправлення і зрізається		
1б			15	24	106			
1в			випресовування		20			
Матеріал: Алюміній								
2а	36х28х50	10	4	3	100	Утягнення не утворюється, проте при випресовані частина метала затікає в порожнину оправлення і зрізається		
2б			10	140	169			
2в			випресовування		65			

№	Заготовка DxdxL, мм	Висота фланцю, мм	Хід, мм	$\bar{p}$	Сила, кН	Примітка	Отримана деталь	
				σ_s , МПа				
Матеріал: Алюміній								
3а	36x28x50	10	2.5	2.3	70	Утягнення не утворюється, проте при випресовані частина металу затікає в порожнину оправлення і зрізається		
3б			10	140	127			
3в			випресовування		47			
4а	36x28x50	10	4	2	78	Утворюється утягнення. При випресовані також зрізається невеликий об'єм металу		
4б			9	140	112			
4в			випресовування		24			
1а)	36x28x50	10	4.5	2.3	90	Утворюється утягнення. При випресовані частина металу залишилася в порожнині оправлення не зрізається а згладжується і дозаповнює фланець.		
1б)			11	140	130			
1в)			випресовування		38			

стадії деформування (див. рис 4.98, б) утягнення. На третій стадії деформування (див. рис 4.98, в) при випресованні оправлення згладжуються нерівності на внутрішній поверхні втулки. Результати проведених експериментів наведені в табл. 4.14.

При цьому в перших трьох втулках вдалося уникнути появи утягнення, однак при випресованні певний об'єм металу внутрішнього фланця зрізався (рис. 4.99).

При холодному видавлюванні втулок з фланцем без обмеження течії металу в радіальному напрямку складно отримати необхідну за кресленням рівну форму фланця. Для фланців, отриманих радіальним видавлюванням характерні наступні відхилення від форми і розмірів (рис. 4.100): а – відхилення від круглості фланця; б – відхилення від площинності фланця; в – відхилення від форми утворює фланця. Величина відхилення від форми одержуваних холодним видавлюванням фланців залежить від низки технологічних параметрів процесу деформування таких як: конфігурація деталі, геометрія інструменту, тертя на контактних поверхнях.

Результати проведених експериментів з радіального видавлювання фланців наведені в табл. 4.15. Результати експериментів показують, що найбільший вплив на відхилення форми і розмірів фланців, що видавлюються надають умови тертя на контактних поверхнях. Експерименти проводилися при різних умовах тертя на контактних поверхнях. На рис. 4.101 показані графіки залежностей сил тертя від ходу процесу деформування при різних умовах тертя на контактних поверхнях.

З графіка явно видно, що при застосуванні мастила разом з плівковим покриттям відбувається зниження питомих сил тертя в порівнянні з тим же процесом, але з використанням тільки мастильного матеріалу, який, в свою чергу, значно знижує силу тертя в порівнянні з процесом без застосування мастила. Під час експерименту з використанням плівки + мастила не спостерігається підвищення сили тертя на початку процесу, плавне її зростання.

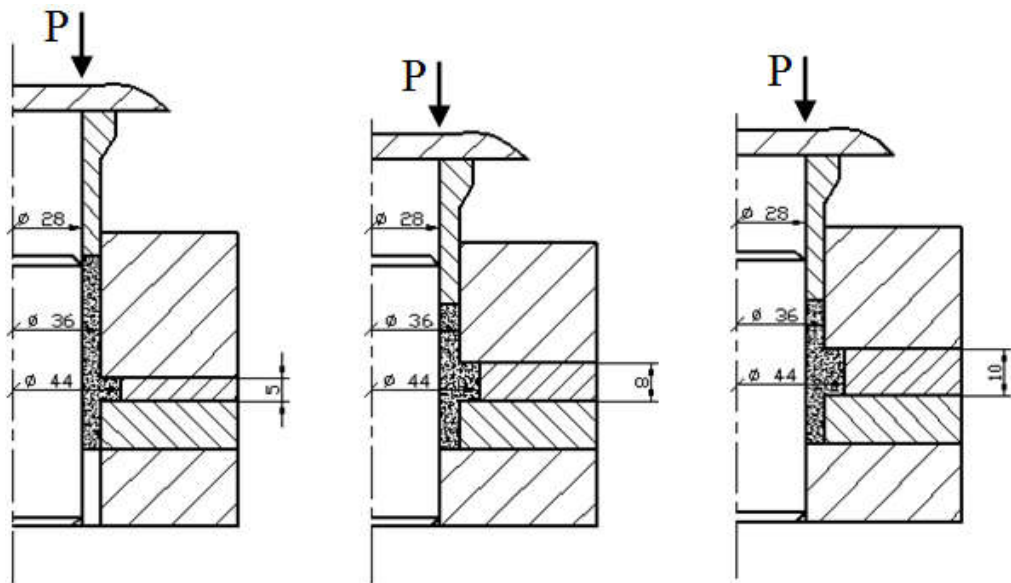


Рисунок 4.98 – Геометричні параметри деформування в експериментальному штампі.

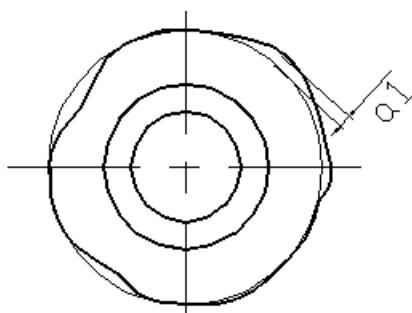


а)

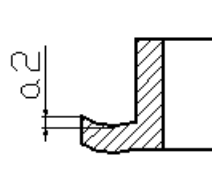


б)

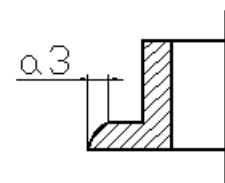
Рисунок 4.99 – Випресовування оправлення зі зрізаним металом



а



б

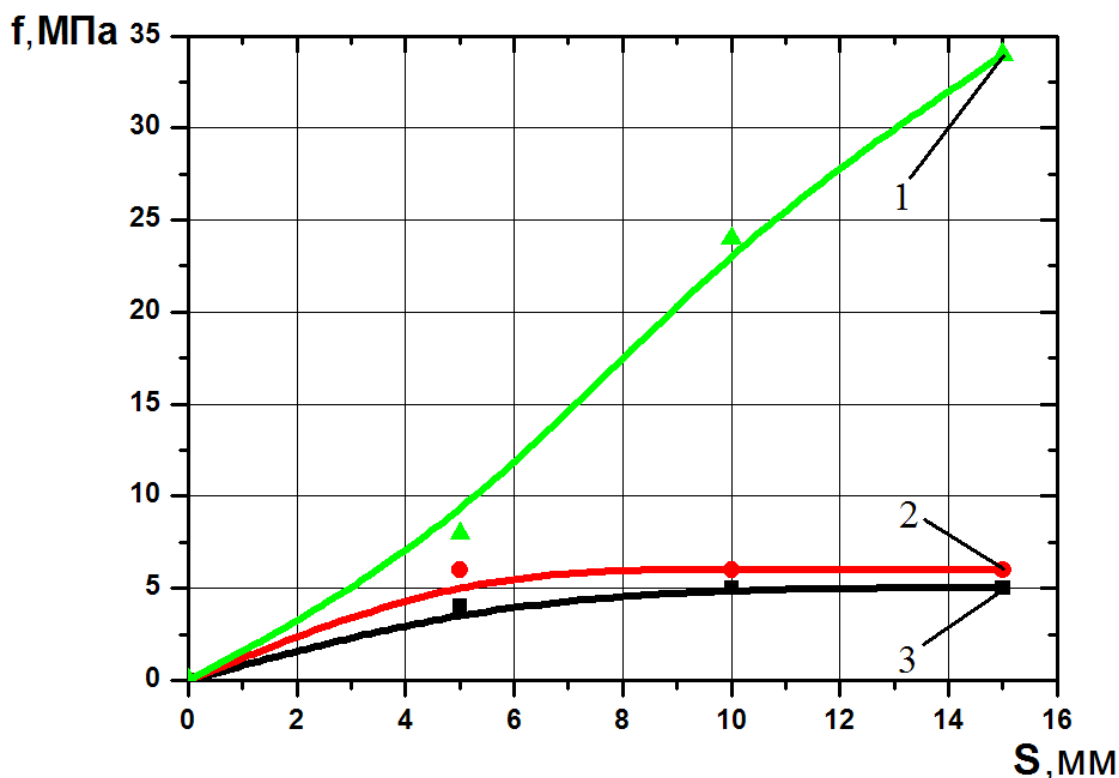


в

Рисунок 4.100 – Відхилення від форми втулок з фланцем отриманих радіальним видавлюванням: a_1 – максимальне відхилення від круглості фланця; a_2 – максимальне відхилення від площинності фланця; a_3 – різниця діаметрів фланця по нижньому і верхньому краю

Таблиця 4.15 – Відхилення від форми і розмірів порожніх деталей з зовнішніми фланцями

Алюміній, радіальне видавлювання								
№ досліду	Висота втулки	Ширина фланцю	Відхилення від круглості фланця	Різниця між верхнім і нижнім діаметром фланця	Відхилення від площинності фланця	Сила	Тертя	Примітка
1	30	50	1.7	3	немає	270кН	Без плівки і без змащення	В окремих місцях сильно нерівний фланець
2	31	50	1.7	5	немає	265кН	З плівкою і без змащення	В окремих місцях сильно нерівний фланець
3	28	50	1	3	немає	150кН	З мастилом і без плівки	Відносно рівний фланець
4	27	50	0,7	4	немає	183кН	З плівкою і з мастилом	Рівний фланець



1– без плівки і без змащення; 2– без плівки та зі змащенням;

3– з плівкою та з змащенням

Рисунок 4.101 – Залежність тиску деформування від ходу процесу при різних умовах тертя на контактних поверхнях

У перших двох деталей, отриманих з використанням оправки без плівки і без застосування мастила на ній, форма фланця виходить досить нерівномірною по периметру, особливо у першого зразка помітно три головних напрямки течії металу у фланець (абсолютне відхилення по діаметру фланця складає $\Delta=1,7$ мм, відносне відхилення – $\delta=3,3\%$). Це обумовлено напрямком шліфування опорної підкладки і нерівномірністю шорсткості по перерізу оправлення: на яких ділянках оправлення шорсткість нижче, на тих ділянках метал внутрішньої поверхні стаканчика тече краще, і швидкість його з часом більш наближається до течії металу на зовнішній поверхні, що контактує з матрицею 4 через мастильний шар.

У третьому випадку, коли на оправлення наносилося мастило MoS_2 , нерівномірність фланця по периметру помітно знизилася, хоча явно

виділяються два напрямки течії металу у фланець (абсолютне відхилення по діаметру фланця складає $\Delta=1$ мм, відносне відхилення – $\delta=1,6\%$). Це пояснюється поліпшенням умов перебігу по внутрішній поверхні деталі: наближенню швидкості течії шарів металу внутрішньої поверхні до течії шарів металу зовнішньої поверхні під фланець.

У разі застосування на оправці мастила разом з плівковим покриттям виходить найкращий за якістю фланець: досить рівномірний по периметру (абсолютне відхилення по діаметру фланця складає $\Delta=0,7$ мм, відносне відхилення – $\delta=0,4\%$). Це пояснюється значним поліпшенням перебігу металу по внутрішній поверхні деталі, на якій переважають стискаючі напруження, до плинущу металу на зовнішній поверхні деталі під фланець через те, що плівкове покриття значно знижує шорсткість і коефіцієнт тертя на оправці, а з застосуванням мастила прискорена течія металу компенсує стискаючі напруження і течія металу за поперечним перерізом деталі вирівнюється.

Висновки:

1. Реалізація на практиці процесу радіального видавлювання за різними кінематичними схемами деформування вимагає аналізу силового режиму, напружено-деформованого стану заготовки та умов розкриття півматриць. На основі енергетичного методу балансу потужностей дана оцінка силових характеристик та особливостей формоутворення заготовки при радіальному видавлюванні з компенсатором, що розташований перпендикулярно до радіального напрямку течії металу.

2. Отримання фланця на кінці стрижня в закритих матрицях супроводжуються великими навантаженнями на робочий інструмент та незаповненням кутів приймальної порожнини. З метою аналізу сили розкриття матриць проведено МСЕ–моделювання з різною геометрією матриць. Отримані графічні залежності показують, що сила розкриття зі збільшенням відносної

величини R_i/R_0 збільшується, а при збільшенні відносної величини H/R_0 – сила розкриття зменшується

3. Для процесів радіального видавлювання порожнистих деталей, за якими можна отримувати фланці на різному рівні заготовки та різної фасонної форми, встановлені особливості формоутворення та механізм утворення дефектів у вигляді утягнення та відхилення форми фланця. Основними факторами, що впливають на процес появи утягнення є відносна висота фланця $\bar{h}$ та кут скосу на матриці α . Встановлено, що при $\bar{h} \leq 0,8$ та $\alpha \leq 35^\circ$ утягнення не спостерігається. В якості рекомендацій по прогнозуванню дефектоутворення розроблені діаграми появи утягнення від відносного ходу деформуючого пуансону $\bar{S}$ від відносної висоти фланця $\bar{h}$ та кута інструменту α . Застосування фасок та заокруглень на інструменті збільшує силу розкриття матриць до 20%.

4. Деформація з двосторонньою подачею при радіальному видавлюванні дозволяє отримувати досить великі фланці з рівномірним розподілом інтенсивності деформацій за перерізом. Рекомендовані ступені деформування для такого процесу $\varepsilon_1 \approx 35\%$. Отримання точних бездефектних фланців можливе за рахунок використання операції підсадження, що реалізується тим же інструментом за рахунок рухомої півматриці. На основі проведених досліджень встановлені умови деформування заготовки з урахуванням операції підсадження фланцю.

5. Встановлено, що регулюванням кінематики руху інструменту, у тому числі і операції підсадження, можна досягти формоутворення рівного фланцю без дефектів. Послідовне видавлювання з двосторонньою подачею при радіальному видавлюванні дозволяє отримувати досить великі фланці з рівномірним розподілом інтенсивності деформацій за перерізом. Встановлено, що операцією підсадження при односторонній подачі металу заготовки отримання рівного фланцю можна досягти при висотному ступені деформації $\varepsilon_{\text{п}} = 30\%$, а при двосторонній подачі – $\varepsilon_{\text{п}} = 20\%$. При послідовному

двосторонньому радіальному видавлюванні спостерігається нечітке оформлення фланця, хоча в цілому ступінь заповнення порожнини вище.

6. Удосконалення закритого радіального видавлювання з метою зниження сил деформування та розкриття матриць можливе за рахунок додавання операції редукування, що дозволяє зменшити силу розкриття на величину, рівну силі редукування. Збільшення кута матриці в місці редукування з 15° до 45° дозволяє знизити силу деформування на 8...10%, а силу розкриття матриці – на 10...12%.

7. Регулювання кінематики руху інструменту дозволяє отримувати товсті фланці без утворення дефекту. На основі скінченно-елементного моделювання отримані діаграми залежності швидкості руху півматриці від відносних висот фланцю, що дозволяють обрати співвідношення швидкості пуансону та верхньої півматриці для отримання бездефектного виробу.

Результати досліджень відображені в опублікованих роботах [216-234].

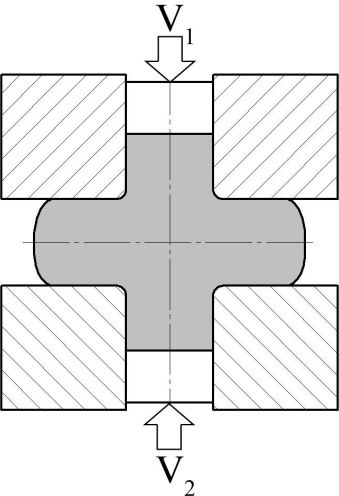
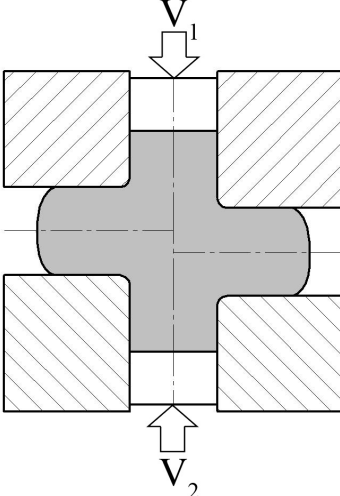
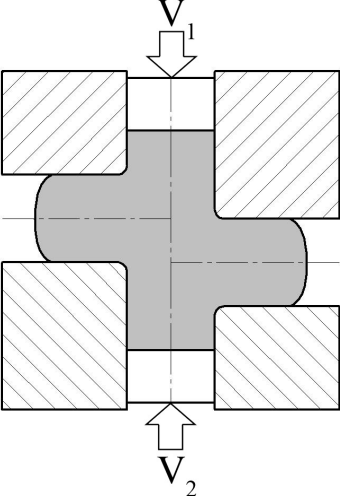
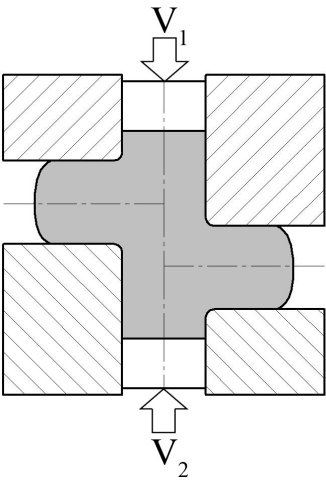
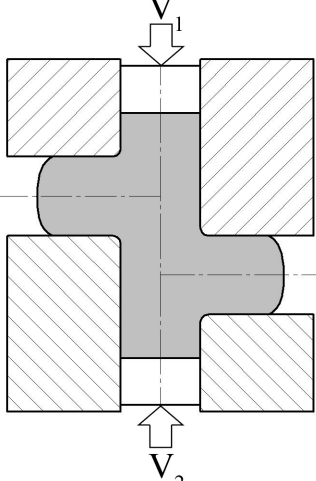
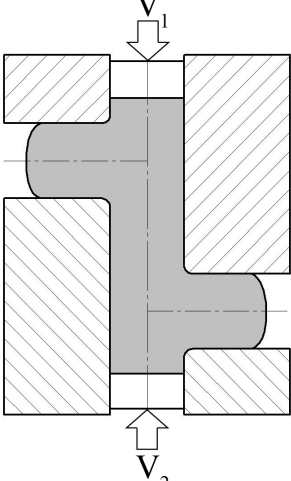
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БОКОВОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВІДРОСТКАМИ

5.1 Кінематичні варіанти отримання деталей з відростками

Перспективним методом отримання осесиметричних деталей з відростками і потовщеннями є бокове видавлювання, що характеризується течією металу заготовки в поперечному напрямку. Бокове видавлювання застосовують для виготовлення поковок з боковими відростками точними і складними за формою з високими експлуатаційними властивостями. Процеси бокового видавлювання мають велику кількість варіацій схем деформування, способів їх реалізації, і відрізняються великою різноманітністю деталей, які можливо отримувати за цими схемами. За формою поперечного перерізу відростки поділяються на круглі, плоскі, багатогранні, зубчастого профілю, порожнисті та ін. Особливістю технології бокового видавлювання є можливість регулювання деформаційних і силових параметрів процесу за допомогою зміни кінематики руху інструменту, що деформує. Графіки залежності сили від ходу інструменту дозволяють порівнювати розвиток процесу бокового видавлювання з іншими простими процесами (пряме, зворотне видавлювання). Зміна сили бокового видавлювання проходить у дві фази. На першій несталій фазі відбувається інтенсивний ріст сили до деякого значення, на другій стадії – зростання сили практично відсутнє (зростання за рахунок зміцнення металу).

Деякі з схем бокового видавлювання деталей з відростками представлені в табл. 5.1: схеми бокового видавлювання відростків з двосторонньою подачею, при розташуванні відростків на одній осі, з декількома варіантами швидкостей руху верхнього і нижнього інструменту (a1), при розташуванні відростків на відстані $0,25d_{\text{ст}}$ від горизонтальної осі симетрії, з декількома варіантами швидкостей руху верхнього і нижнього інструменту (a2), при розташуванні відростків на відстані $0,5d_{\text{ст}}$ від горизонтальної осі симетрії,

Таблиця 5.1 – Кінематичні варіанти схем бокового видавлюванн

	1	2	3
a			
б			

з декількома варіантами швидкостей руху верхнього і нижнього інструменту (а3), при розташуванні відростків на відстані $0,75d_{ст}$ від горизонтальної осі симетрії, з декількома варіантами швидкостей руху верхнього і нижнього інструменту (б1), при розташуванні відростків на відстані рівному $d_{ст}$ від горизонтальної осі симетрії, з декількома варіантами швидкостей руху верхнього і нижнього інструменту (б2) і при розташуванні відростків на відстані рівному $2d_{ст}$ від горизонтальної осі симетрії, з декількома варіантами швидкостей руху верхнього і нижнього інструменту (б3).

Співвідношення швидкостей руху верхнього і нижнього деформуючого інструменту варіювалося в межах $V_2/V_1=0,25...1$. Що дозволило досить повно вивчити вплив різних співвідношень швидкостей деформування на кінцеву геометрію деталі.

Попередні експериментальні дослідження і аналіз теоретичних джерел з даного процесу дозволили виявити характер формозміни металу, геометричні параметри осередку деформації.

5.2 Аналіз силового режиму бокового видавлювання по кінематичному варіанту з односторонньою подачею металу методом верхньої оцінки

Дослідження процесу одностороннього видавлювання. Згідно з попереднім аналізом і прийнятим допущенням, характерними для методу верхньої оцінки, складена розрахункова схема процесу (рис. 5.1).

Для зручності рішення виконуємо наступні заміни:

$$\begin{aligned} a &= R_0 - R_{c1}, & e &= H - H_2, \\ b &= R_0 - R_{c2}, & f &= R_{c2} - R_{c1}, \\ c &= H_1 - H_0, & k &= H_2 - H_1 \end{aligned}$$

Рівняння для визначення довжин контакту і швидкостей відносного ковзання сусідніх блоків зводимо в табл. 5.2

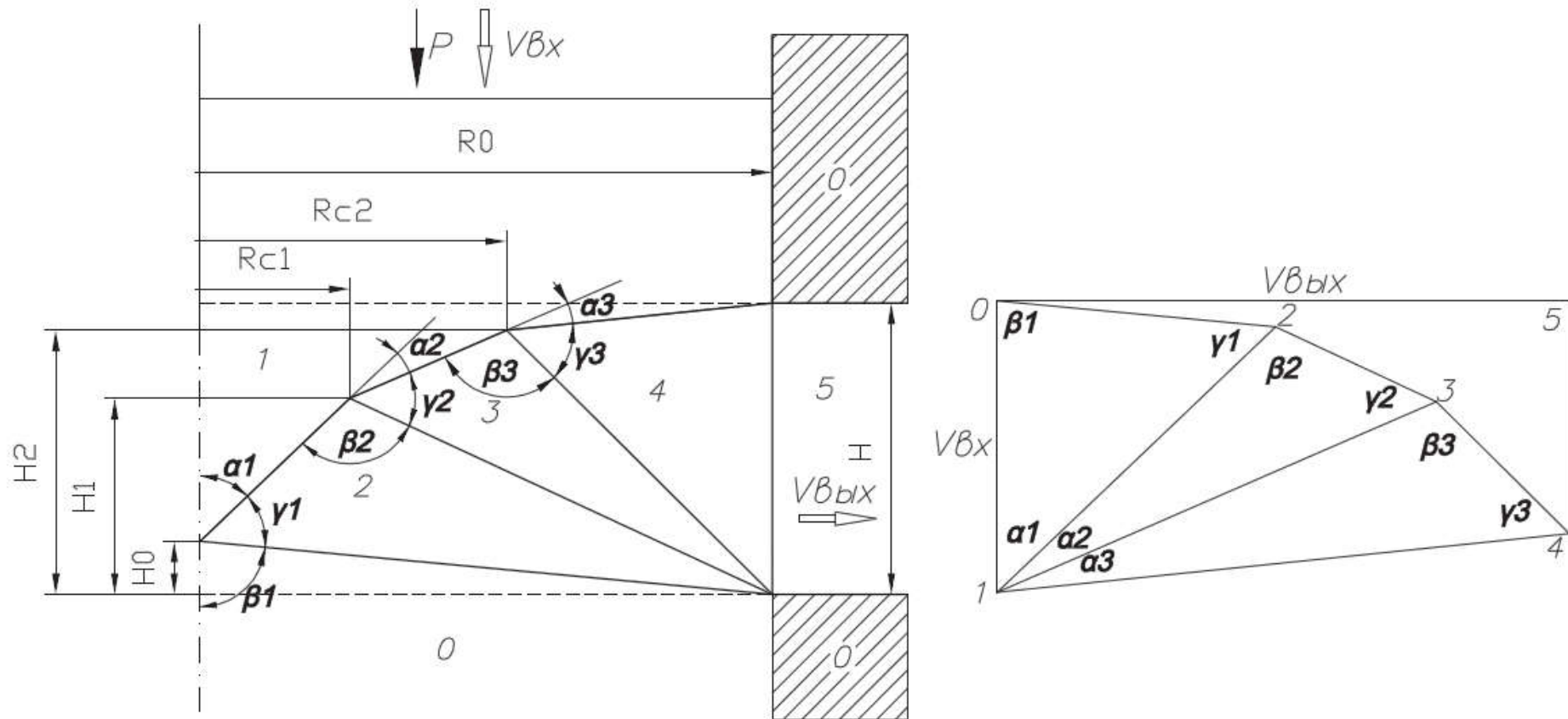


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема при односторонньому видавлюванні відростків на однаковій висоті

Таблиця 5.2 – Аналітичні залежності швидкостей і довжин зрізу і тертя

1	2	3
i-j, i-k	V_{i-j}, V_{i-k}	L_{i-j}, L_{i-k}
1-2	$V_{12} = \frac{V_{01} \cdot \frac{R_0}{\sqrt{H_0^2 + R_0^2}}}{\sqrt{1 - \left(-\frac{a^2 + H_1^2 + c^2 + R_{c1}^2 + H_0^2 + R_0^2}{2 \cdot (c^2 + R_{c1}^2) \cdot (H_0^2 + R_0^2)} \right)^2}}$	$l_{12} = \sqrt{(H_1 - H_0)^2 + R_{c1}^2}$
0-2	$V_{02} = \frac{V_{01} \cdot \frac{H_1 - H_0}{\sqrt{H_0^2 + R_0^2}}}{\sqrt{1 - \left(-\frac{a^2 + H_1^2 + c^2 + R_{c1}^2 + H_0^2 + R_0^2}{2 \cdot (c^2 + R_{c1}^2) \cdot (H_0^2 + R_0^2)} \right)^2}}$	$l_{02} = \sqrt{H_0^2 + R_0^2}$
1-3	$V_{13} = \frac{V_{12} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_0^2 + R_0^2 + c^2 + R_{c1}^2 + a^2 + H_1^2}{2 \cdot (c^2 + R_{c1}^2) \cdot (a^2 + H_1^2)} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b^2 + H_2^2 + k^2 + f^2 + a^2 + H_1^2}{2 \cdot (k^2 + f^2) \cdot (a^2 + H_1^2)} \right)^2}}$	$l_{13} = \sqrt{(H_2 - H_1)^2 + (R_{c2} - R_{c1})^2}$

1	2	3
1-4	$V_{14} = \frac{V_{13} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 + H_1^2 + k^2 + f^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (k^2 + f^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_2^2 + b^2 + b^2 + e^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (b^2 + e^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2}}$	$l_{14} = \sqrt{(R_0 - R_{c2})^2 + (H - H_2)^2}$
2-3	$V_{34} = V_{13} \cdot \left[\frac{180 - \frac{1}{\sin \left(\sqrt{1 - \left(\frac{H_0^2 + R_0^2 + c^2 + R_{c1}^2 + a^2 + H_1^2}{2 \cdot (c^2 + R_{c1}^2) \cdot (a^2 + H_1^2)} \right)^2} \right)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_2^2 + b^2 + b^2 + e^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (b^2 + e^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2}} - \frac{\frac{1}{\sin \left(\sqrt{1 - \left(\frac{b^2 + H_2^2 + k^2 + f^2 + a^2 + H_1^2}{2 \cdot (k^2 + f^2) \cdot (a^2 + H_1^2)} \right)^2} \right)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b^2 + H_2^2 + k^2 + f^2 + a^2 + H_1^2}{2 \cdot (k^2 + f^2) \cdot (a^2 + H_1^2)} \right)^2}} \right]$	$l_{23} = \sqrt{(R_0 - R_{c1})^2 + H_1^2}$

1	2	3
3-4	$V_{34} = V_{13} \cdot \left[\frac{180 - \frac{1}{\sin \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a^2 + H_1^2 + k^2 + f^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (k^2 + f^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2} \right)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_2^2 + b^2 + b^2 + e^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (b^2 + e^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2}} - \frac{\frac{1}{\sin \left(\sqrt{1 - \left(\frac{H_2^2 + b^2 + b^2 + e^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (b^2 + e^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2} \right)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_2^2 + b^2 + b^2 + e^2 + b^2 + H_2^2}{2 \cdot (b^2 + e^2) \cdot (b^2 + H_2^2)} \right)^2}} \right]$	$l_{34} = \sqrt{(R_0 - R_{c2})^2 + H_2^2}$
4-5	$V_{45} = V_{01} - \sqrt{V_{14}^2 - \left(\frac{R_0}{H} \right)^2}$	$l_{45} = H$

Зниження значень приведенного тиску при збільшенні відносної висоти відростка, згідно з попередніми дослідженнями, спостерігається за рахунок зменшення ступеню деформування. Більшу цікавість для досліджень складає оптимізація значень осередку деформування при характерному терті для холодного видавлювання $\mu=0,1$ (рис. 5.2). Положення осередку деформування характеризується значенням H_0 .

З графіків видно, що існує певний діапазон відносних значень $H_0=0,45...0,55$, при яких значення приведенного тиску досягають свого мінімуму. Це пояснюється тим, що кут між зонами зрізу в осередку деформування розташовується так, що їх значення прагне до мінімальних значень. При збільшенні коефіцієнта тертя в інтервалі $[0,1..0,3]$ відбувається пропорційне збільшення приведенного тиску при інших рівних геометричних параметрах процесу.

Для оцінки розподілу накопиченої деформації по висоті відростка та аналізу залежності нерівномірності деформацій при різних висотах відростку розрахуємо значення компонентів деформацій за потоками в кожному з модулів.

Деформація зсуву між елементами $i-j$:

$$\gamma_{ij} = \frac{V_{ij}^{\tau}}{V_{ij}^n}, \quad (5.1)$$

Середня деформація зсуву між потоками:

$$\gamma_{cp} = \frac{\sum(\gamma_k \cdot l_k)}{\sum l_k}, \quad (5.2)$$

Середня накопичена деформація між потоками:

$$e_c = \frac{\gamma_{cp}}{\sqrt{3}}, \quad (5.3)$$

На рис. 5.3 представлена гістограма розподілу накопиченої деформації при різних відносній висоті відростка $0,3R_0$; $0,5R_0$; $0,5R_0$. Як помітно з гістограми

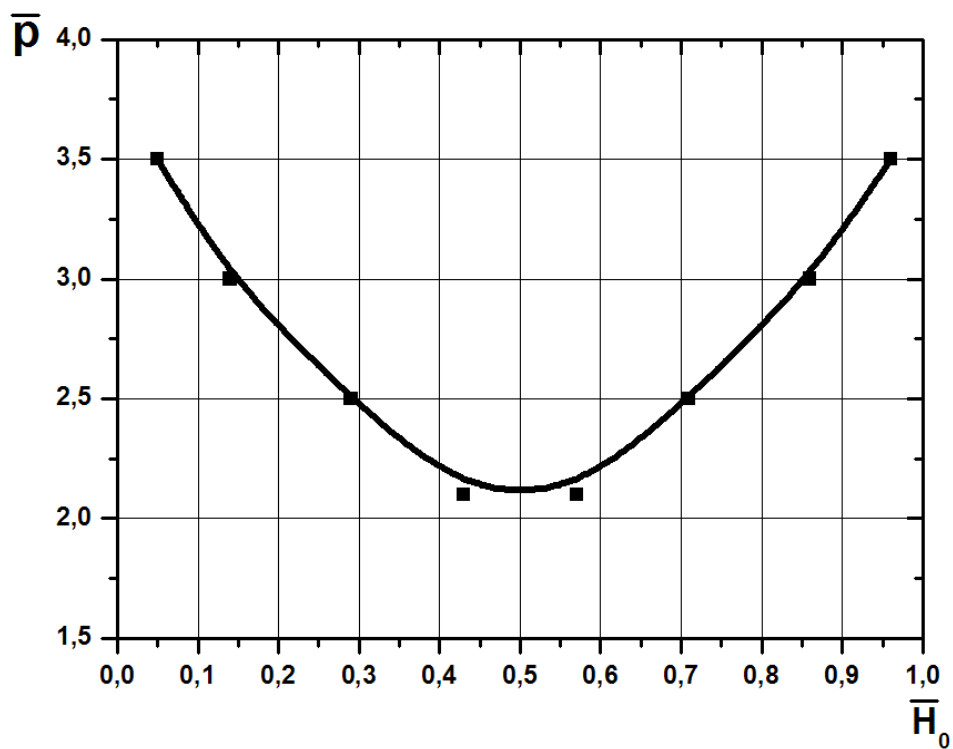


Рисунок 5.2 – Оптимізація значень осередку деформування, $\mu=0,1$

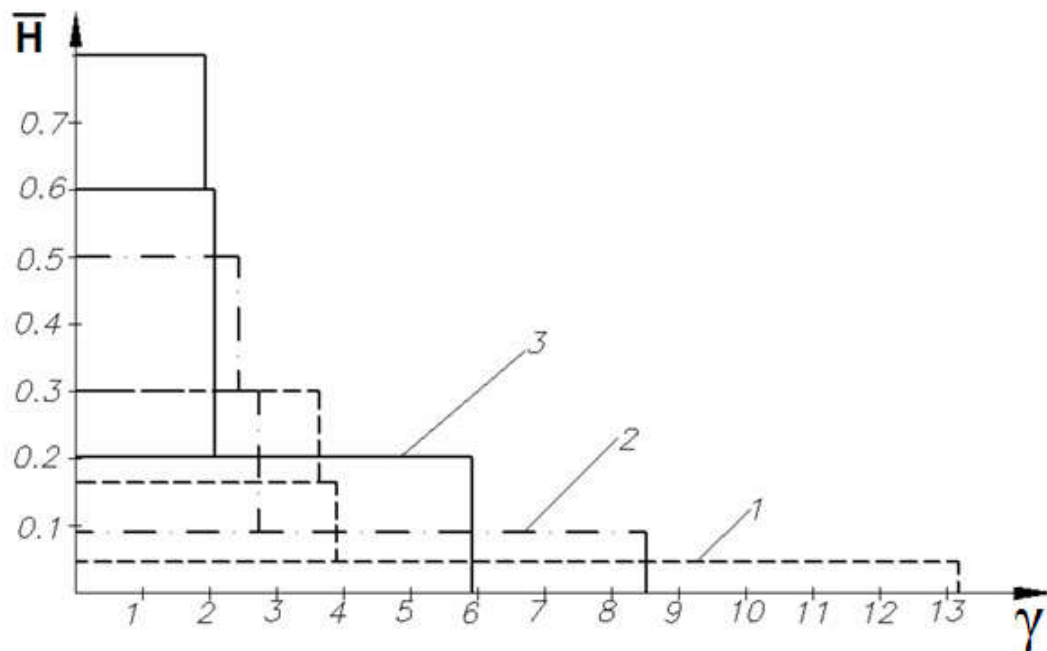


Рисунок 5.3 – Гісторограма розподілу накопиченої деформації по висоті відростка при односторонній подачі: 1 – $H=0,3R_0$; 2 – $H=0,5R_0$; 3 – $H=0,8R_0$

зміна відносної висоти відростка в сторону зростання призводить до зниження середньої накопленої деформації у відростку. Таке зниження деформацій при односторонній подачі металу в порожнину матриці пояснюється зниженням ступеню деформування.

5.3 Дослідження силових характеристик процесу бокового видавлювання деталей з відростками, розташованими на різній висоті, енергетичним методом балансу потужностей

Розрахункова схема процесу наведена на рис. 5.4. Швидкість руху зони 4 позначимо λV_0 . Неважко помітити, що λ може змінюватися від 0 до 1. При $\lambda=0$ течія металу здійснюється тільки в верхній відросток, вниз течія металу повністю відсутня. При $\lambda=1$ течія металу здійснюється тільки в нижній відросток. Розбиття на жорсткі модулі нижнього осередку деформації виконуємо аналогічно верхньому. Мінімізація приведенного тиску здійснювалася методом перебору можливих значень геометричних параметрів. Кінематично можливі поля швидкостей (КМПШ) для прямокутних модулів записані в табл. 5.3.

Знайдемо вираз для знаходження потужності, необхідної для деформування в зоні 2:

$$N_{D(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot (1 - \lambda) \cdot R \quad (5.4)$$

для зони 5:

$$N_{D(5)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \lambda \cdot R \quad (5.5)$$

Визначимо потужності на подолання сил зрізу:

$$\tau_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s, \quad (5.6)$$

$$V_{C(1-2)} = V_{C(2-4)} = V_{X(2)} = \frac{V_0}{H_1} \cdot (1 - \lambda) \cdot x, \quad (5.7)$$

$$V_{C(4-5)} = V_{C(5-0)} = V_{X(5)} = \frac{V_0}{H_2} \cdot \lambda \cdot x, \quad (5.8)$$

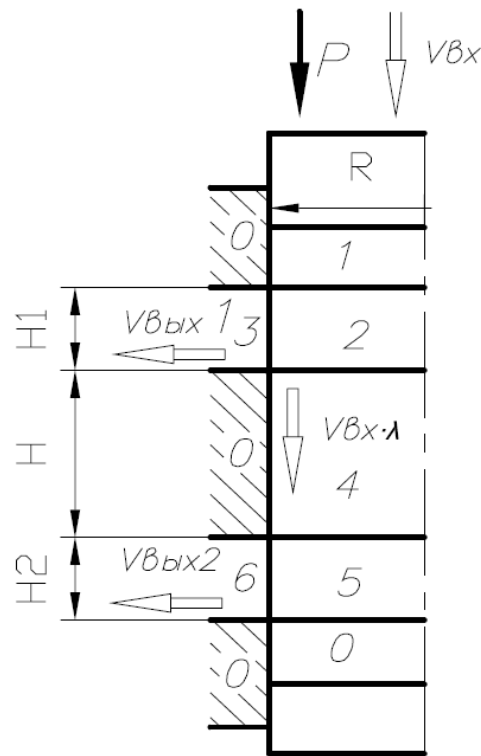


Рисунок 5.4 – Розрахункова схема при видавлюванні відростків на різній висоті

Таблиця 5.3 – КМПШ осередку деформування

Блок 1	Блок 4
$V_z = -V_0,$ $V_x = 0.$	$V_z = -\lambda \cdot V_0,$ $V_x = 0.$
Блок 2	Блок 5
$V_z = -\frac{V_0}{H_1} \cdot (1 - \lambda) \cdot z - \lambda \cdot V_0,$ $V_x = \frac{V_0}{H_1} \cdot (1 - \lambda) \cdot x.$	$V_z = -\lambda \cdot \frac{V_0}{H_2} \cdot z,$ $V_x = \lambda \cdot \frac{V_0}{H_2} \cdot x$
Блок 3	Блок 6
$V_z = 0,$ $V_x = \frac{V_0}{H_1} \cdot (1 - \lambda) \cdot R.$	$V_z = 0,$ $V_x = \lambda \cdot \frac{V_0}{H_2} \cdot R$

$$V_{c(2-3)} = V_{z(2)} = -\frac{V_0}{H_1} \cdot (1 - \lambda) \cdot z - \lambda \cdot V_0,$$

(5.9)

$$V_{C(5-6)} = V_{Z(5)} = -\frac{V_0}{H_2} \cdot \lambda \cdot z, \quad (5.10)$$

$$N_{C(1-2)} = N_{C(2-4)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \frac{V_0}{H_1} \cdot (1-\lambda) \cdot \frac{R^2}{2}, \quad (5.11)$$

$$N_{C(4-5)} = N_{C(5-0)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \frac{V_0}{H_2} \cdot \lambda \cdot \frac{R^2}{2}, \quad (5.12)$$

$$N_{C(2-3)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0}{2} \cdot (1-\lambda) \cdot H_1 - \lambda \cdot V_0 \cdot H_1 \right), \quad (5.13)$$

$$N_{C(5-6)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \frac{V_0}{2} \cdot \lambda \cdot H_2. \quad (5.14)$$

Зріз 1–2, 2–4 рівні 4–5, 5–0 рівні.

Визначаємо потужність на подолання сил тертя:

$$\tau_s = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \mu_s, \quad (5.15)$$

Приймаємо тертя тільки на поверхні (0–4)

$$V_{k(0-4)} = V_{Z(4)} = \lambda \cdot V_0, \quad (5.16)$$

$$N_{T(0-4)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \mu_s \cdot \lambda \cdot V_0 \cdot H. \quad (5.17)$$

Скоротимо ліву і праву частину рівняння на $\sigma_s R V_0$ і вирішимо відносно $\bar{P}$:

$$\bar{P} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[2 + (1-\lambda) \cdot \left(\frac{R}{H_1} - \frac{H_1}{2 \cdot R} \right) + \lambda \cdot \left(\frac{R}{H_2} + \frac{H_2}{2 \cdot R} + \frac{H_1}{R} + 2 \cdot \mu_s \cdot \frac{H}{R} \right) \right]. \quad (5.18)$$

Якщо прийняти $H_1=H_2$ то

$$\bar{P} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[1 + \frac{R}{2 \cdot H_1} + \frac{H_1}{4 \cdot R} \cdot \lambda \left(\frac{H_1}{R} + \mu_s \cdot \frac{H}{R} \right) \right]. \quad (5.19)$$

Приведений тиск при заповненні тільки верхнього відростка нижче, ніж приведений тиск при заповненні тільки нижнього, так як для заповнення нижньої порожнини необхідно подолати сили тертя в проміжній зоні між відростками.

При $\lambda=0$ відбувається скачок приведенного тиску, це пояснюється тим, що відбувається поділ на нуль, тим самим виникає невизначеність виду $\lim (1/\lambda)=\infty$. Відповідно приведений тиск прагне до нескінченності. Дана математична модель не дає можливість досліджувати процес в граничних точках ($\lambda=0$ і $\lambda=1$).

З графіка (рис. 5.5, 5.6) видно, що при збільшенні коефіцієнта тертя спостерігається збільшення приведенного тиску. Це пов'язано з тим, що більше енергії витрачається на подолання сил тертя. При збільшенні коефіцієнта λ збільшується приведений тиск, так як металу енергетично не вигідно заповнювати нижній відросток. При збільшенні нижнього відростка в 2 рази переміщення металу в нього не спостерігатиметься (див. рис. 5.6), приведений тиск збільшується зі збільшенням коефіцієнта λ , що суперечить мінімуму енергії, що витрачається.

Переміщення металу в нижній відросток не спостерігається, тому що металу енергетично не вигідно долати тертя в проміжній зоні і витрачати енергію на утворення другого осередку деформації. Рішення завдання енергетичним методом підтверджує експериментальні дані, що металу вигідніше текти в верхній відросток. Для більшого заповнення нижнього відростку варто застосовувати двосторонню подачу металу.

5.4 Дослідження силового режиму видавлювання деталей з відростками плоскої форми

Вивчення впливу висоти відростка на величину приведенного тиску видавлювання з визначенням оптимального кута закінчення β проводиться на основі методу верхньої оцінки (рис. 5.7). Довжини меж контакту блоків і швидкості відносного ковзання наведені в табл. 5.4.

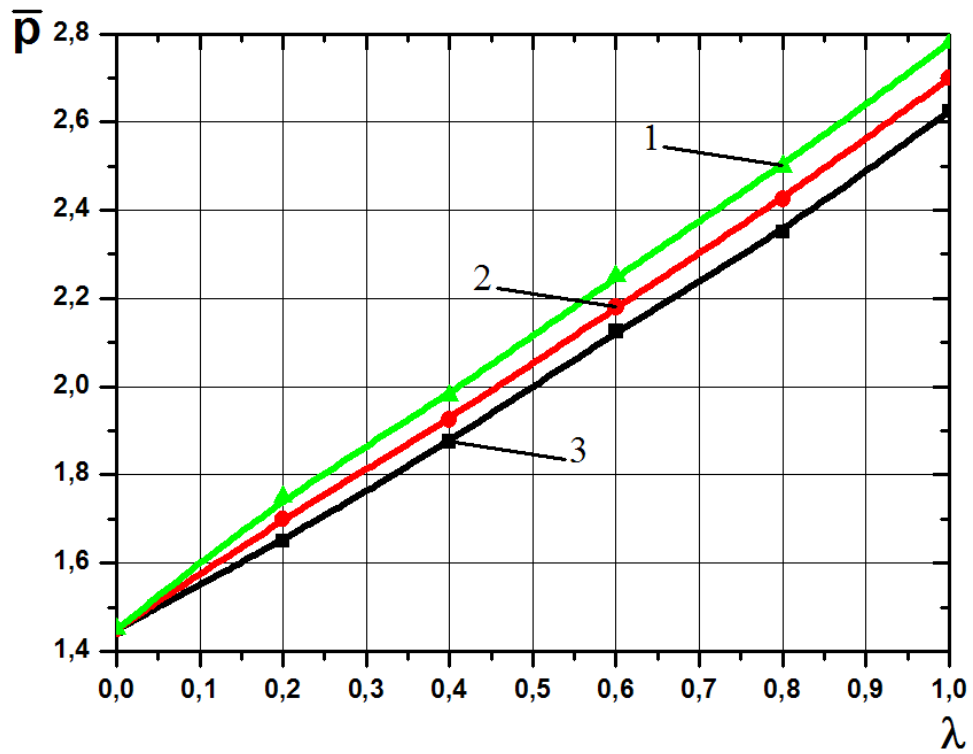


Рисунок 5.5 – Графік залежності $\bar{p} = f(\lambda)$ при $H_1 = H_2$: 1 – $\mu=0$;
2 – $\mu=0,1$; 3 – $\mu=0,2$

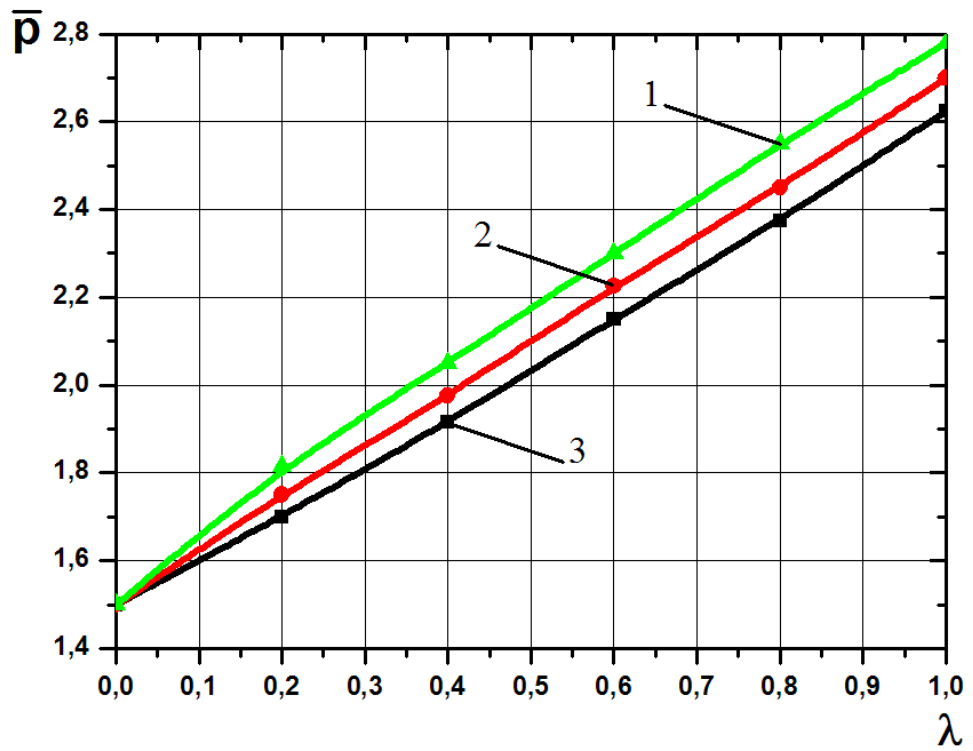


Рисунок 5.6 – Графік залежності $\bar{p} = f(\lambda)$ при $H_1 = 2H_2$

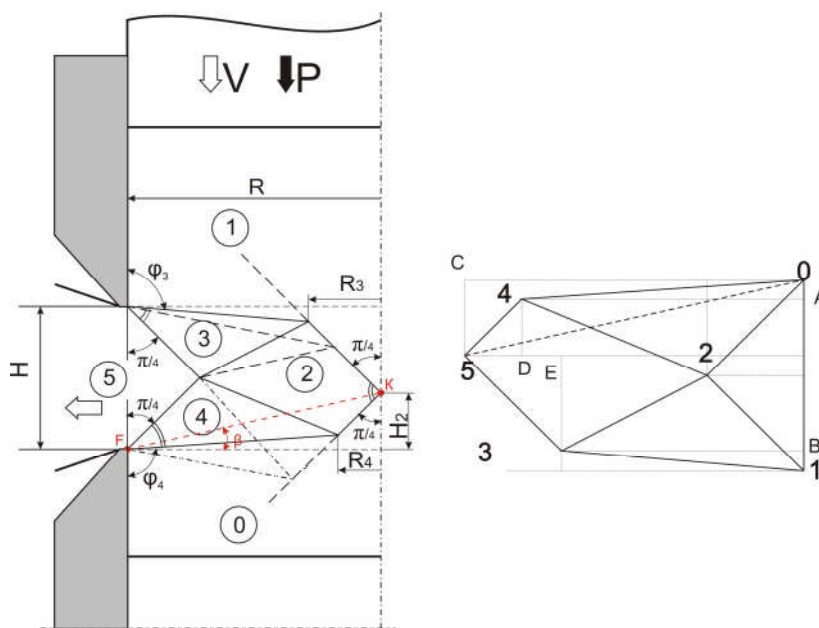


Рисунок 5.7 – Розрахункова схема і годограф швидкостей

Таблиця 5.4 – Довжини меж контакту блоків і швидкості відносного ковзання

ij	l_{ij}	V_{ij}
02	$\frac{R \cdot \cos \varphi_4 + H_2 \cdot \sin \varphi_4}{\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\cos \varphi_4 + \sin \varphi_4)}$	$\frac{H}{\sqrt{2}}$
04	$\frac{R - l_{02} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}}{\sin \varphi_4}$	$\sqrt{(R - R_4)^2 + (R_4 - H_2)^2}$
12	$\frac{R \cdot \cos \varphi_3 + (H - H_2) \cdot \sin \varphi_3}{\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\cos \varphi_3 + \sin \varphi_3)}$	$\frac{H}{\sqrt{2}}$
13	$\frac{R - l_{12} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}}{\sin \varphi_3}$	$\sqrt{(R - R_3)^2 + (H - H_2 - R_3)^2}$
23	$\sqrt{\left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right)^2 + l_{13}^2 - 2 \cdot \frac{H}{\sqrt{2}} \cdot l_{13} \cdot \cos(135 - \varphi_3)}$	$\sqrt{\left(R - R_3 - \frac{H}{2}\right)^2 + \left(\frac{H}{2} - H_2 - R_3\right)^2}$
24	$\sqrt{\left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right)^2 + l_{04}^2 - 2 \cdot \frac{H}{\sqrt{2}} \cdot l_{04} \cdot \cos(135 - \varphi_4)}$	$\sqrt{\left(R - R_4 - \frac{H}{2}\right)^2 + \left(R_4 - H_2 - \frac{H}{2}\right)^2}$
35	$\frac{H}{\sqrt{2}}$	$R_3 \sqrt{2}$
45	$\frac{H}{\sqrt{2}}$	$R_4 \sqrt{2}$

Завдання оптимізації форми і розмірів осередку деформації (положення характерних точок) вирішувалася за допомогою програми в Mathcad. Були отримані залежності приведенного тиску від відносної висоти відростка H/R , оптимального кута від відносної висоти відростка H/R при різних коефіцієнтах тертя $\mu=0,05$; $\mu=0,1$; $\mu=0,25$ (рис. 5.8).

На рис. 5.8 видно, що при збільшенні відносної товщини відростка приведений тиск знижується. При збільшенні коефіцієнта тертя з 0,05 до 0,25 приведений тиск зростає на 10...20%.

При збільшенні відносної товщини відростка від 0,3 до 1,0 кут β змінюється лінійно в межах 10...33°. При збільшенні коефіцієнта тертя від 0,05 до 0,25 кут β знижується на 4...5°.

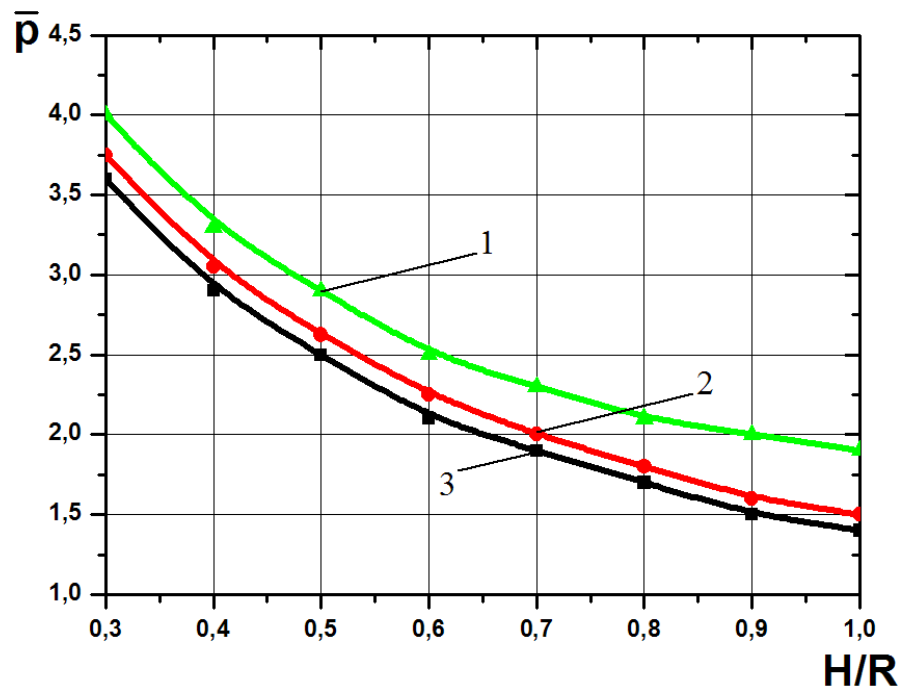


Рисунок 5.8 – Залежність приведенного тиску від відносної товщини відростка при різних коефіцієнтах тертя: 1 – $\mu=0,25$; 2 – $\mu=0,10$; 3 – $\mu=0,05$

Аналізуючи залежність зміни оптимального кута відростків від відносної висоти відростка H/R кут β змінюється лінійно і визначається по залежності:

$$\beta = (\bar{H} - 0,3) \cdot 31,4 + 11 \quad (5.20)$$

Досліджувався розподіл ступеня деформації і якості одержуваних деталей при різних кутах витікання металу у відросток (0° , 20° , 25° , 30°) і при відносній висоті відростка, що дорівнює 0,7. В результаті видавлювання мінімальне значення сили і рівномірний розподіл деформації спостерігається при кутах, що знаходяться в інтервалі $25^\circ \dots 30^\circ$.

При односторонньому видавлюванні зона максимальних зсувних деформацій зміщена до нижньої частини відростка і в залежності від кута закінчення розподіляється по-різному. Найбільш сприятливою, з точки зору рівномірності деформацій, є схема видавлювання під кутом 25° , так як вона не поширюється в тіло заготовки. Це знижує ймовірність утворення тріщин і дозволяє прогнозувати більш високі експлуатаційні характеристики деталі. При цьому куті видавлювання також отримувалось найменша сила видавлювання.

5.5 Дослідження кінематичних варіантів бокового видавлювання фасонних відростків в роз'ємних матрицях

5.5.1 Моделювання процесу бокового видавлювання відростка прямокутного і круглого перерізу при односторонній подачі в роз'ємних матрицях

В даному теоретичному дослідженні представлено математичне моделювання процесів бокового видавлювання в закритих матрицях за допомогою програми методу скінченних елементів DEFORM 2D/3D, яка дозволяє визначати напружено деформований стан і силовий режим процесу.

Граничними умовами для процесу моделювання встановлені: крива істинних напружень для матеріалу АМцМ, що описується рівнянням $\sigma_s(\varepsilon) = 188,4 \varepsilon^{0,15}$, межа текучості $\sigma_{0,2} = 105 \text{ МПа}$, модуль Юнга $E = 75000 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$ і коефіцієнт тертя між матеріалом заготовки і інструментом $\mu = 0,16$ (закон Зібеля).

Згадана схема (а) і отриманий напівфабрикат (б) представлені на рис. 5.9. Обрані наступні параметри для моделювання процесу бокового видавлювання відростків прямокутного і круглого перерізу:

– загальні геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0=15\text{мм}$), R – радіус відростка ($R=30\text{мм}$), r – радіус заокруглення кромки інструменту ($r=1\text{ мм}$).

– геометричні параметри для прямокутного перерізу: h – висота приймальної порожнини для видавлюється відростка, h/R_0 – відносна висота відростка ($h/R_0=0,5; 0,75; 1,0$), L – висота заготовки ($L=70\text{ мм}$), b – ширина відростка ($b=30\text{ мм}$).

– геометричні параметри для круглого перерізу: h – висота приймальної порожнини для відростка, що видавлюється, h/R_0 – відносна висота відростка ($h/R_0=0,75$), L – висота заготовки ($L=70\text{ мм}$), d – діаметр відростка ($d=20,74\text{ мм}$).

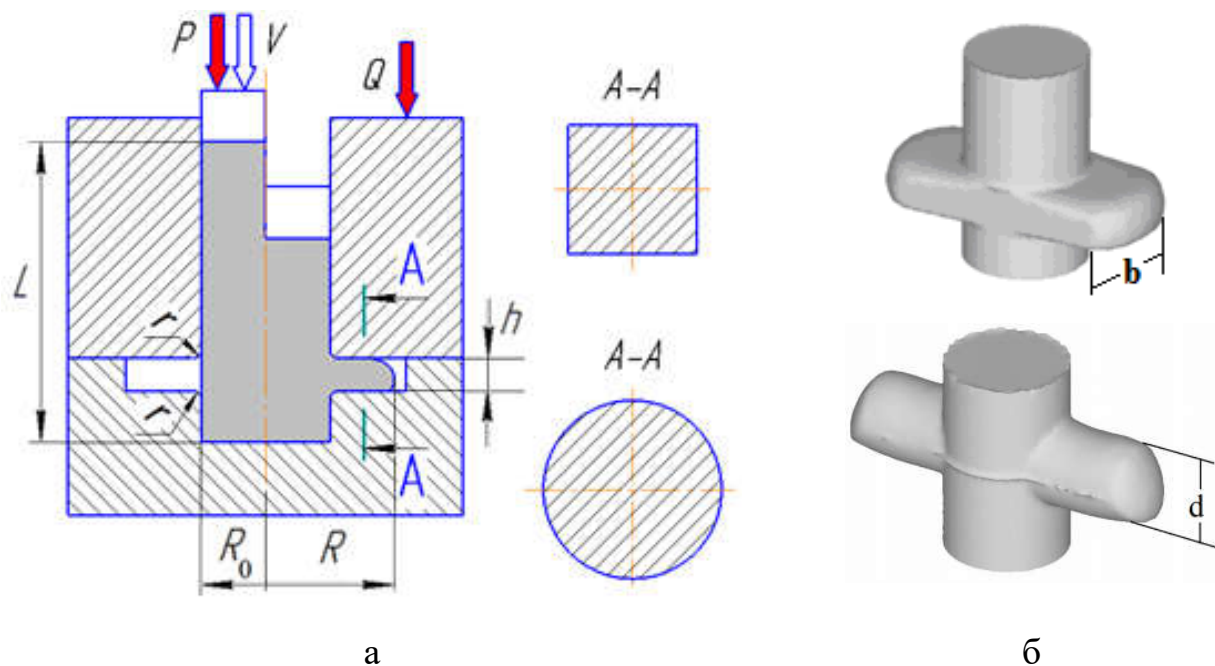


Рисунок 5.9 – Схема процесу бокового видавлювання відростка прямокутного і круглого перерізу при односторонній подачі (а) і отримані напівфабрикати (б)

5.5.1.1 Моделювання напруженого і деформованого стану при процесі бокового видавлювання односторонньої подачі

На рис. 5.10, 5.11, Д.1 та Д.2 (додаток Д) представлені результати моделювання процесу при різній відносній висоті відростка прямокутного перерізу ($h/R_0=0,5$; $0,75$; $1,0\text{мм}$) і круглого перерізу ($h/R_0=0,75$), такі як викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій в осередку деформації і розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перерізі заготовки. Як видно з рисунків, найбільша інтенсивність деформації та напружень зосереджена в нижній частині осередку деформації процесу. Значення максимальної інтенсивності деформацій і напружень були отримані при відносному проміжному радіусі відростка ($R/R_0=2,4$) які досягають наступних позначок. При відносній висоті приймальні порожнини під відросток прямокутного перерізу $h/R_0=0,5$, $h/R_0=0,75$ та $h/R_0=1$ – $\varepsilon_i=2,5$; $\sigma_i=140\text{ МПа}$ і круглого перерізу $h/R_0=0,75$ – $\varepsilon_i=2,5$; $\sigma_i=135\text{ МПа}$.

5.5.1.2 Моделювання силового режиму процесу бокового видавлювання односторонньої подачі

На рис. 5.12 досліджена залежність сили від ходу процесу в певному інтервалі значень $h/R_0=0,5$, $h/R_0=0,75$ і $h/R_0=1,0$. З графіка для прямокутного перерізу видно, що при $h/R_0=0,5$ відбувається збільшення сили процесу до позначки ходу $S=4\text{ мм}$, яке досягає $P=160\text{ кН}$, а після цього плавно зростає, до позначки $P=180\text{ кН}$ з ходом $S=16\text{ мм}$. При $h/R_0=0,75$ графік показує, що до позначки ходу $S=4\text{ мм}$ зростає до значення $P=120\text{ кН}$, а потім плавно збільшується і досягає $P=165\text{ кН}$ при ході $S=20\text{ мм}$, а також при $h/R_0=1$ до позначки $S=4\text{ мм}$ збільшується до значення $P=95\text{ кН}$, а потім плавно зростає, досягаючи значення $P=155\text{ кН}$ з ходом $S=24\text{ мм}$. Це пояснюється тим, що чим більше відросток, тим більше контакт з інструментом.

Для порівняння силового режиму процесу бокового видавлювання відростка прямокутного перерізу і круглого були побудовані відповідні графіки (рис. 5.13).

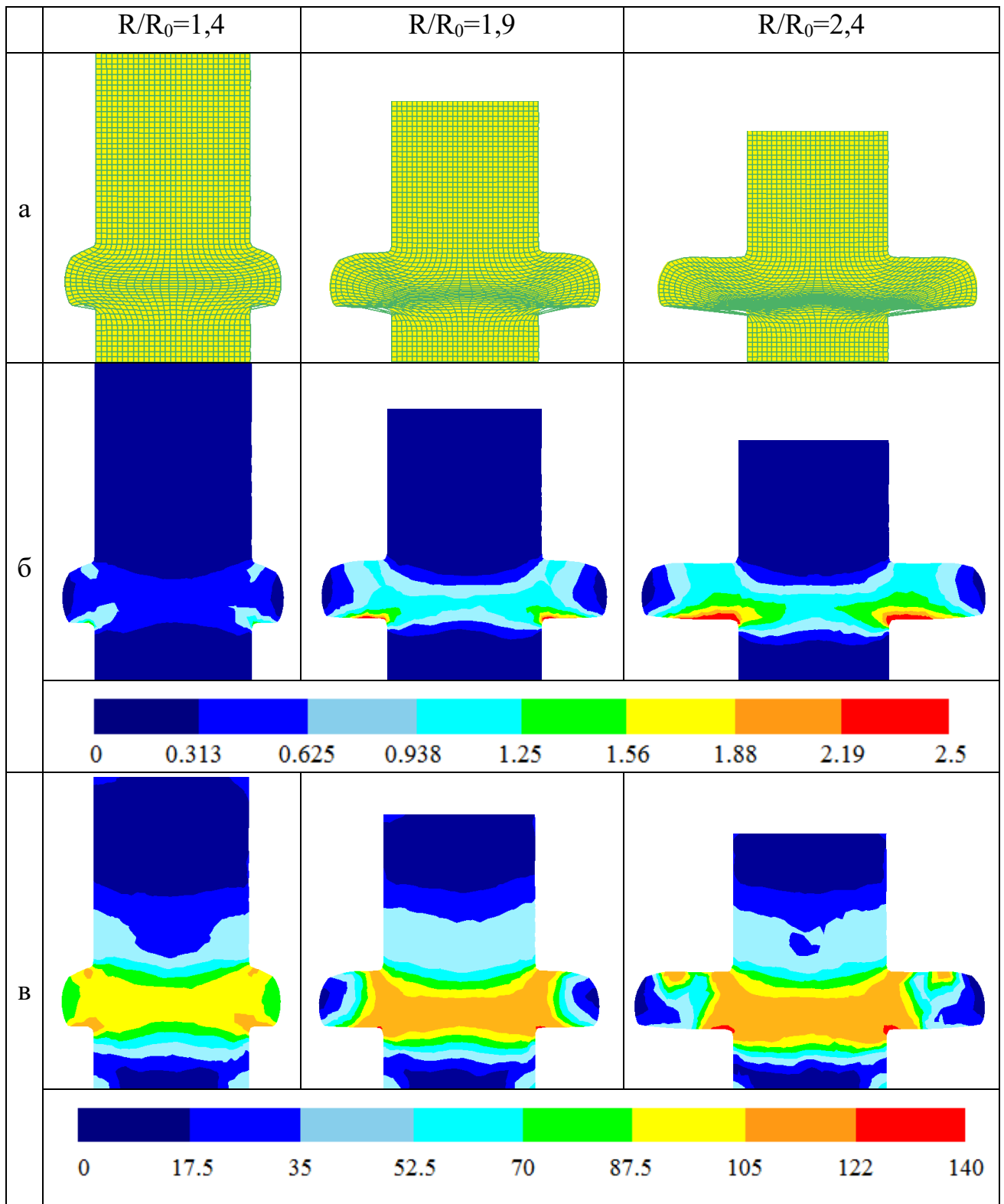


Рисунок 5.10 – Викривлення ділільної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні відростка з односторонньою подачею при $h/R_0=1$; $r=1$ мм; $h=15$ мм; $b=30$ мм; $\mu=0,08$

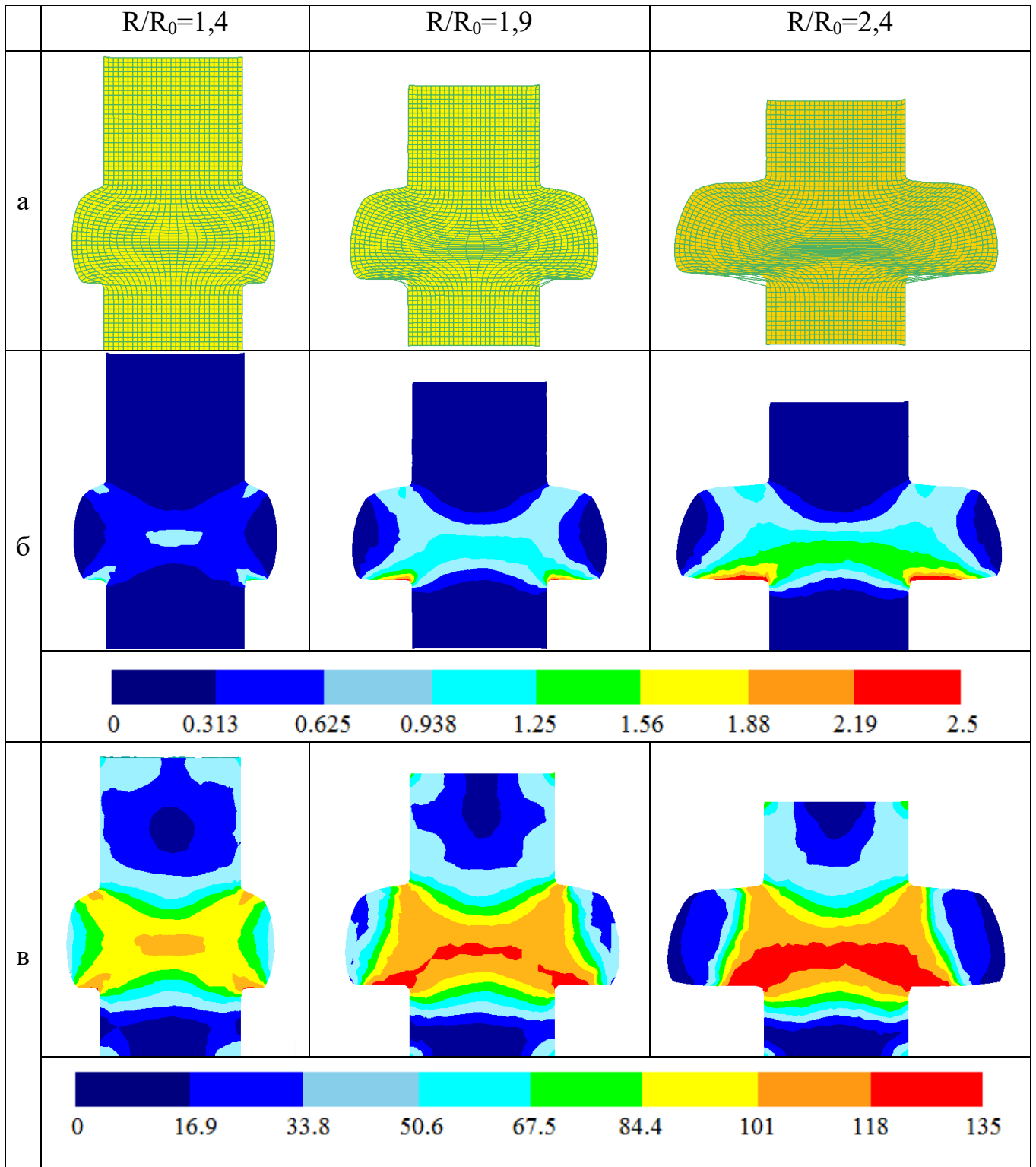


Рисунок 5.11 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні круглого відростка при $h/R_0=0,75$ для прямокутного перерізу, $r=1$ мм, $R_0=15$ мм, $d=20,74$ мм, $\mu=0,08$

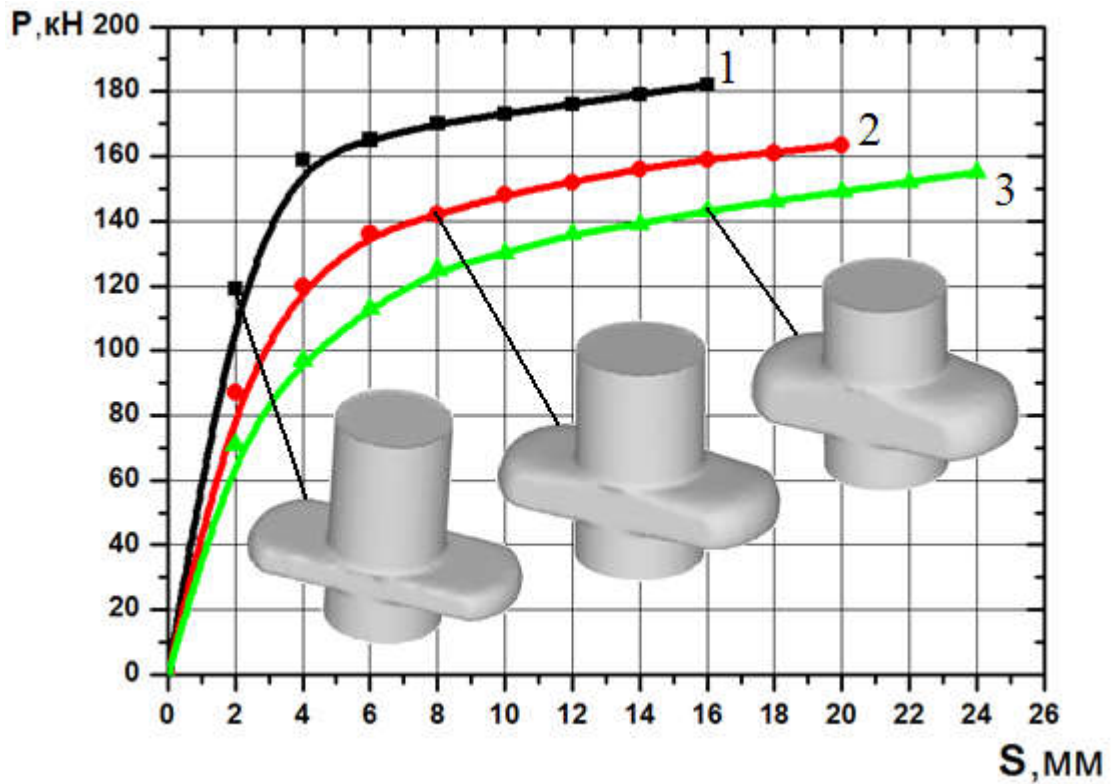


Рисунок 5.12 – Графік залежності сили процесу від ходу пуансона при різних значеннях h/R_0 : 1 – $h/R_0=0,5$; 2 – $h/R_0=0,75$; 3 – $h/R_0=1,0$

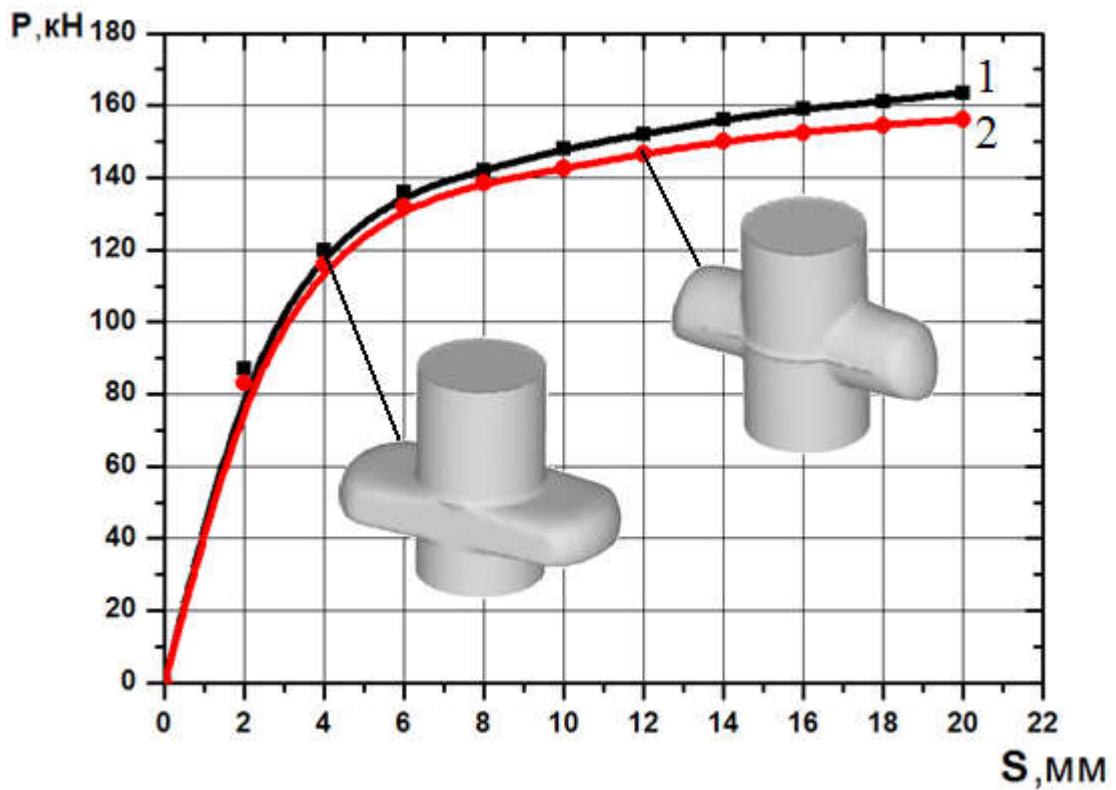


Рисунок 5.13 – Графік залежності сили від ходу процесу: $h/R_0=0,75$; 1 – прямокутного перерізу; $h/R_0=0,75$; 2 – круглого перерізу

Порівняння показує (див. рис. 5.13), що при ході пуансона $S=20$ мм найбільше значення сили досягається при видавлюванні відростка прямокутної форми $P=165$ кН, а при видавлюванні відростка круглої форми рівно $P=155$ кН. Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок, що при видавлюванні відростків різної форми, але з однаковою площею перерізу різниця сили становить 6 – 10%.

5.5.2 Моделювання процесу бокового видавлювання відростка прямокутного і круглого перерізу при двосторонній подачі в роз'ємних матрицях

Для моделювання розглядали схему (а) і отримані напівфабрикати (б), представлені рис. 5.14.

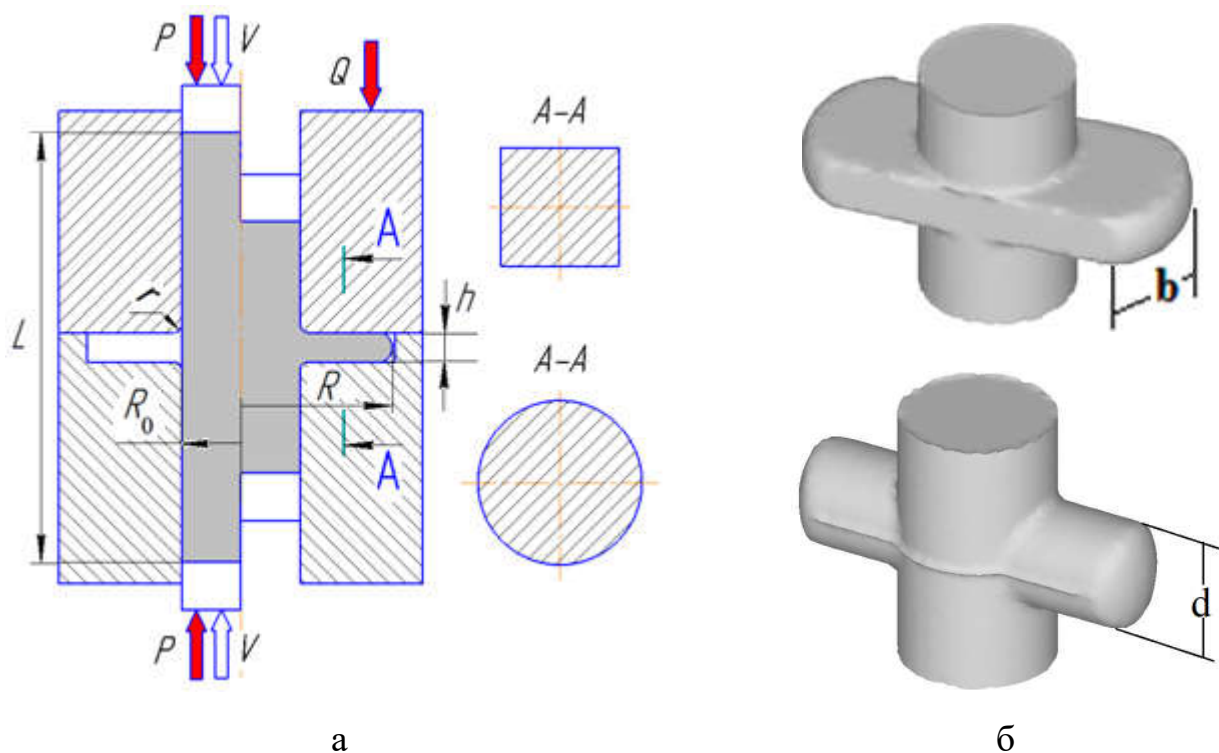


Рисунок 5.14 – Схема процесу бокового видавлювання відростка (а), з різними поперечними перерізами з двосторонньою подачею в роз'ємних матрицях і отримані напівфабрикати (б)

5.5.2.1 Моделювання напруженого і деформованого стану при процесі бокового видавлювання двосторонньою подачею

Результати моделювання процесу, такі, як викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій і напружень представлені на рис. 5.15, 5.16, при однаковому значенні ($h/R_0=0,75$), при різній формі поперечного перерізу, але при однаковій площі поперечного перерізу і при двосторонній подачі. Як видно з рисунків, найбільша інтенсивність деформації та напружень зосереджена в середині осередку деформації процесу. Значення максимальної інтенсивності деформацій і напружень були отримані при відносному проміжному радіусі відростка ($R/R_0=2,4$) які досягають наступних позначок. При відносній висоті приймальні порожнини під відросток прямокутного перерізу $h/R_0=0,75$ – $\varepsilon_i=1,5$; $\sigma_i=135$ МПа, і круглого перерізу $h/R_0=0,75$ – $\varepsilon_i=1,5$; $\sigma_i=135$ МПа.

5.5.2.2 Порівняння силового режиму процесів з різними перерізами відростків при односторонній і двосторонній подачах

На рис. 5.17 досліджена залежність сили від ходу процесу в певному інтервалі значень ($h/R_0=0,75$), відростків з різними поперечними перерізами при двосторонньої подачі. А також було зроблено порівняння силового режиму процесів з різними перерізами відростків при односторонній і двосторонній подачах в цьому ж інтервалі значень ($h/R_0=0,75$). З графіка залежності сили процесу від ходу пуансона (див. рис. 5.17) видно, що для кожного перерізу відбувається збільшення сили до позначки ходу $S=6$ мм, яке досягає $P=125$ кН, а після цього плавно зростає, до позначки $P=145$ кН з ходом $S=20$ мм, для прямокутного перерізу. І для круглого перерізу, відбувається збільшення сили до позначки ходу $S=6$ мм, яке досягає $P=118$ кН, а після цього плавно зростає, до позначки $P=138$ кН з ходом $S=20$ мм. Ґрунтуючись на отриманих даних робимо висновок, що при видавлюванні відростків різної форми, але з однаковою площею перерізу різниця сили становить 6 – 10%.

З графіка залежності сили процесу при односторонній подачі і двосторонньої (при прямокутному перерізі) від ходу пуансона (рис. 5.18) видно,

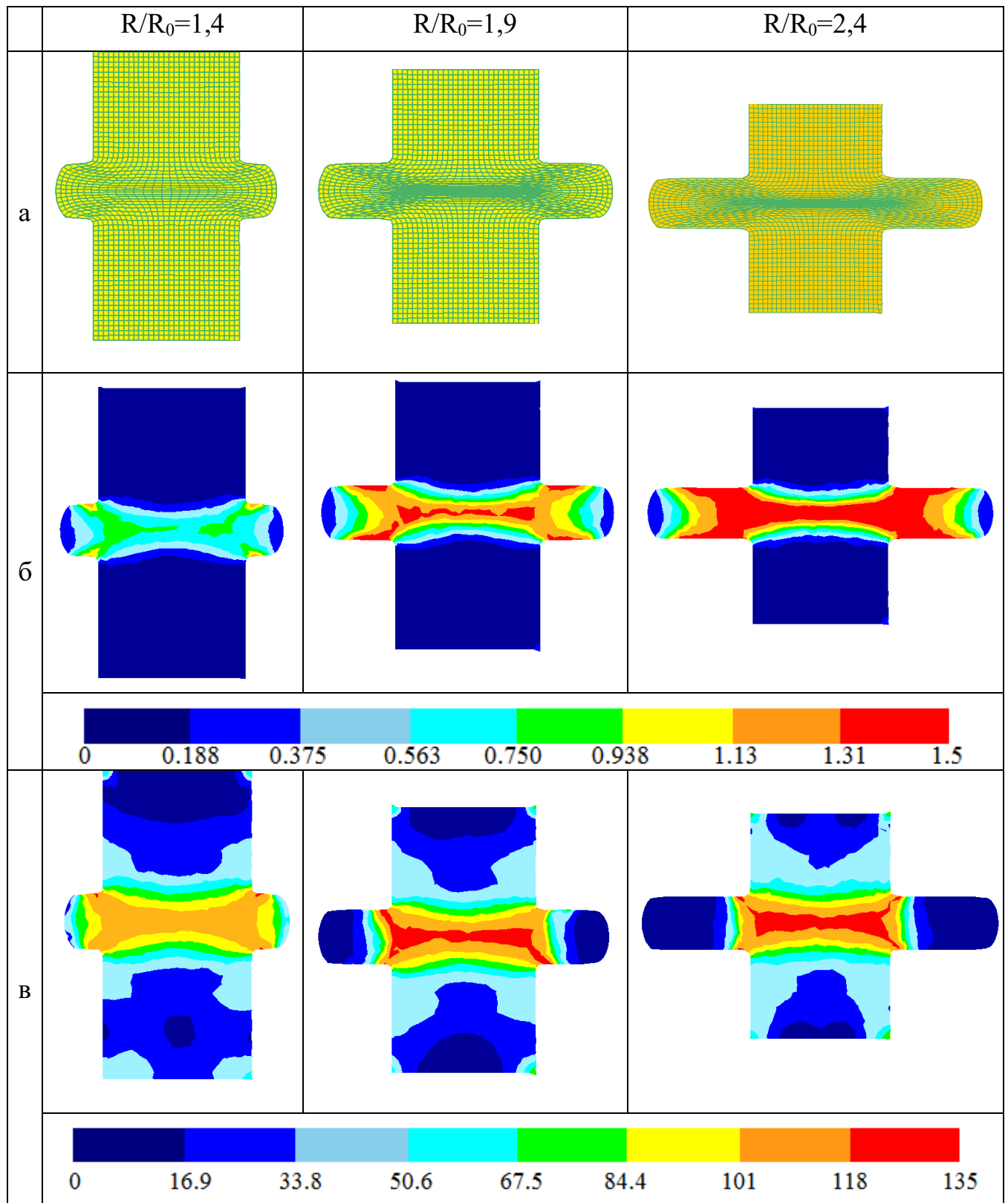


Рисунок 5.15 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні відростка з двосторонньою подачею при $h/R_0=0,75$; $r=1$ мм; $h=11,25$ мм, $b=30$ мм, і $\mu=0,08$

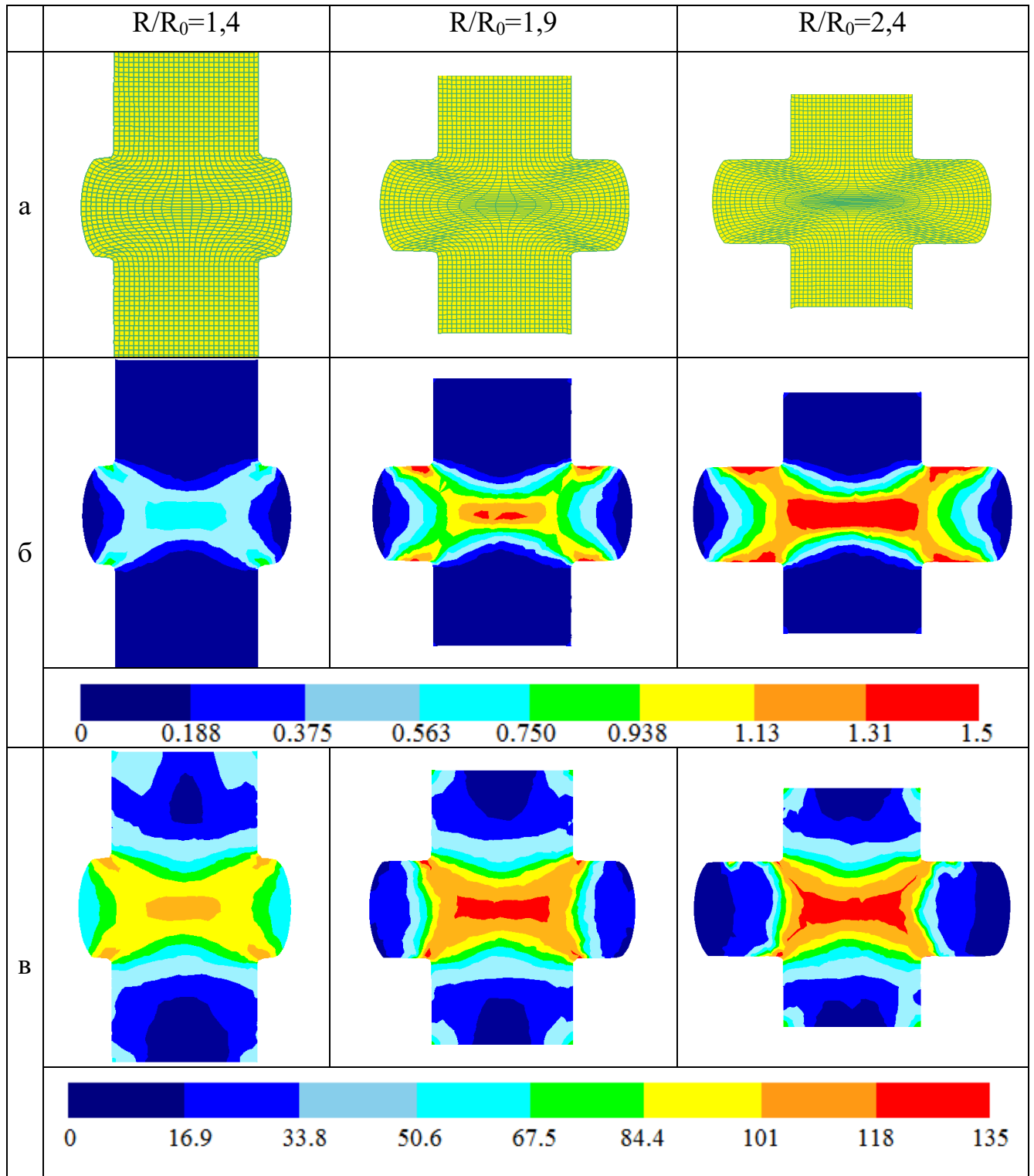


Рисунок 5.16 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні круглого відростка з двосторонньою подачею при $h/R_0=0,75$ для прямокутного перерізу, $r=1$ мм, $R_0=15$ мм, $d=20,74$ мм і $\mu=0,08$

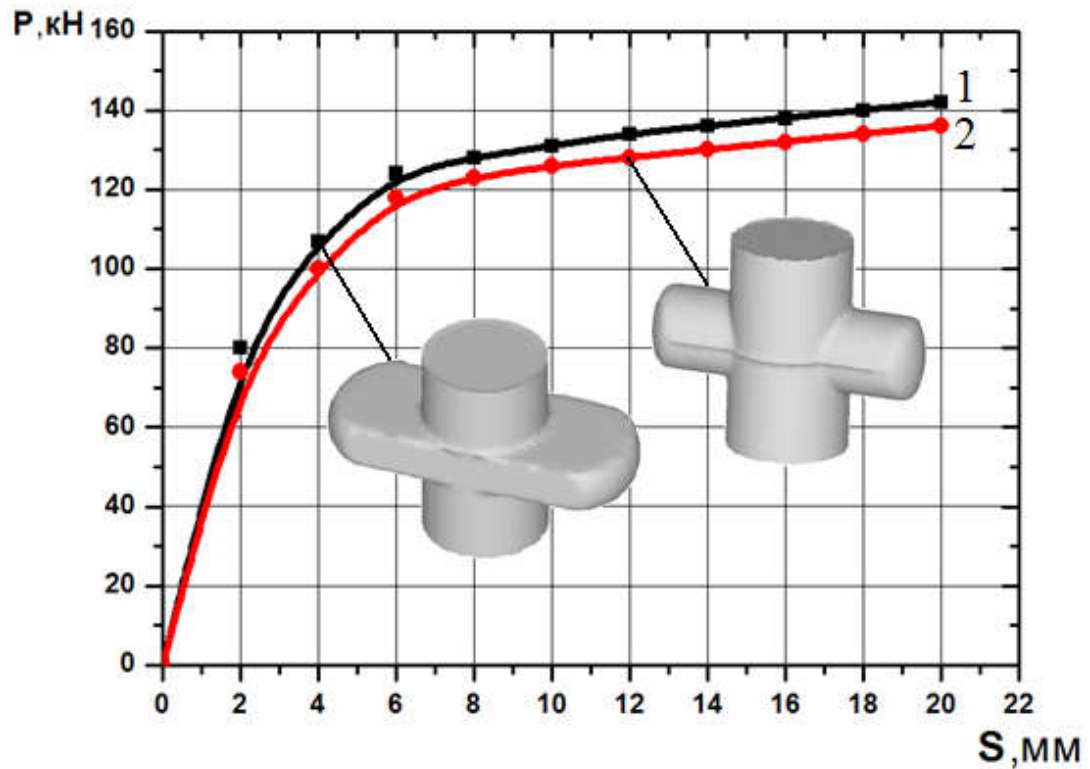


Рисунок 5.17 – Графік залежності сили від ходу процесу: $h/R_0=0,75$
 1 – прямокутного перерізу; $h/R_0=0,75$ 2 – круглого перерізу при двосторонній подачі

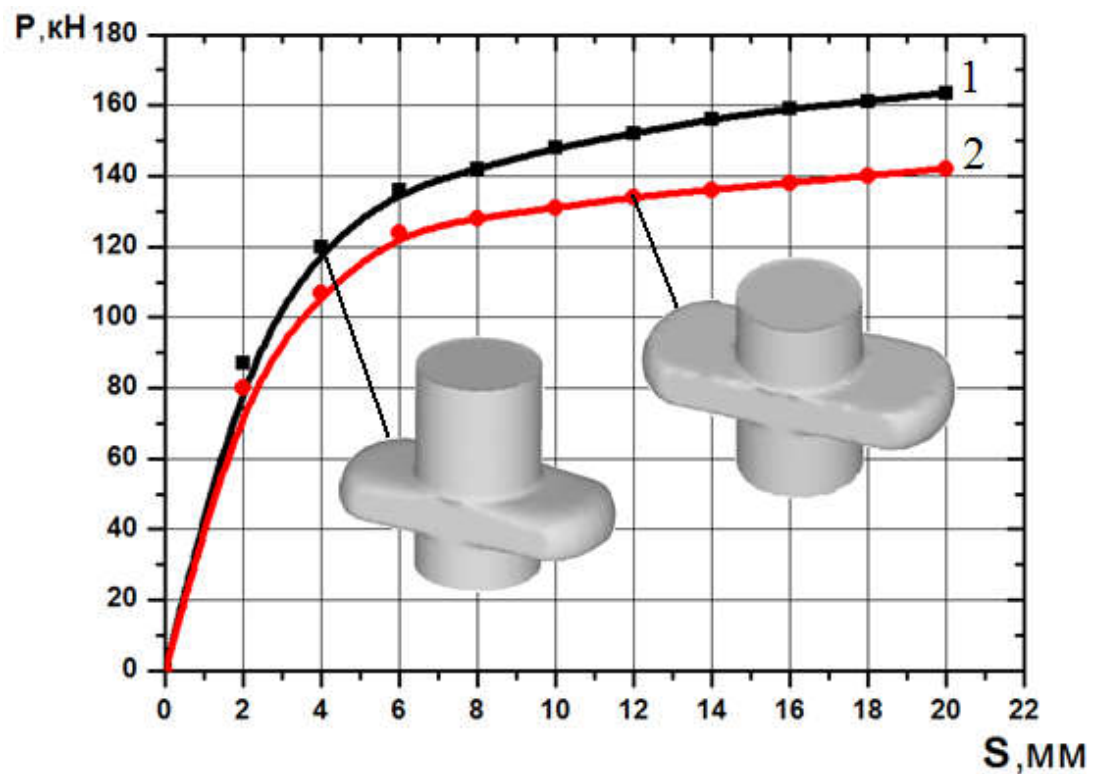


Рисунок 5.18 – Графік залежності сили від ходу процесу: $h/R_0=0,75$
 1 – при односторонній подачі; $h/R_0=0,75$ 2 – при двосторонній подачі

що відбувається збільшення до позначки ходу $S=6$ мм, яке досягає $P=135$ кН, а після цього плавно зростає до позначки $P=165$ кН з ходом $S=20$ мм, для односторонньої подачі. і для двосторонньої подачі відбувається збільшення до позначки ходу $S=6$ мм, яке досягає $P=125$ кН, а після цього плавно зростає до позначки $P=145$ кН з ходом $S=20$ мм. З графіка залежності процесу при односторонній подачі і двосторонній (при круглому перерізі) від ходу пуансона (рис. 5.19) видно, що відбувається збільшення сили до позначки ходу $S=6$ мм, яке досягає $P=115$ кН, а після цього плавно зростає до позначки $P=158$ кН з ходом $S=20$ мм для односторонньої подачі. І для двосторонньої подачі відбувається збільшення сили до позначки ходу $S=6$ мм, яке досягає $P=100$ кН, а після цього плавно зростає до позначки $P=138$ кН з ходом $S=20$ мм.

З огляну на отримані дані робимо висновок, що при видавлюванні відростків однієї форми і при однаковому значенні ($h/R_0=0,75$) односторонньою і двосторонньою подачею, різниця приведенного тиску становить 8 – 12%.

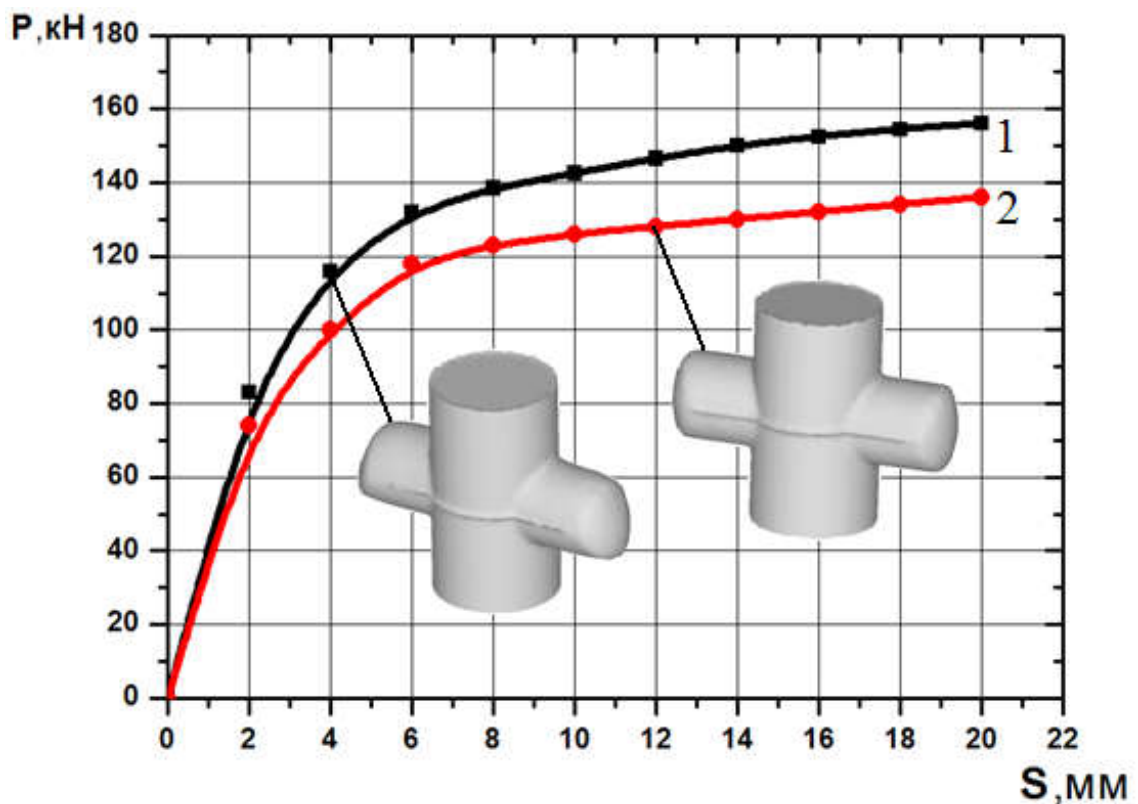


Рисунок 5.19 – Графік залежності сили від ходу процесу: $h/R_0=0,75$ 1 – при односторонній подачі; $h/R_0=0,75$ 2 – при двосторонній подачі

5.5.3 Аналіз процесу формоутворення відростка різної конфігурацією на торці стрижня боковим видавлюванням

Для моделювання розглядали схему (а) і отриманий напівфабрикат (б) представлені на рис. 5.20.

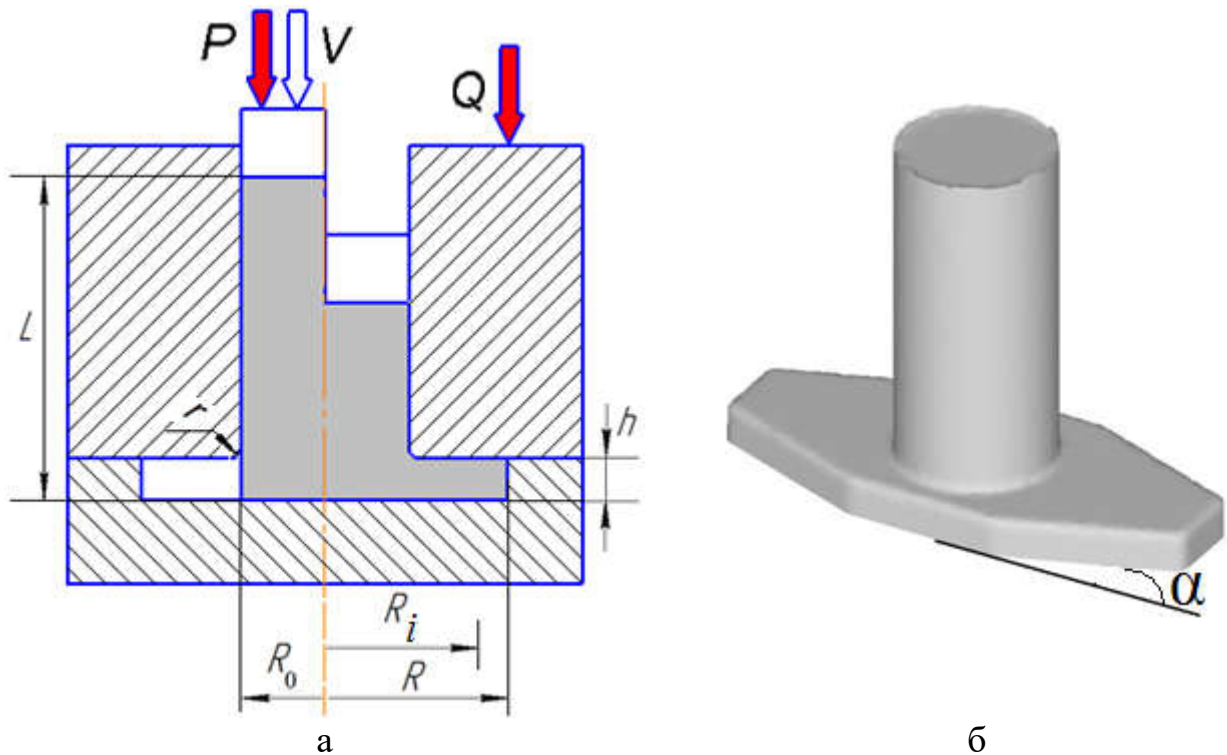


Рисунок 5.20 – Схема процесу бокового видавлювання відростка з різною конфігурацією на торці стрижня (а), в роз'ємних матрицях і отриманий напівфабрикат (б) матеріал АМцМ, $r/R_0=0,135$; $R/R_0=2$, $R_0=15$ мм

Результати моделювання процесу представлені на рис. Д.3...Д.5, при різних кутах ($\alpha=10^\circ$; 15° ; 20°) і при одній відносній висоті відростка ($h/R_0=0,5$). Як видно з рисунків, найбільша інтенсивність деформації та напружень зосереджена в середній частині осередку деформації процесу. При моделюванні процесу бокового видавлювання відростка різної конфігурації на торці стрижня при $h/R_0=0,5$ при різних кутах $\alpha=10^\circ$; 15° ; 20° та $h/R_0=0,75$, $h/R_0=1,0$ при куті $\alpha=20^\circ$ (рис. 5.21, Д.6). найбільша інтенсивність деформації та напружень при відносному радіусі відростків на останньому етапі зосереджена з боків відростків і досягає значень $\varepsilon_i=2,5$; $\sigma_i=135\ldots140$ МПа.

При розгляді впливу конфігурації деталі на силові параметри видавлювання та розкриття матриці (рис. 5.22...5.24) встановлено, що зміна

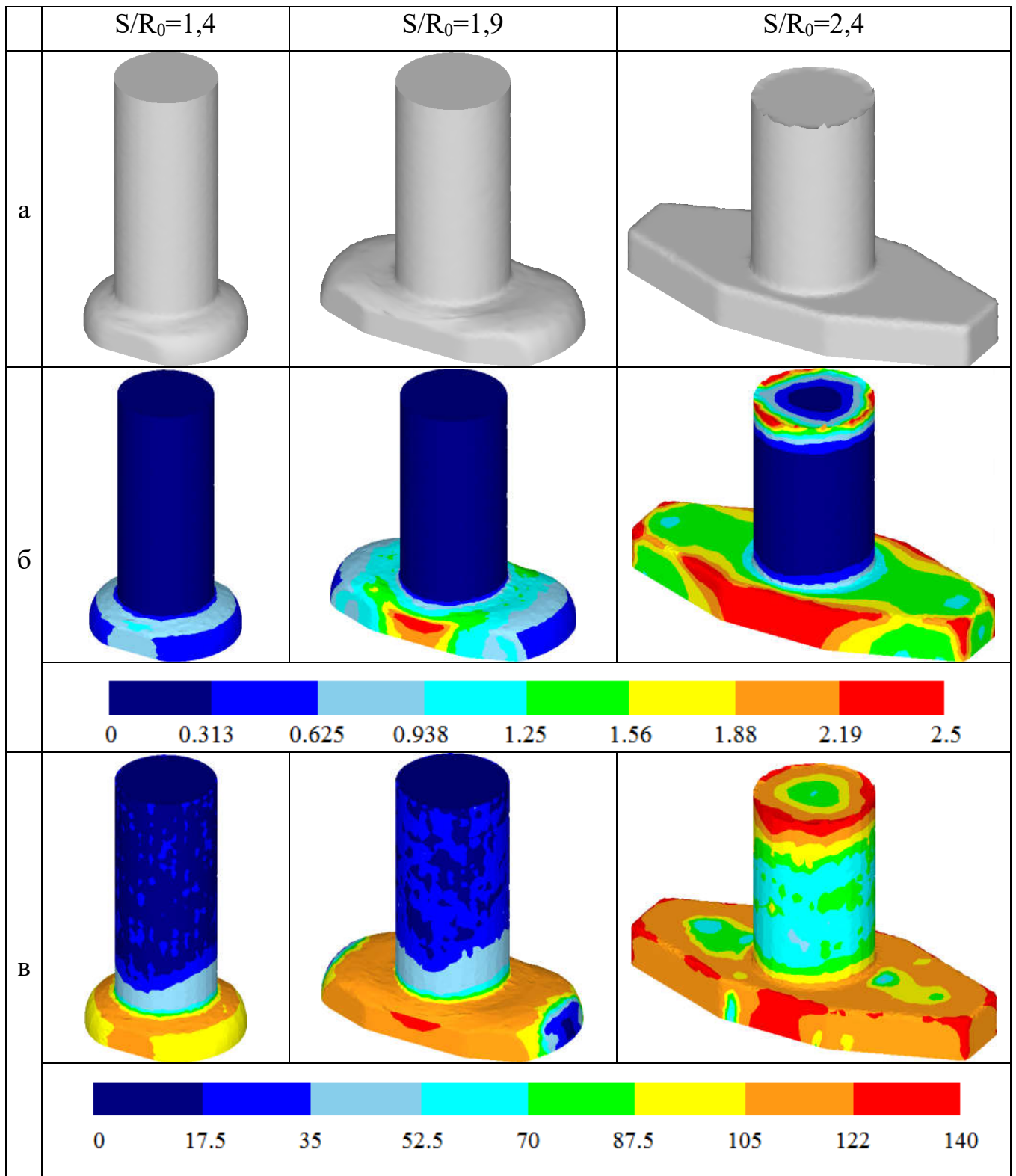
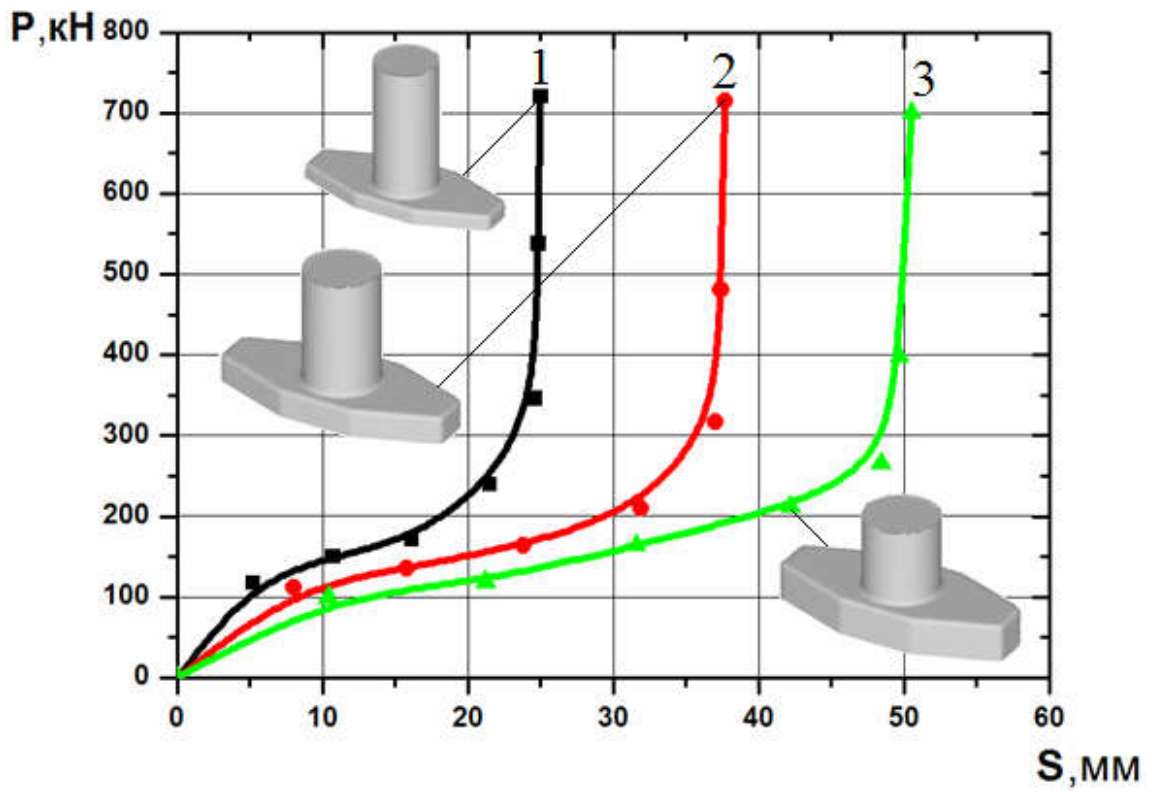
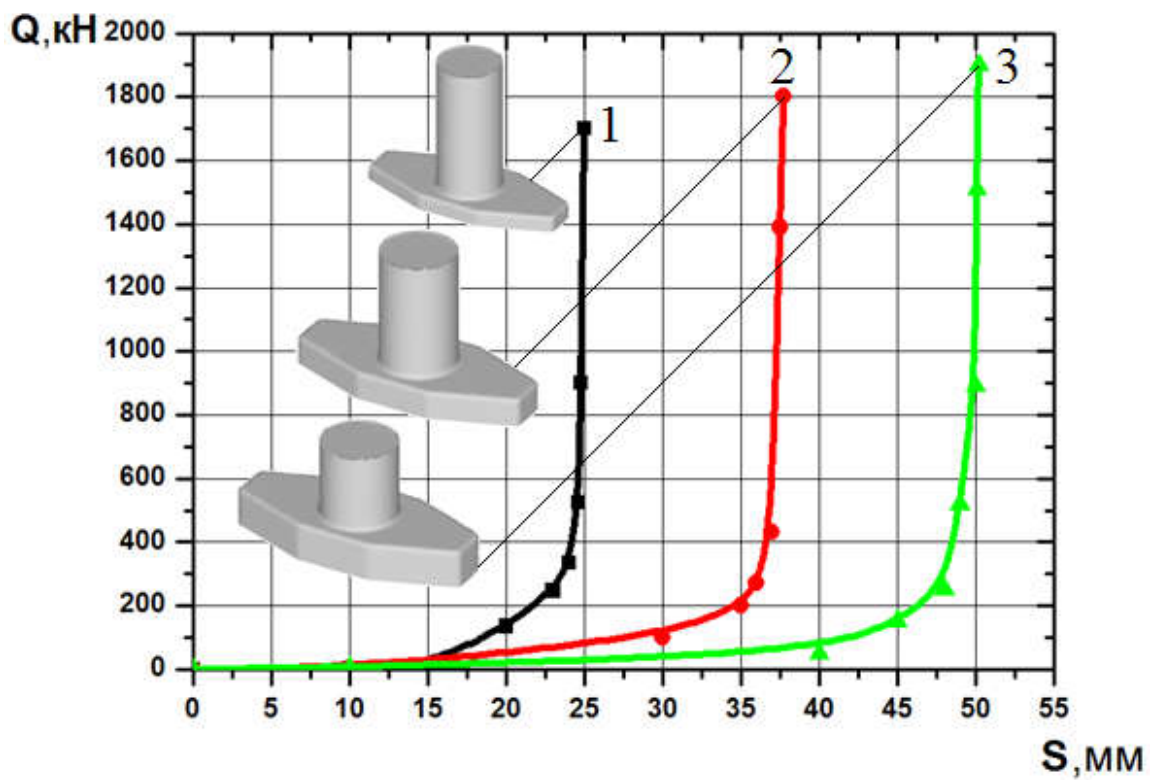


Рисунок 5.21 – Заготовка (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні відростків при $h/R_0=0,75$, $r=1$ мм, $\mu=0,08$ і $\alpha=20^\circ$

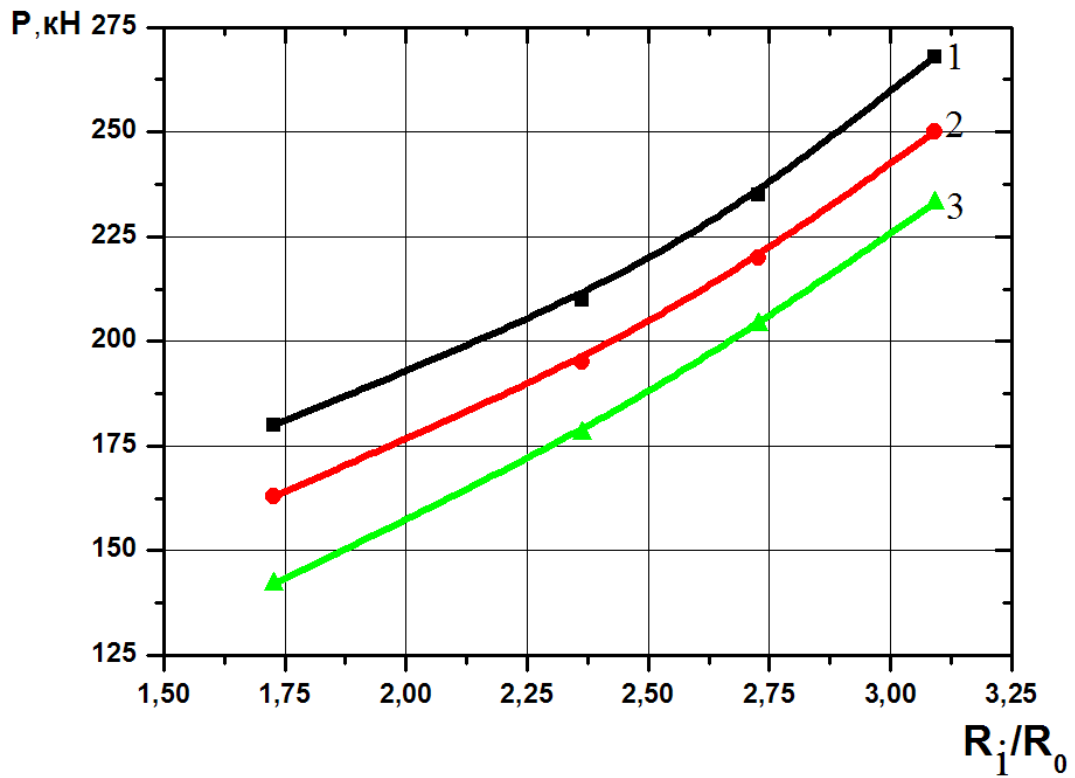


а

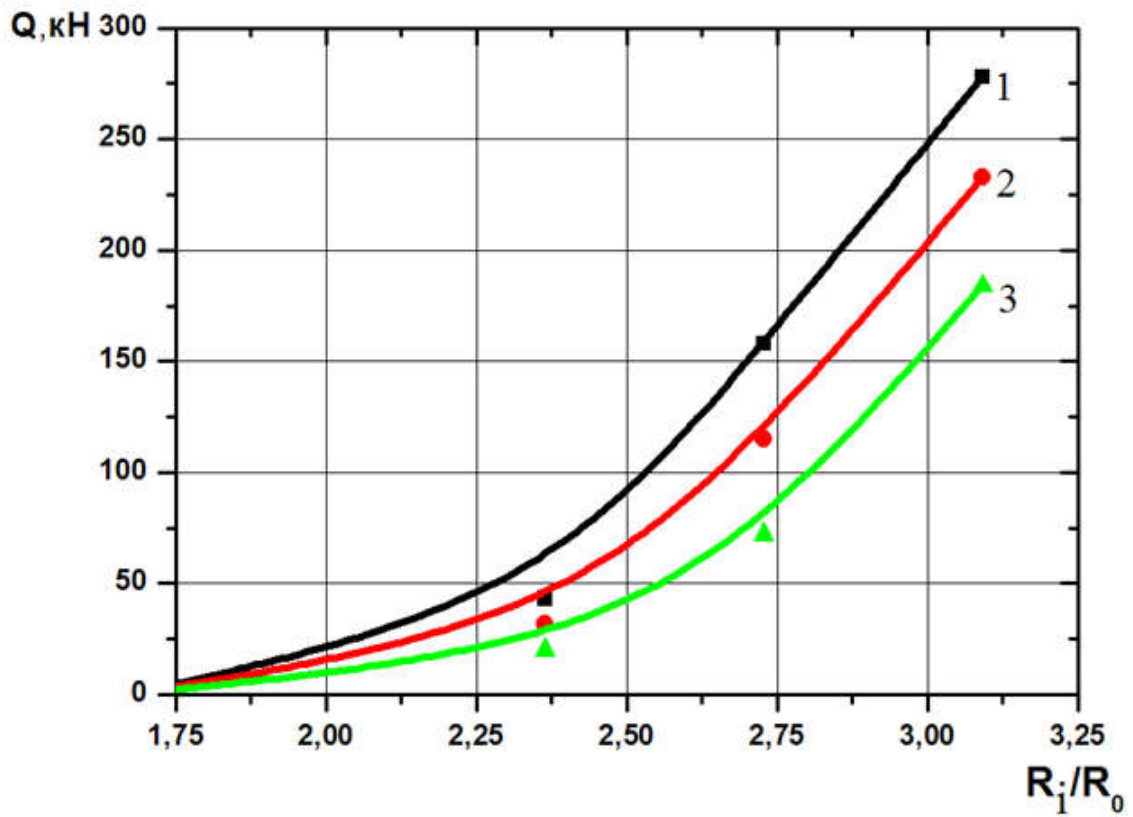


б

Рисунок 5.22 – Зміна сили деформування (а) та розкриття матриці (б) при боковому видавлюванні фасонного відростка по ходу процесу: 1 – $h/R_0=0,5$; 2 – $h/R_0=0,75$; 3 – $h/R_0=1,0$; $\alpha=20^\circ$

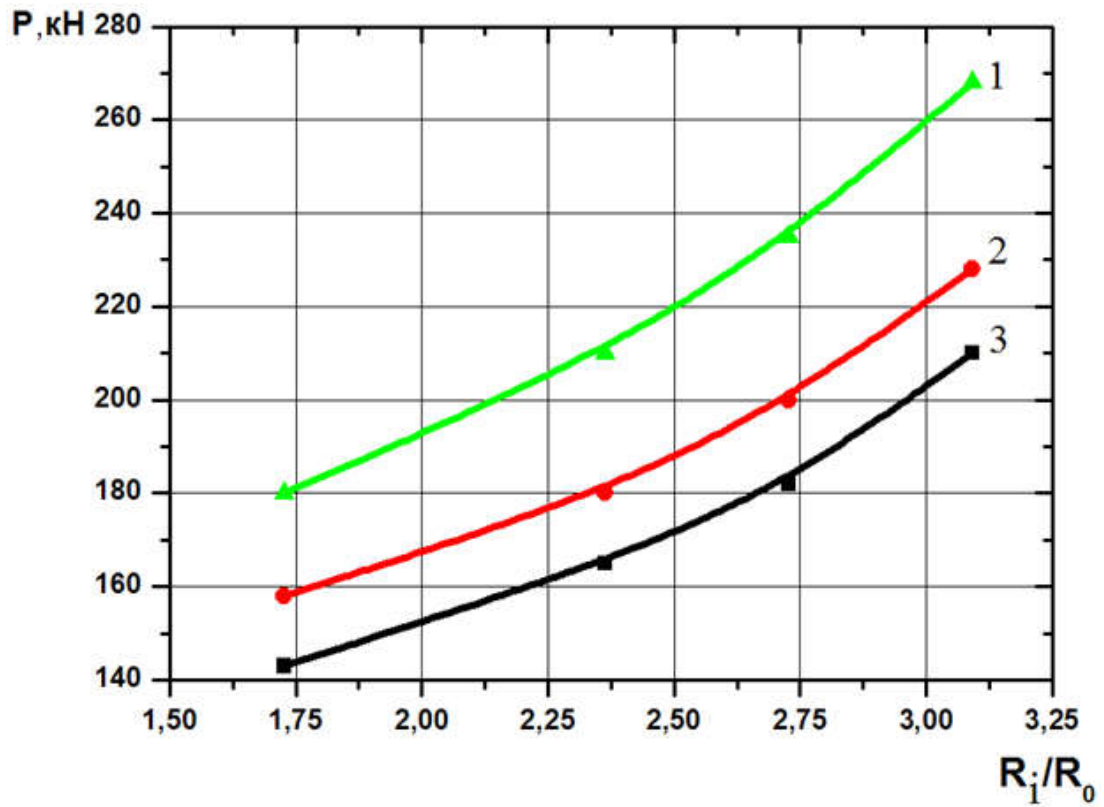


а

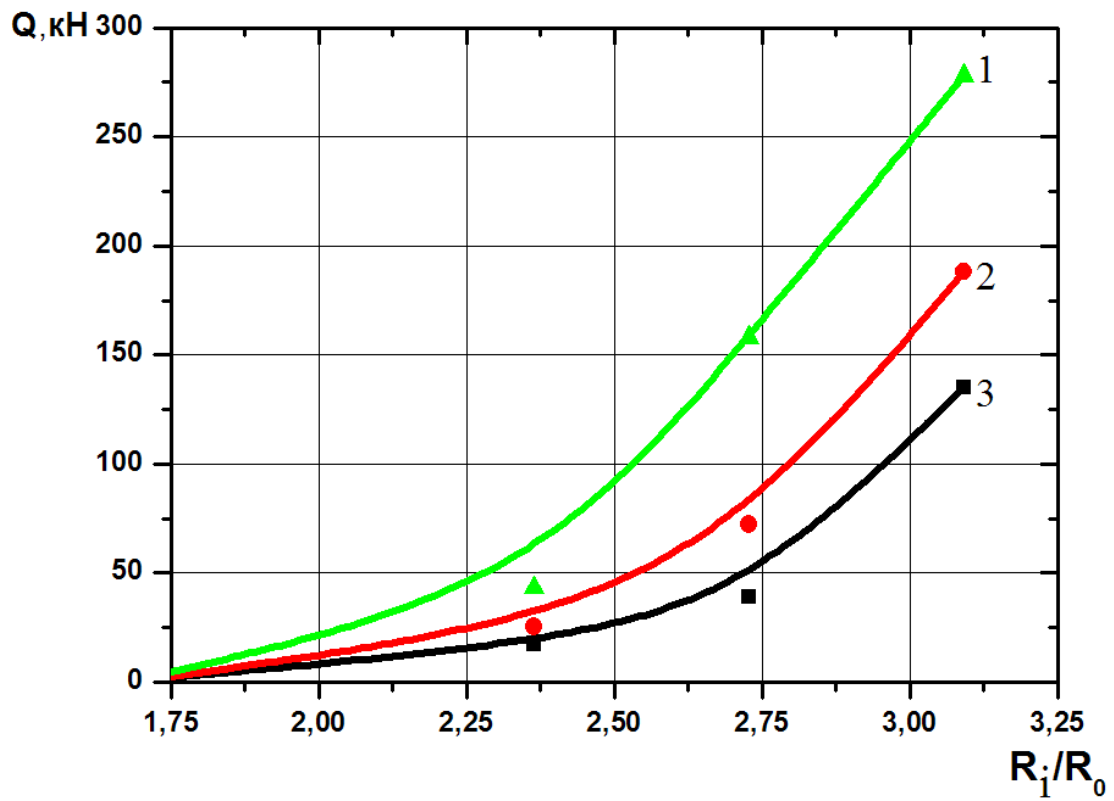


б

Рисунок 5.23 – Зміна сили деформування (а) та розкриття матриці (б) при боковому видавлюванні фасонного відростка від відносної довжини відростка: 1 – $h/R_0=0,5$; 2 – $h/R_0=0,75$; 3 – $h/R_0=1,0$; $\alpha=20^\circ$



а



б

Рисунок 5.24 – Зміна сили деформування (а) та розкриття матриці (б) при боковому видавлюванні фасонного відростка від відносної довжини відростка: 1 – $\alpha=10^\circ$; 2 – $\alpha=15^\circ$; 3 – $\alpha=20^\circ$; $h/R_0=0,5$

кута α в більшу сторону сприяє збільшенню сили процесу внаслідок збільшення осередку деформування та контактної тертя з інструментом. Проте зміна кута утворення фланцю α в меншу сторону сприяє зменшенню сили розкриття матриці.

5.5.4 Аналіз кінематичних характеристик деформування при боковому видавлюванні порожнистого відростку круглого і квадратного перерізу при двосторонньої подачі

Для моделювання розглядали схему (а) і отримані напівфабрикати (б) представлені на рис. 5.25.

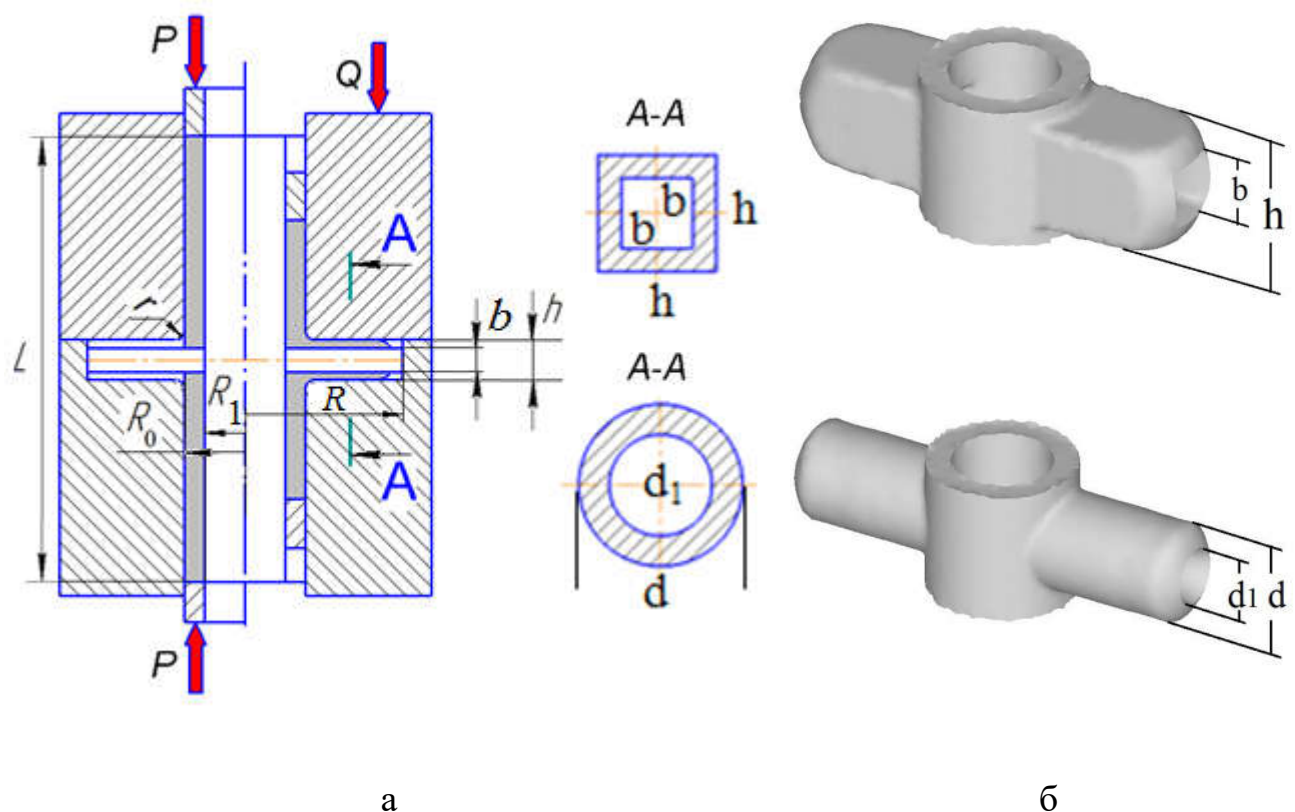


Рисунок 5.25 – Схема процесу бокового видавлювання порожнистого відростка (а), з різними поперечними перерізами з двосторонньою подачею в роз'ємних матрицях і отримані напівфабрикати (б) матеріал АМцМ, $r/R_0=0,135$; $R/R_0=2,35$; $R_0=15$ мм; $d_1=b=10$ мм

На рис. 5.26, 5.27 представлені результати моделювання процесу бокового видавлювання на оправці порожнистого відростка круглого і квадратного перерізу при двосторонній подачі в роз'ємних матрицях при заданих розмірах відростків, такі, як викривлення сітки, розподіл інтенсивності деформацій по осередку деформації і розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перерізі видавлюваної заготовки. Найбільша інтенсивність деформації та напружень зосереджена в середній частині осередку деформації процесу. Значення максимальної інтенсивності деформацій і напружень були отримані при відносному проміжному радіусі відростка $S/R_0=1,2$.

Застосування двосторонньої подачі сприяє рівномірному розподілу напружено-деформованого стану у відростку. Максимальні значення логарифмічного ступеню деформування на перехідних кромках інструменту досягають значень 2,5 і зменшуються зі збільшенням радіусу закруглення матриць, що сприятливо впливає на зменшення концентрацій напружень у місцях можливого руйнування.

При порівнянні сили (рис. 5.28) встановлено, що видавлювання відростка з круглим поперечним перерізом супроводжується більшими енергетичними витратами.

5.5.5 Особливості силового режиму бокового видавлювання ступінчастих відростків

Для аналізу напруженого і деформованого стану при процесі бокового видавлювання стрижня з відростками змінного перерізу (рис. 5.29) проведено моделювання, результати якого показані на рис. 5.30 – 5.31 та Д7...Д10. Найбільша інтенсивність деформації та напружень зосереджена у кромках матриці і у торця відростка більшого діаметра. Значення максимальної інтенсивності деформацій і напружень були отримані при відносному проміжному радіусі відростка ($S/R_0=1,9$) які досягають наступних позначок. При відносній висоті приймальні порожнини під відросток круглого перерізу $d_1/R_0=0,5$ – $\varepsilon_i=2,5$; $\sigma_i=140$ МПа, а при $d_1/R_0=0,75$ – $\varepsilon_i=2,5$; $\sigma_i=135$ МПа, і при значенні $d_1/R_0=1$ – $\varepsilon_i=2,5$; $\sigma_i=140$ МПа.

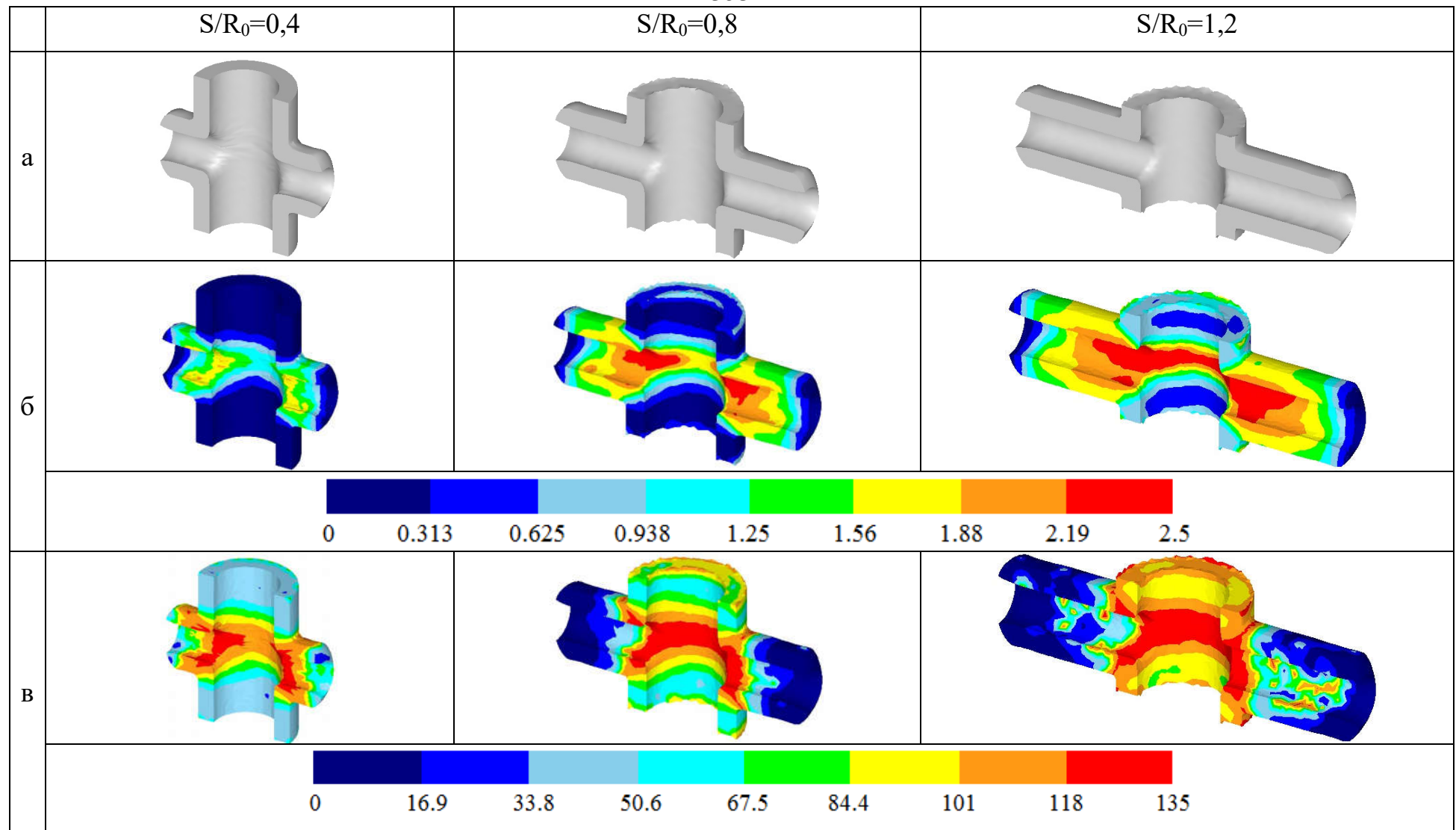


Рисунок 5.26 – Отриманий напівфабрикат (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при порожнистому боковому видавлюванні відростків круглого перерізу при $S/R_0=0,5$; $r=1$ мм, $\mu=0,08$

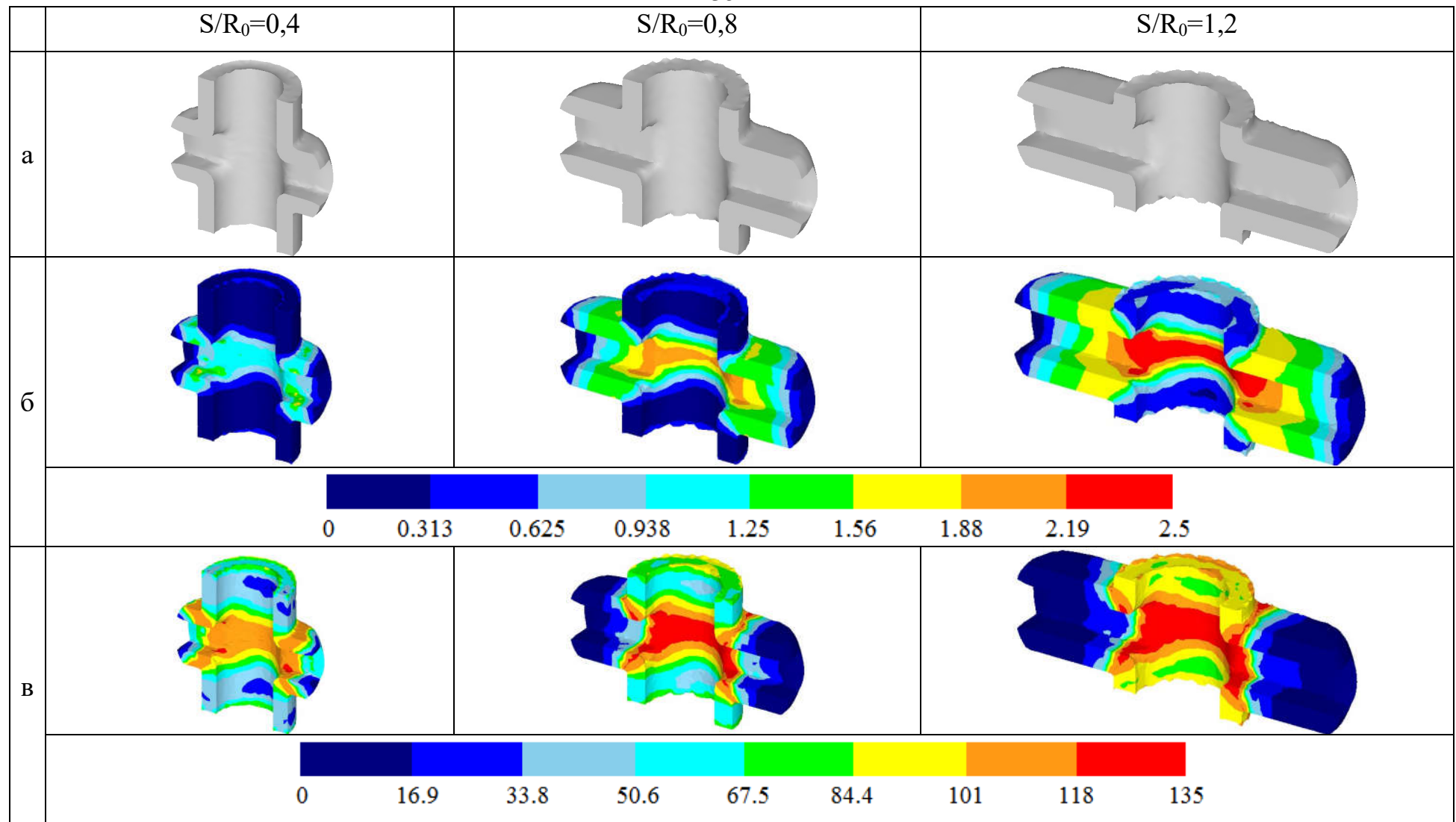


Рисунок 5.27 – Отриманий напівфабрикат (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при порожнистому боковому видавлюванні відростків квадратного перерізу при $S/R_0=0,5$; $r=1$ мм, $\mu=0,08$

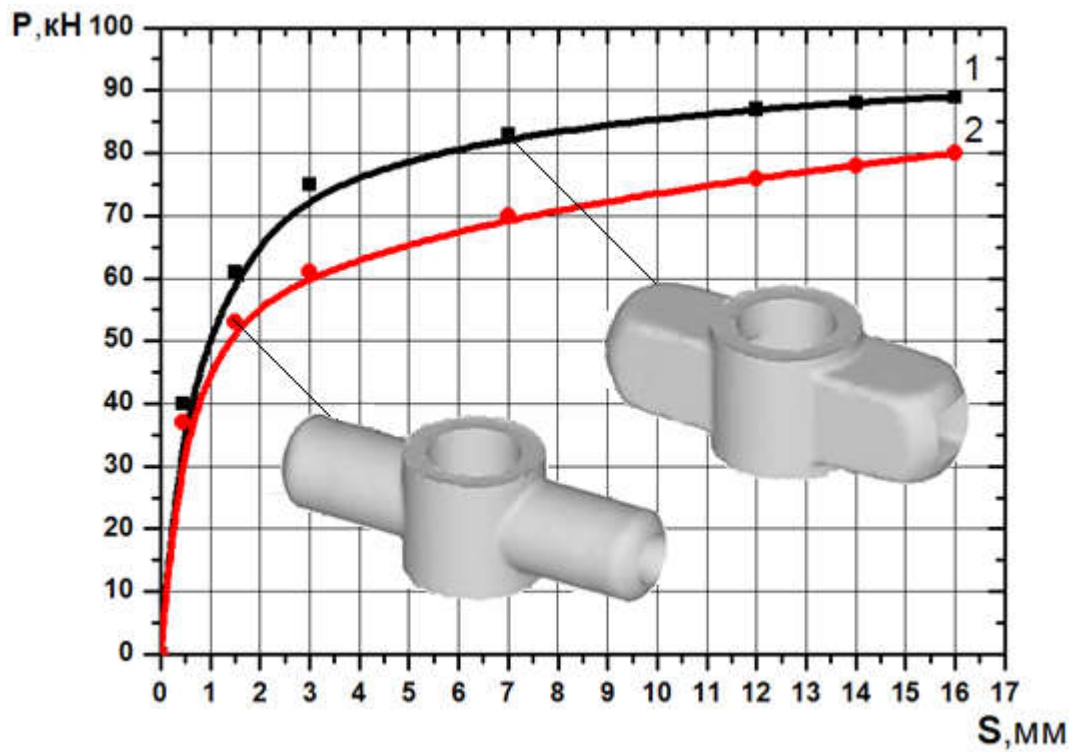


Рисунок 5.28 – Графік залежності сили від ходу процесу $R_1/R_0=0,65$:
 1 – $d_1/d=2,0$; 2 – $h/b=2,0$

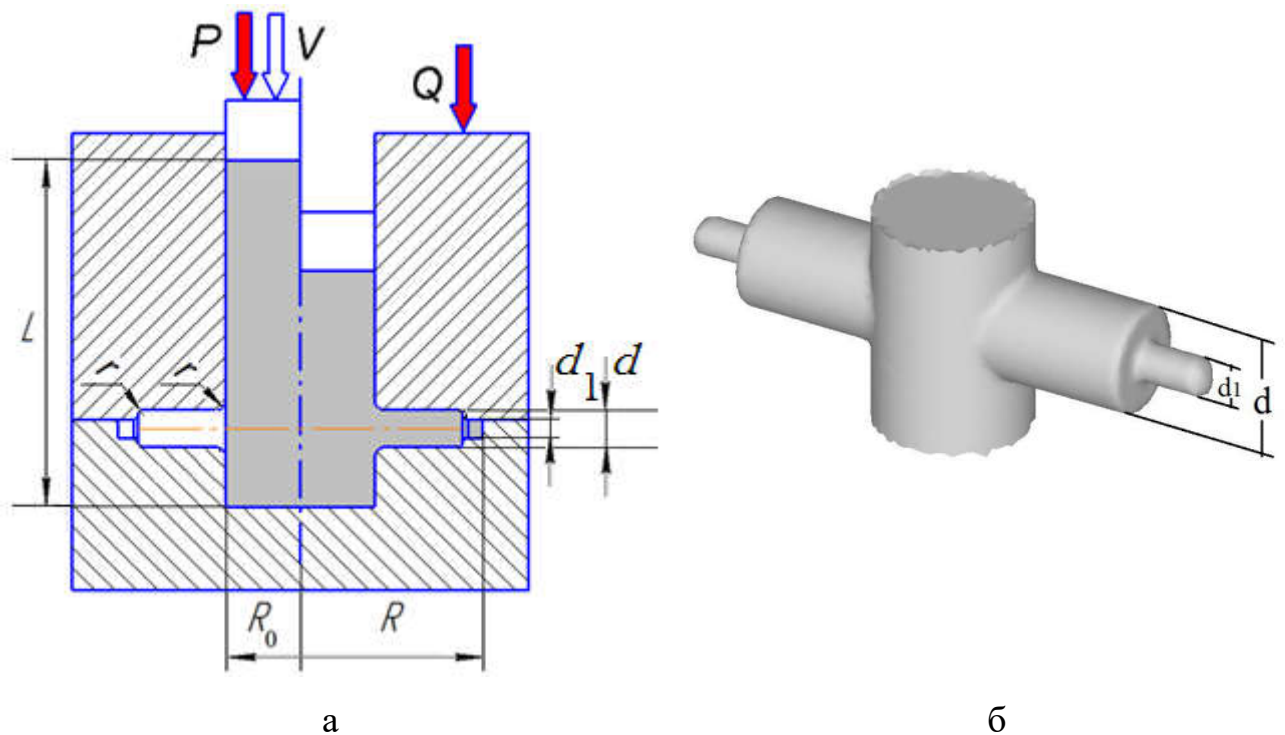


Рисунок 5.29 – Схема процесу бокового видавлювання ступінчастих відростків (а) в роз'ємних матрицях і отриманий напівфабрикат (б); матеріал АМцМ, $r/R_0=0,135$; $R/R_0=2,35$; $R_0=15$ мм

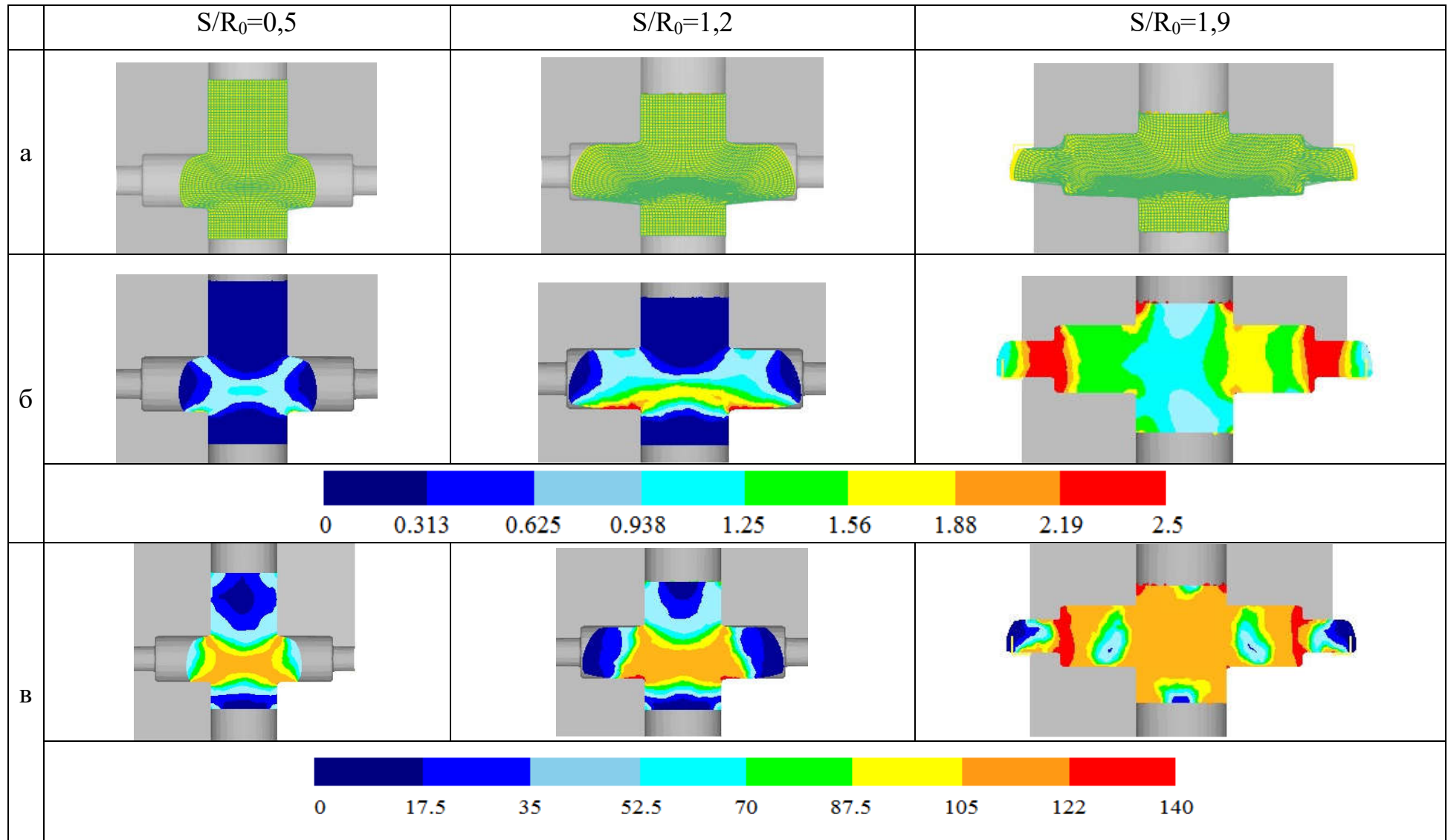
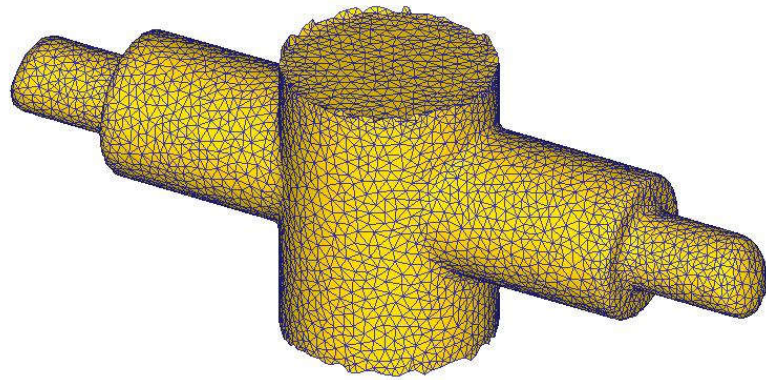
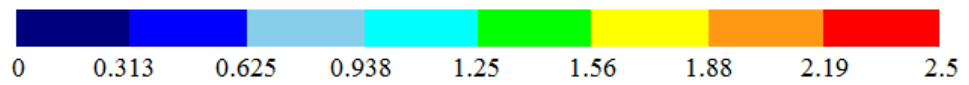
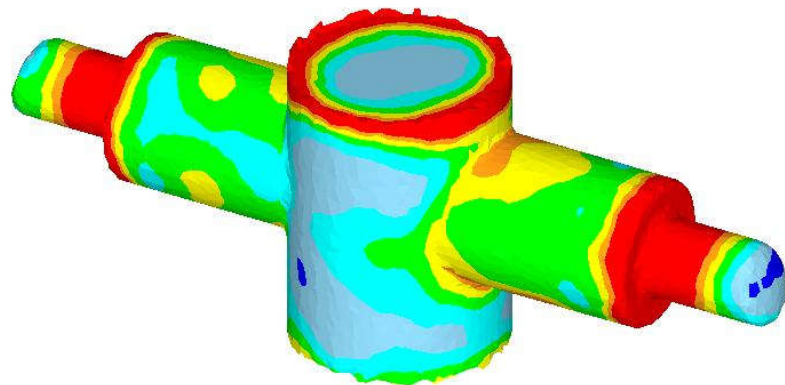


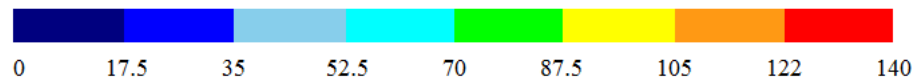
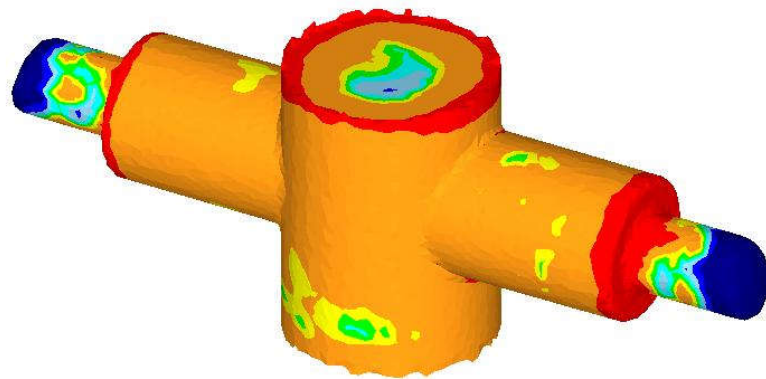
Рисунок 5.30 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні ступінчастих відростків при $d_1/R_0=0,75$; $r=1$ мм; $\mu=0,08$



а)



б)



в)

Рисунок 5.31 – Отримані напівфабрикати в 3D, а – ділильна сітка, б – розподіл інтенсивності деформацій ε_i , в – розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа

Зміна силового режиму видавлювання та розкриття матриці проходить у дві стадії (рис. 5.32). Перша стадія характеризує плавне зростання сили від час формування основного відростка. При формуванні відростка меншого перерізу спостерігається різке зростання сили деформування та розкриття, що пояснюється збільшенням ступеню деформування. Для зменшення перепаду сили варто застосовувати перехідні радіуси та фаски у місці зміни поперечного перерізу відростка.

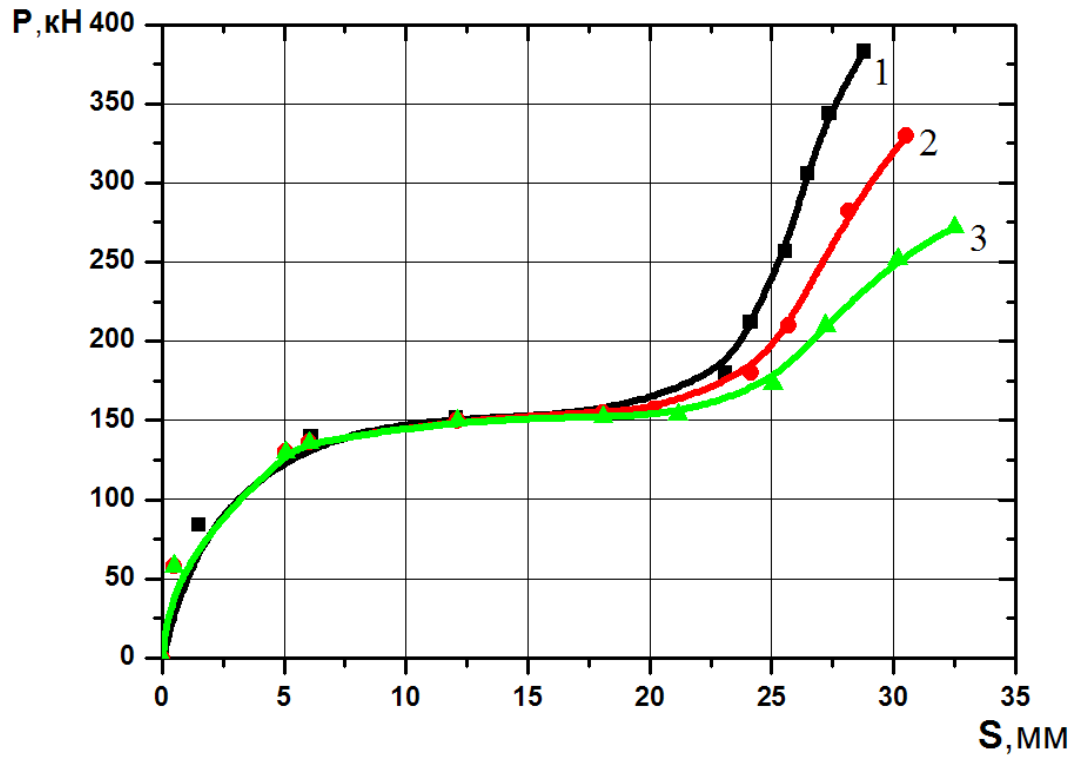
5.6 Дослідження силових режимів процесу бокового видавлювання відростків зі зміщеними осями методом скінченних елементів

Представлені результати моделювання за схемами бокового видавлювання відростків в роз'ємних матрицях, при різному зміщенні осей відростків відповідно центру поковки (рис. 5.33): значення міжосьової відстані відростків X варіювалося в межах від $(0...2)d$.

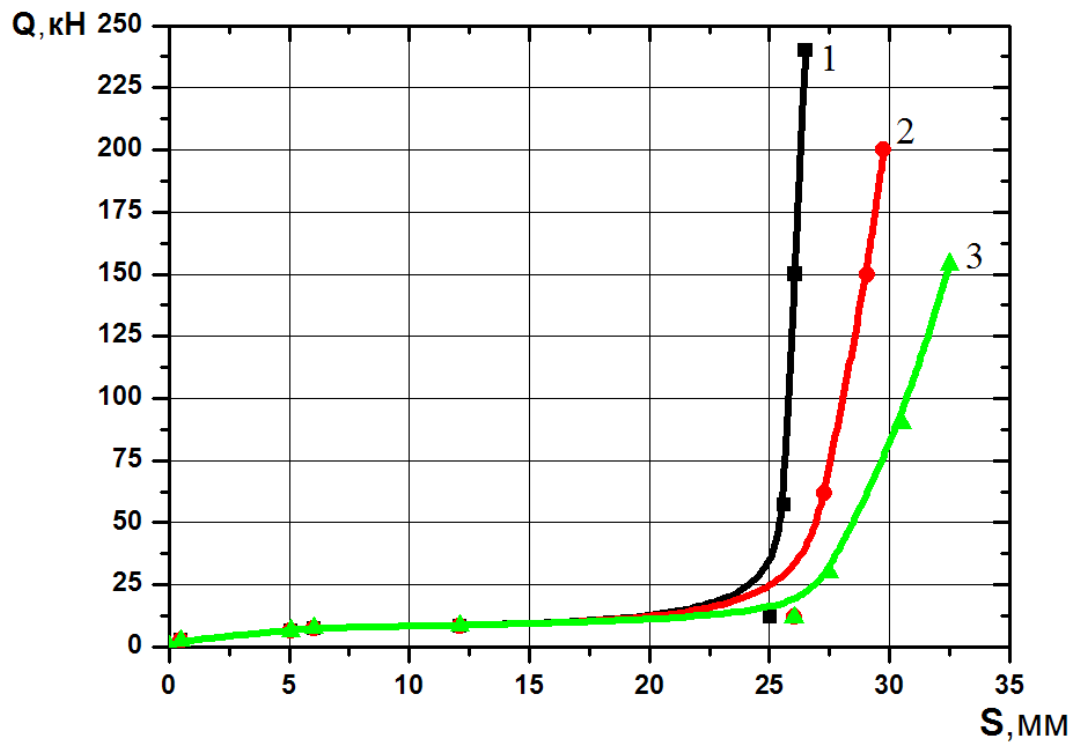
Так само варіювалися значення швидкостей руху верхнього і нижнього деформувальних інструментів. Були досліджені чотири варіанти співвідношення швидкостей деформування $V_2/V_1=0,25; 0,5; 0,75; 1$. В залежності від співвідношення швидкостей деформування можливо отримувати різні варіанти геометрії деталі, з різними внутрішніми структурами і відхиленнями від еталонної форми деталі.

5.6.1 Моделювання силового режиму

В результаті моделювання визначено силовий режим процесу бокового видавлювання. Графік зміни максимальної сили процесу в залежності від параметра $X/2R_0$ представлений на рис. 5.34. Як видно з графіка, при збільшенні параметра $X/2R_0$, сила процесу зростає фактично лінійно, до значення $X/2R_0=1$. При подальшому збільшенні даний параметр сили залишається незмінним, і навіть трохи знижується, внаслідок того, що



а



б

Рисунок 5.32 – Графік залежності сили процесу (а), і розкриття матриці від ходу процесу при різних значеннях d/R_0 : $d/R_0=1,5$; 1 – $d_1/R_0=0,5$; 2 – $d_1/R_0=0,75$; 3 – $d_1/R_0=1,0$

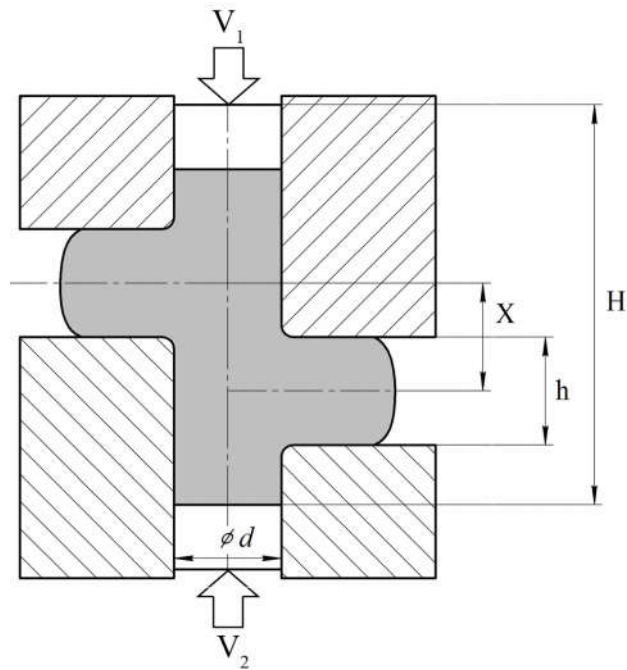


Рисунок 5.33 – Загальна схема процесу бокового видавлювання, матеріал АД31, $d=2R_0$, $h/2R_0=1,0$; $r/2R_0=0,1$; $R_0=14$ мм

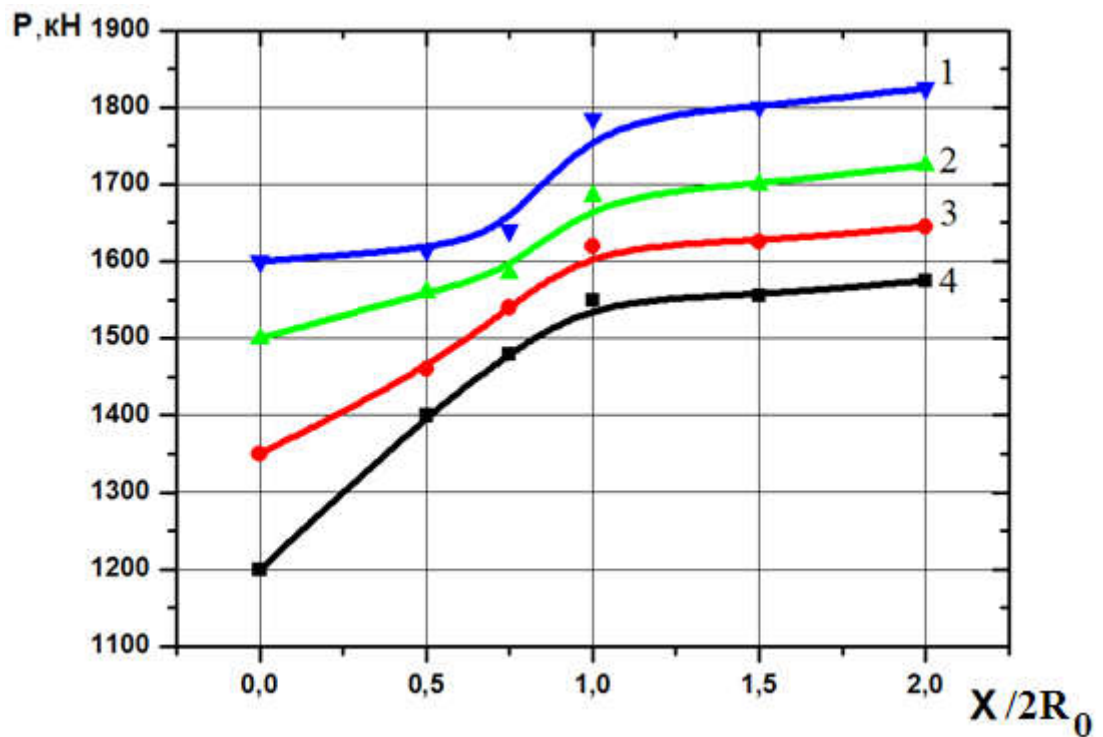


Рисунок 5.34 – Графік залежності сили видавлювання від значення $X/2R_0$ при різних значеннях V_2/V_1 : $V_2/V_1=0,25$ (1), $V_2/V_1=0,56$ (2), $V_2/V_1=0,75$ (3), $V_2/V_1=1$ (4)

осередок деформації розділяється на два незалежних осередки деформації, з яких метал тече в бокові відростки, що і є причиною зниження сили. Між осередками деформації знаходиться застійна зона, розмір якої ніяк не впливає на силу процесу. Таким чином, можемо зробити висновок про те, що при збільшенні параметру $X/2R_0$ сила процесу буде залишатися незмінною, що дозволяє отримувати ще більш складні деталі з відростками на різних рівнях на одному і тому ж обладнанні.

5.6.2 Моделювання напружено-деформованого стану

Пакет DEFORM 3D дозволяє визначати деформований стан при видавлюванні. На рис. 5.35, Д.11, Д.12 та Д.13 представлені картини спотворення ділильної сітки при боковому видавлюванні і розподіл інтенсивності деформацій по перерізу поковки.

Як видно з рисунків, осередок деформації істотно змінює свою форму при зміні параметра $X/2R_0$. Так, при $X/2R_0=0$ осередок деформації є два трикутника, що стикаються один з одним вершинами. У міру збільшення параметра $X/2R_0$, осередок деформації розтягується по вертикалі, набуваючи все більш складну форму. При $X/2R_0=1$ і при $X/2R_0=2$ осередок деформації розділяється на два незалежних осередка. Перебіг металу в верхньому осередку відбувається за рахунок верхнього пуансона, у нижньому – за рахунок нижнього. Між осередками утворюється статична зона, в якій, метал піддається двосторонньому видавлюванню.

При збільшенні параметра $X/2R_0$ також збільшується дефект на торці бокового відростка. Так, при $X/2R_0=0$, торець відростка має симетричну сферичну форму. При збільшенні даного параметра торець набуває все більш незграбну форму, що може стати причиною збільшення витрати металу і спотворення форми поковки.

Варто відзначити, що при значенні параметра $X/2R_0=2$ осередок деформації істотно звужується і стає фактично поверхнею ковзання для

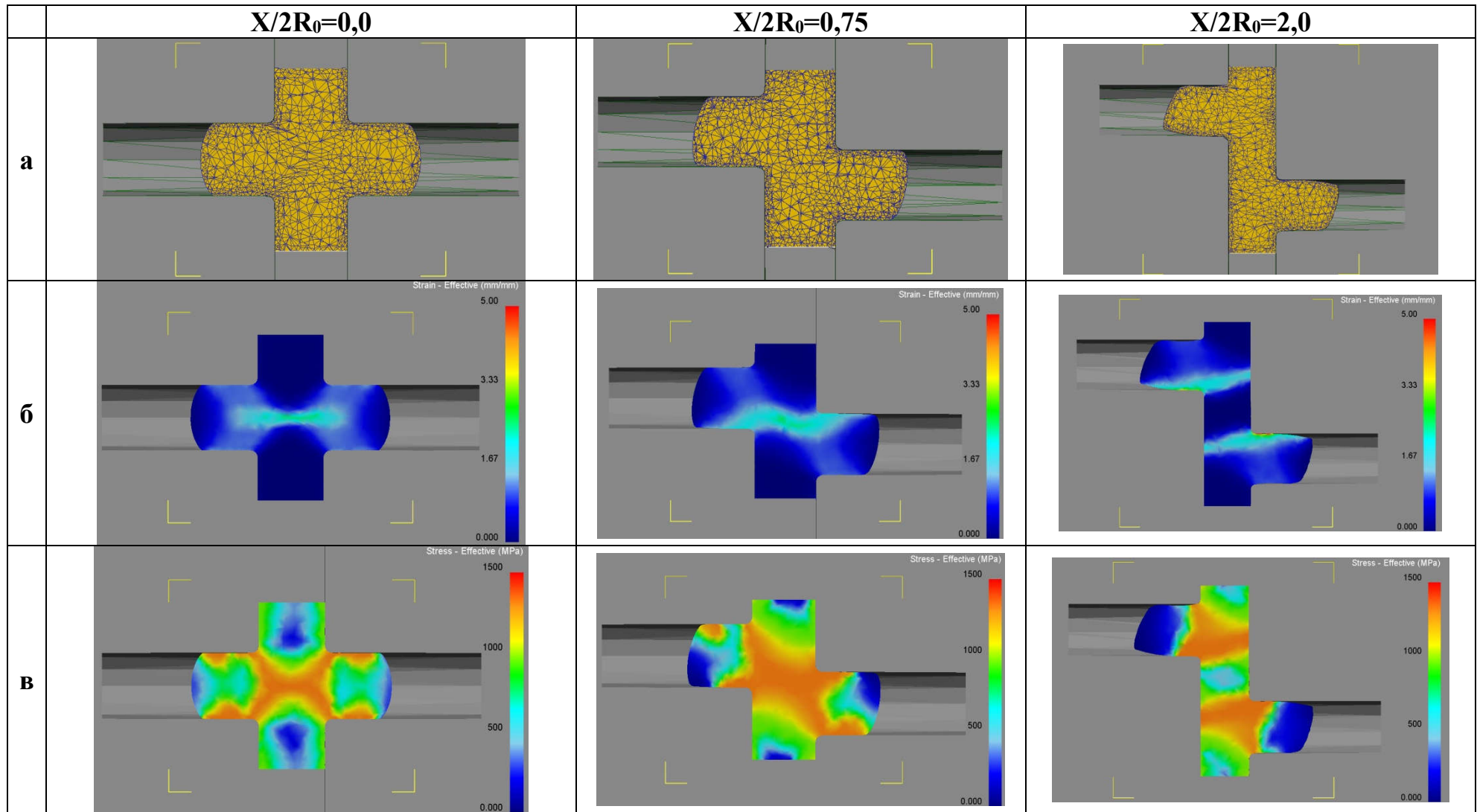


Рисунок 5.35 – Моделювання процесу бокового видавлювання при $V_2/V_1=1$: викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в)

металу, що тече в боковий відросток. При цьому на межах контакт металу з інструментом з'являється зона дуже інтенсивної деформації, в той час, як при інших значеннях даного параметра цього не спостерігалось. Максимальне значення інтенсивності деформацій знаходиться в межах 2,5.

Розподіл напружень по перерізу поковки має симетричну, хрестоподібну форму. Максимальні значення напружень спостерігаються в центральній частині поковки і відводами до кромek інструменту і вздовж порожнин відростків. Основна частина поковки відчуває середні напруження, що сягають до 850 МПа. Найменші значення напружень спостерігаються в центральній частині стрижня поковки, поблизу контакту її з інструментом і на торцях відростків поковки.

Зі збільшенням параметра $X/2R_0$ осередок деформації зазнає суттєвої формозміни. Він розтягується, і суттєво збільшується центральна зона максимальних напружень. Уже при $X/2R_0=1$ осередок максимальних напружень подібний ромбу і прагне до поділу. При $X/2R_0=2$ спостерігається поділ осередка максимальних напружень на два, по формі подібних, трикутника. В цьому випадку стрижнева частина поковки піддається впливу середніх напружень, разом з тим напружено - деформований стан в торцевих частинах відростків знижується практично до нуля.

Так само в міру збільшення міжосьової відстані відростків центральна зона мінімальних деформацій, зосереджена в стрижневий частини поковки, зменшується, і прагне до межі контакту поковки і інструменту, що сприяє кращому опрацюванню структури центральної зони поковки.

Максимальні напруження в поковці знаходяться в межах 1250 МПа, а середні напруження становлять близько 900 МПа

Найбільш небезпечною ділянкою, з точки зору руйнування оснащення, є кромка, на межі з'єднання стрижневої частини і бокового відростка.

Можемо зробити висновок про те, що при рівній швидкості руху верхнього і нижнього інструменту ($V_2/V_1=1$) – довжина відростків по обидва боки однакова. Єдиною зміною є невелике спотворення форми торця поковки

при збільшенні параметра $X/2R_0$. В іншому ж кування є симетричним відносно горизонтальної площини роз'єму півматриць.

Для більшої наочності, всі деталі, отримані за допомогою моделювання в DEFORM 3D, представлені на рис. 5.36. По осі абсцис можемо спостерігати зміну співвідношення швидкостей руху головного інструмента в діапазоні $V_2/V_1=0,25\dots1,0$. По осі ординат можемо спостерігати зміну параметра $X/2R_0$, коефіцієнта міжосьової відстані бокових відростків. Цей параметр варіюється в межах $X/2R_0=0\dots2$. Така картина дає наочне уявлення про те, як змінюються геометричні розміри поковки, дефекти торця поковки, вигин відростка, довжина відростка, при зміні того чи іншого параметра схеми деформування. Це дозволяє вибрати потрібну схему деформування для необхідної конфігурації деталі.

5.7 Формоутворення та силовий режим процесу бокового видавлювання відростків типу «пера»

За допомогою програмного забезпечення DeForm 3D був досліджений процес бокового видавлювання деталі «хвостовик» з різною кількістю пер (рис. 5.37), а саме з шістьма, чотирма, трьома і двома. За допомогою даної програми було визначено накопичений ступінь деформації, сила процесу на різних стадіях і напруження, що виникають в заготовці під час деформування.

Отримання боковим видавлювання деталей з перами характеризується кількома стадіями. Метал на початковій стадії тече одночасно в бокові відростки в прямому і зворотному напрямку, утворюючи внутрішню порожнину циліндра. Після утворення внутрішніх порожнин метал тече тільки в поперечні порожнини. Накопичений ступінь деформації є найбільшим в місцях переходу від циліндричної частини в область поперечних відростків, а також на площині самого пера при штампуванні порожнистих деталей з відростками.

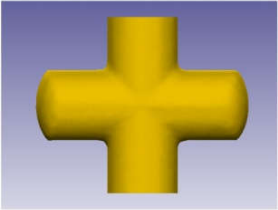
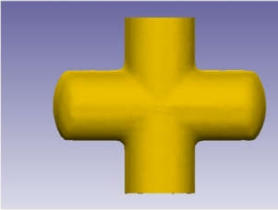
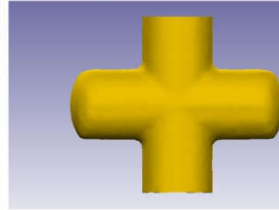
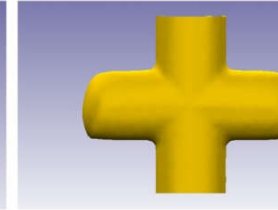
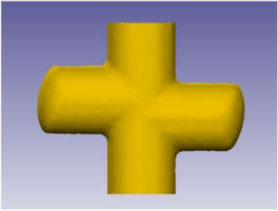
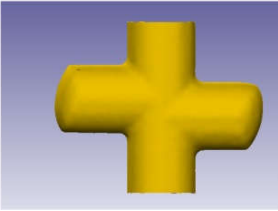
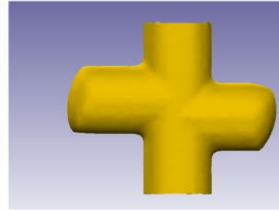
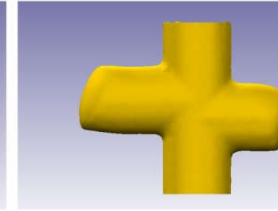
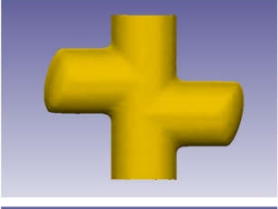
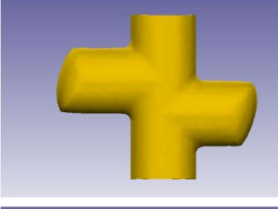
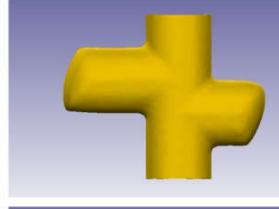
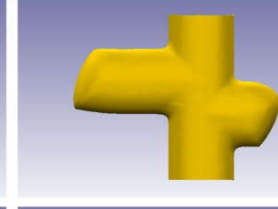
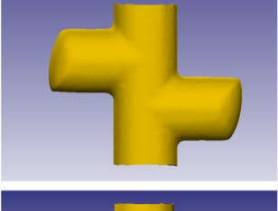
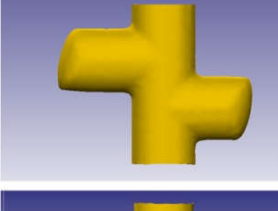
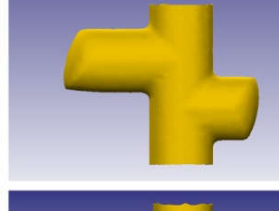
	$V_2/V_1=1$	$V_2/V_1=0,75$	$V_2/V_1=0,5$	$V_2/V_1=0,25$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Рисунок 5.36 – Деталі, отримані моделюванням в DEFORM 3D:
 $X/2R_0=0$ (1), $X/2R_0=0,25$ (2), $X/2R_0=0,5$ (3), $X/2R_0=0,75$ (4), $X/2R_0=1,0$ (5),
 $X/2R_0=2,0$ (6),

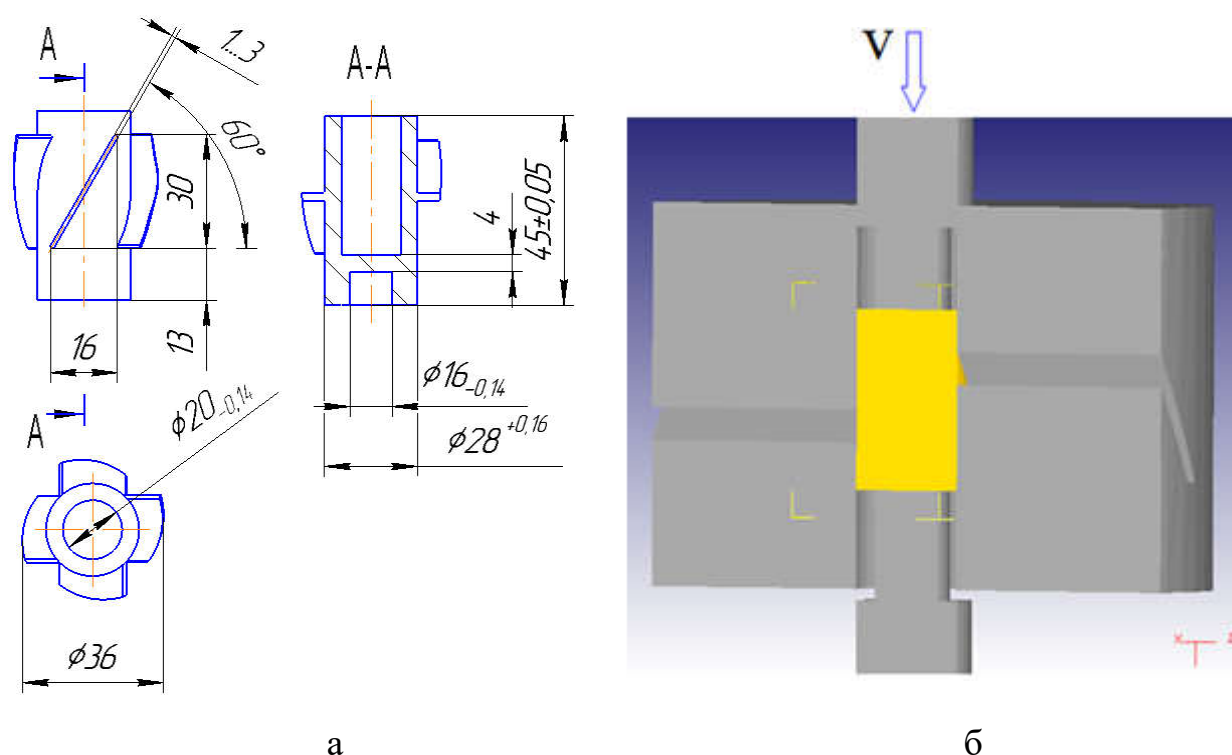


Рисунок 5.37 – Схема (а) та модель (б) отримання деталі з боковими елементами типу «пера»

Розподіл напружень на поверхні деталей в процесі деформування (рис. 5.38, Д.16, Д.17 та Д.18) показує, що максимальні напруження виникають в місцях переходу з циліндричної частини в поперечні відростки (пера).

Як видно з результатів розрахунку, максимальні напруження в 176 МПа виникають в деталі з двома перами, а максимальні напруження в шестиперевій деталі складають 163 МПа. Накопичений ступінь деформації буде найбільшим в місцях переходу від циліндричної частини в область поперечних відростків, а також на площині самого пера при штампуванні порожнистих деталей з відростками. Максимальна деформація виникає в початковий період заповнення поперечних порожнин, потім знижується в процесі видавлювання.

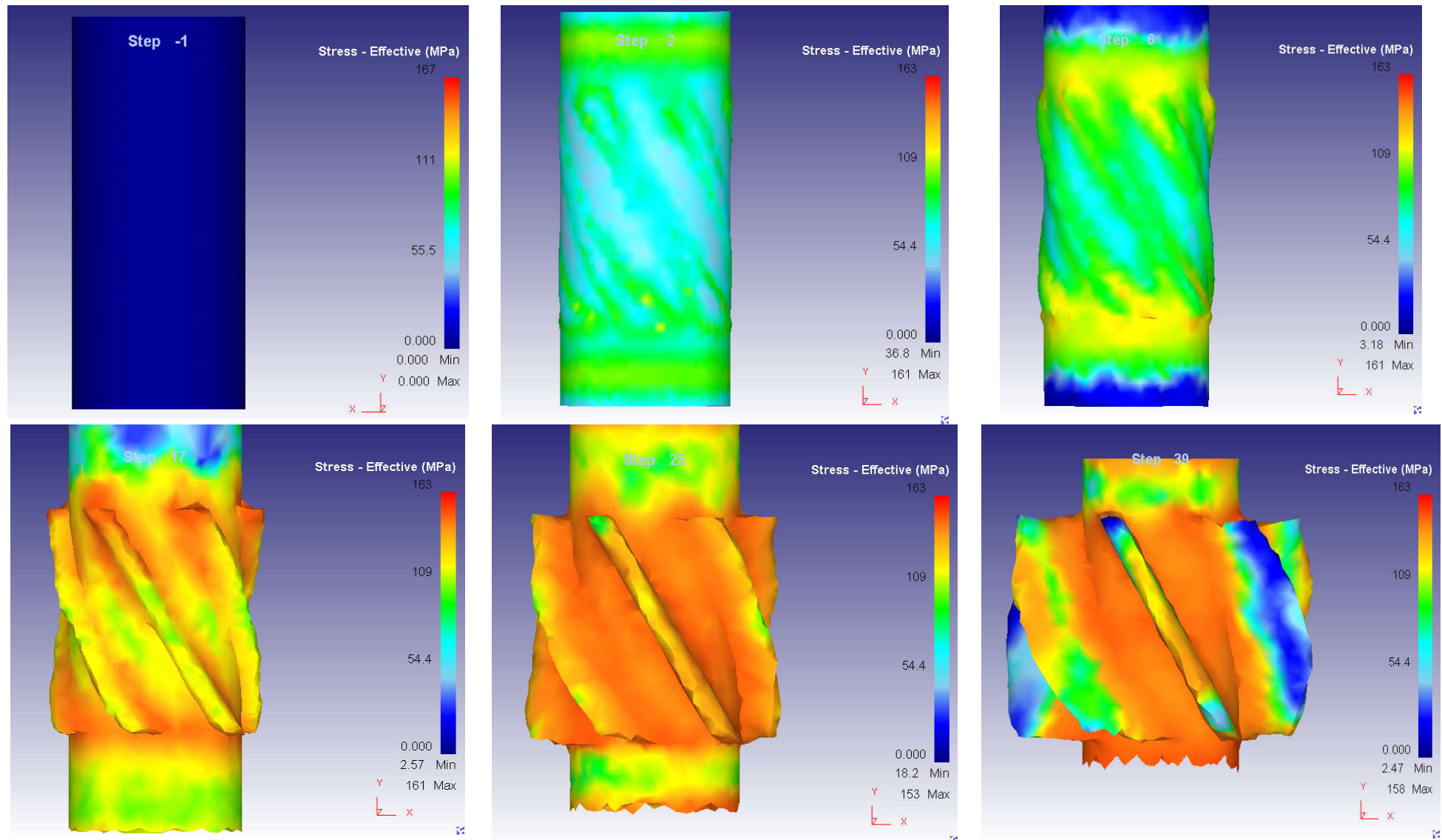


Рисунок 5.38 – Розподіл напружень для видавлювання поковки з шістьма перами в різних стадіях процесу

Силовий режим (рис. 5.39) процесу бокового видавлювання можна умовно розділити на три стадії.

Перша стадія – початок штампування з невеликим зростанням сили до певної величини, потім друга стадія – комбіноване видавлювання з практично незмінною силою, характеризує зворотне видавлювання (формування верхньої і нижньої порожнини), а також одночасне затікання металу в бокові похилі порожнини.

Третя стадія супроводжується різким збільшенням сили, який настає при зближенні центральних оправок на критичну величину (товщина перемички менше половини діаметра оправок).

Також теоретично було досліджено вплив товщини пера на силовий режим процесу і на напружений стан. Був досліджений процес комбінованого видавлювання деталей з різною товщиною пера ($S=3$ мм, $S=2$ мм, $S=1$ мм). Розрахунки показали, що зменшення товщини пера з 3 мм до 1 мм призводять до збільшення напружень в незначних розмірах (не більше 10%).

За допомогою програми були розраховані напруження, що виникають в заготовки на різних стадіях деформування. Було визначено, що максимальні напруження не перевищують значення 176 МПа, що допустимо для даного алюмінієвого сплаву. При зменшенні товщини пера, напруження збільшуються на 10%.

Як показує теоретичний аналіз, максимальний ступінь деформації виникає в початковий момент видавлювання пера і практично не змінюється протягом процесу.

З графіків, наведених на рис. 5.40, можна сказати, що максимальна сила буде при штампуванні деталі «хвостовик» з товщиною пера $S=1$ мм $P=277$ кН, що на 3% більше штампування деталі з товщиною пера $S=2$ мм і на 6% більше з товщиною $S=3$ мм.

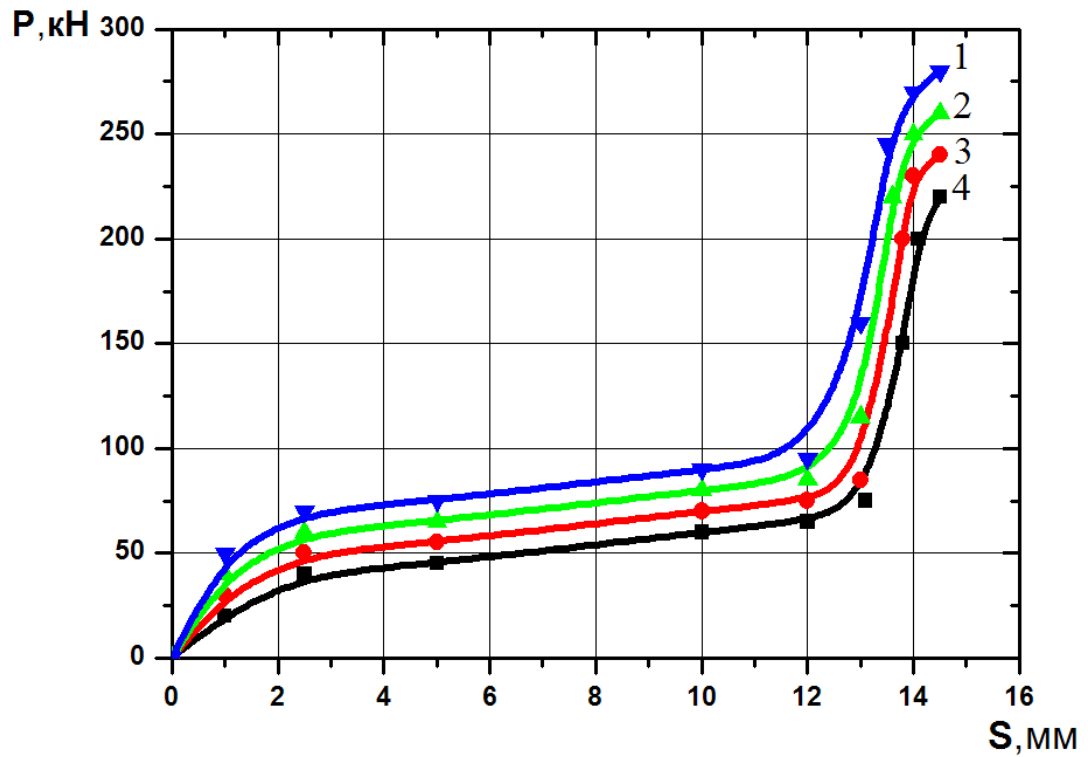


Рисунок 5.39 – Графік залежності сили видавлювання від ходу процесу:
1 – 1 пера; 2 – 3 пера; 3 – 4 пера; 4 – 6 пер

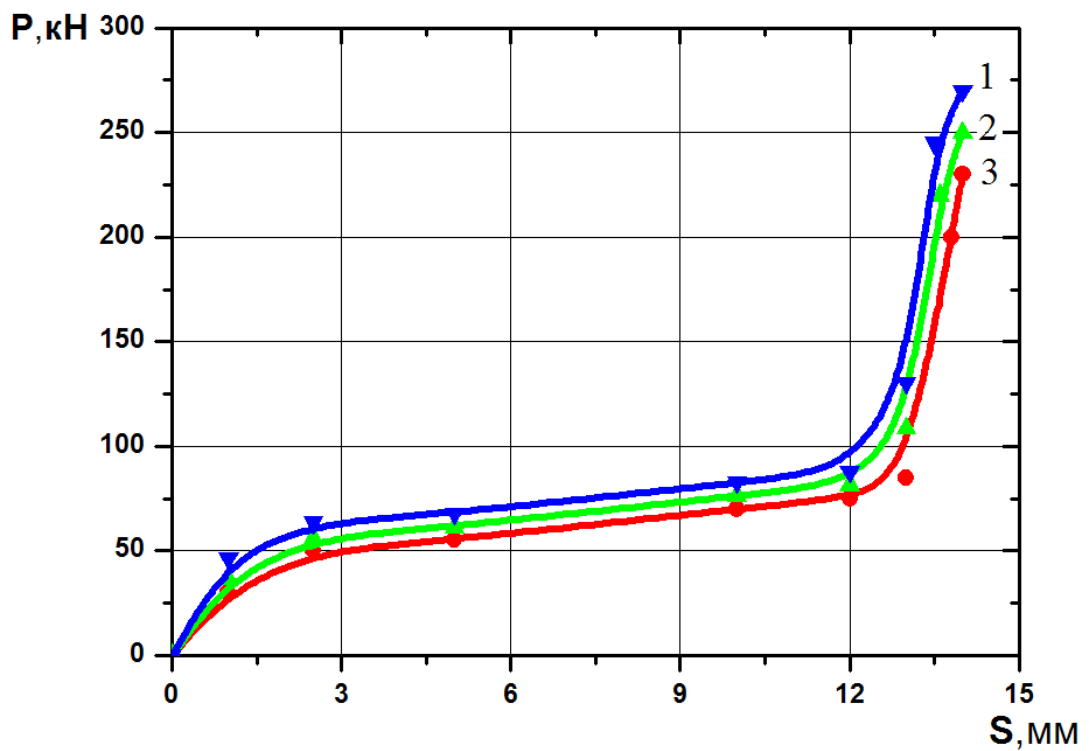


Рисунок 5.40 – Графік залежності сили видавлювання від товщини пера: 1 – S=1 мм; 2 – S=2 мм; 3 – S=3 мм

5.8 Експериментальне дослідження схем бокового видавлювання

Для дослідження аналізу картини течії металу при односторонній подачі металу (рис. 5.41) маємо осередок пластичного деформування, який має трикутну форму, що співпадає з результатами моделювання.

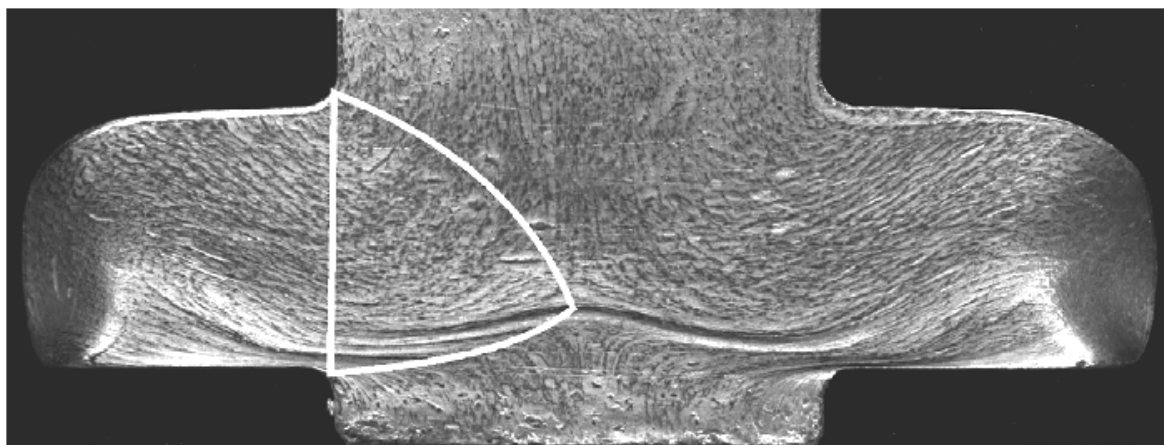


Рисунок 5.41 – Картина течії металу при боковому видавлюванні для визначення форми і розмірів осередку деформування

Аналізуючи рис. 5.41 можна помітити, що при односторонньому видавлюванні осередок деформації розташовується несиметрично відносно відростка (зміщений до нижньої частини). Даний факт був врахований при побудові розривного поля швидкостей під час аналітичного дослідження процесу одностороннього видавлювання.

Також слід зазначити, що область найбільших зсувних деформацій (низ осередку деформації) контактує з «жорсткою» нерухомою зоною стрижневої частини деталі, що при спробі видавити відросток великої довжини може привести до утворення тріщини.

Для схеми видавлювання двох пар відростків, розташованих на різній висоті, була отримана картина зміни ділильної сітки, що дозволяє отримати кількісну оцінку деформованого стану, що дає можливість на початковій стадії досліджень дати загальну характеристику перебігу металу.

У початковий момент видавлювання деталі з двома парами відростків відбувається осадка заготовки і незначне затікання металу в бокові канали обох пар відростків.

При подальшому деформуванні затікання металу в нижню пару відростків припиняється, а метал заповнює тільки верхню пару відростків (яка ближче до деформувального інструменту).

Це повністю підтверджує результати теоретичного дослідження течії металу і пояснюється законом найменшого опору. Заповнення двох пар відростків одночасно вимагатиме значно більших енергетичних витрат, ніж однієї.

Причому заповнюватися буде саме порожнина, ближня до пуансону. Для видавлювання нижньої пари відростків необхідно подолати сили тертя жорсткої зони (між відростками) об стінки матриці і затратити додаткову енергію на зсувну деформацію.

При видавлюванні довгих відростків при односторонній подачі можливе утворення тріщини між нижньою частиною відростка і недеформованою частиною. Поширюється тріщина вздовж межі контакту осередку деформації з жорсткою нижньою частиною деталі (рис. 5.42). Знизити ймовірність виникнення тріщини можна, або проводячи двостороннє видавлювання, або застосовуючи матриці з радіусною перехідною кромкою. При штампуванні деталей з відростками торці відростків виходять напівкруглої форми, і на кінцях відростків утворюється утягнення (рис. 5.43).

У разі необхідності отримання прямих торців це вважається дефектом, і його необхідно видаляти механічно. Цей дефект можна усунути за допомогою забезпечення закриття порожнини і калібруванням торців (рис. 5.44, а). Після чого проводиться відкриття порожнин і подальша доштамповка (рис. 5.44, б). Сила калібрування склала 100 кН, при доштамповці сила була незмінною ~ 50 кН.

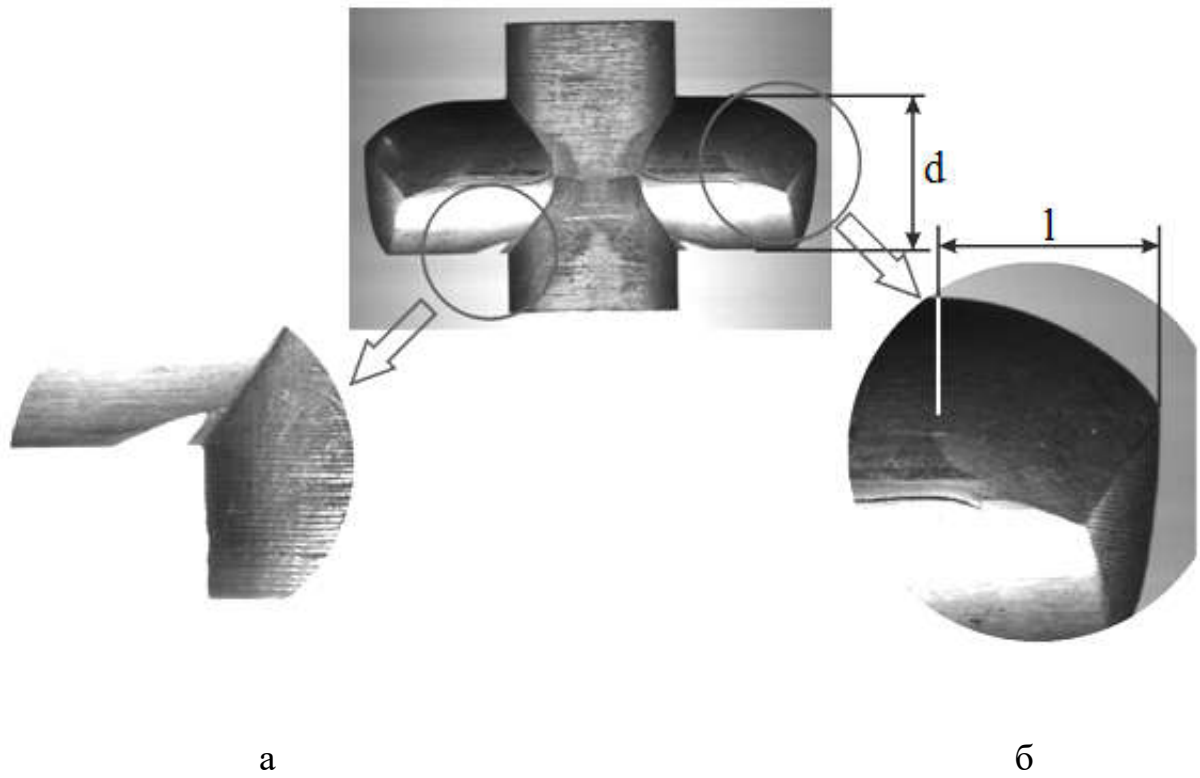


Рисунок 5.42 – Тріщина (а) і дефект форми торцевої частини відростка (б)

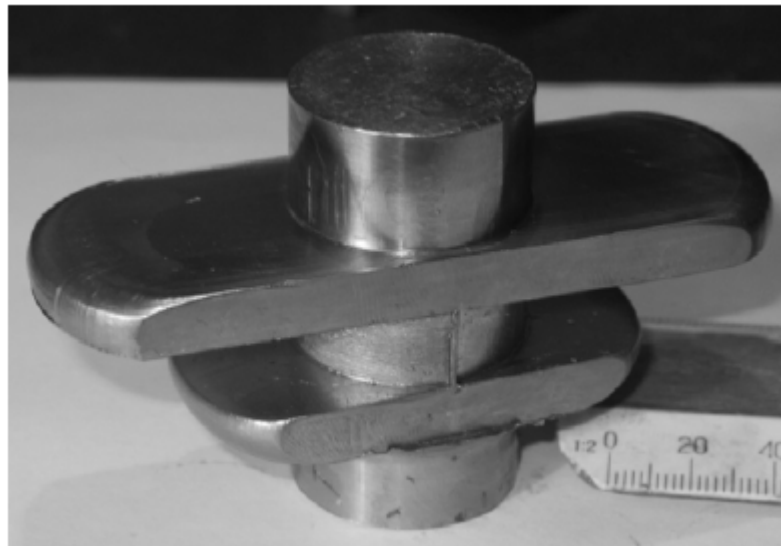


Рисунок 5.43 – Дефекти на торцях заготовки (штампування з розворотом)



а



б

Рисунок 5.44 – Деталі, одержувані з калібруванням торців

Двостороннє видавлювання однієї пари відростків в рамках даної роботи не проводилося.

Інтенсивність лінійних деформацій в середньому на 30% нижче при видавлюванні з радіусом, ніж при видавлюванні з гострою перехідною кромкою. Причому, аналізуючи деформовану сітку і поля розподілу інтенсивності лінійних деформацій, можна припустити, що збільшення величини радіуса більш сприятливо позначиться на деформованому стані і дозволить знизити нерівномірність розподілу деформацій.

Одним з найважливіших показників, які характеризують процес холодного об'ємного штампування і, зокрема, процес видавлювання, є сила. Цей показник є визначальним при конструюванні деформувального інструменту і виборі обладнання, на якому буде здійснюватися процес видавлювання. Під час видавлювання деталей з відростками на різній висоті з односторонньою подачею металу спостерігалася наступна картина зміни сили: в початковий момент відбувається зростання сили до 47 кН (заповнення верхнього відростка) через деяку величину ходу пуансона (відповідну ходу видавлювання до повного заповнення верхньої пари відростків) сила підвищувалась в межах 2...5% (відбувається зсув тіла деталі відносно сформованих відростків). Після цього при видавлюванні нижньої пари відростків сила залишалася незмінною.

При дослідженні двостороннього видавлювання деталей з відростками на різній висоті експериментальна сила дорівнювала силі одностороннього видавлювання відростків до моменту зрізу, тому що в даному випадку реалізується одностороннє видавлювання з «жорсткою» проміжною зоною, як говорилося вище.

При отриманні деталей з рівним торцем виконували калібрування, сила калібрування склала в 2...2,5 рази більше сили видавлювання. Це пояснюється тим, що під час калібрування утворюються додаткові осередки деформування в кутах гравюри, на які витрачається сила деформування.

Експерименти з витіснення відростків круглого перерізу були проведені з варіюванням діаметрів відростків від 8,62 мм до 21,2 мм на свинцевих і алюмінієвих заготовках $D_0=21,2$ мм. При видавлюванні деталей з відростками прямокутного перерізу (рис. 5.45) висоту відростка не змінювали. Як мастило використовували тваринний жир ($\mu=0,12$).

Зіставлення розрахункових і експериментальних даних (рис. 5.46) показало, що відхилення від експериментальних даних не перевищує 10-15% на початку деформування відносно тонких відростків $d/D_0=0.4 - 0.6$ і близько 5-7% в торці деформування дорівнює $d/D_0=0.6 - 1.0$. У той же час зіставлення моделі з експериментальними дослідженнями показало розбіжність з розрахунковими даними на 15-25% в області тонких відростків (складає 0.4 – 0.6), і близько 70% в області дорівнює 0.8 – 1.0.

Порівняння теоретичних розрахунків сили відростків з двосторонньою і односторонньою подачею показало, що двостороннє видавлювання вимагає менших, в середньому на 15-25% значень сили деформування, ніж при односторонній подачі. Ця перевага в полегшенні силового режиму є наслідком зниження нерівномірності деформацій.

В ході експериментів досліджувалося відхилення форм відростків, утворення, характер і причини їх виникнення.

При видавлюванні також можна спостерігати вигин відростка, який легко усувається шляхом збільшення довжини направляє паска (порога). При вільному видавлюванні кут відхилення відростка від поперечного напрямку залежить від схеми процесу і співвідношення швидкостей переміщення пуансона і матриці.

При видавлюванні довгих відростків при односторонній подачі можливе утворення тріщини між нижньою частиною відростка і недеформованою частиною. Поширюється тріщина вздовж межі контакту осередку деформації з жорсткою нижньою частиною деталі. Знизити ймовірність виникнення тріщини можна, проводячи двостороннє видавлювання.



Рисунок 5.45 – Деталі з відростками прямокутного перерізу

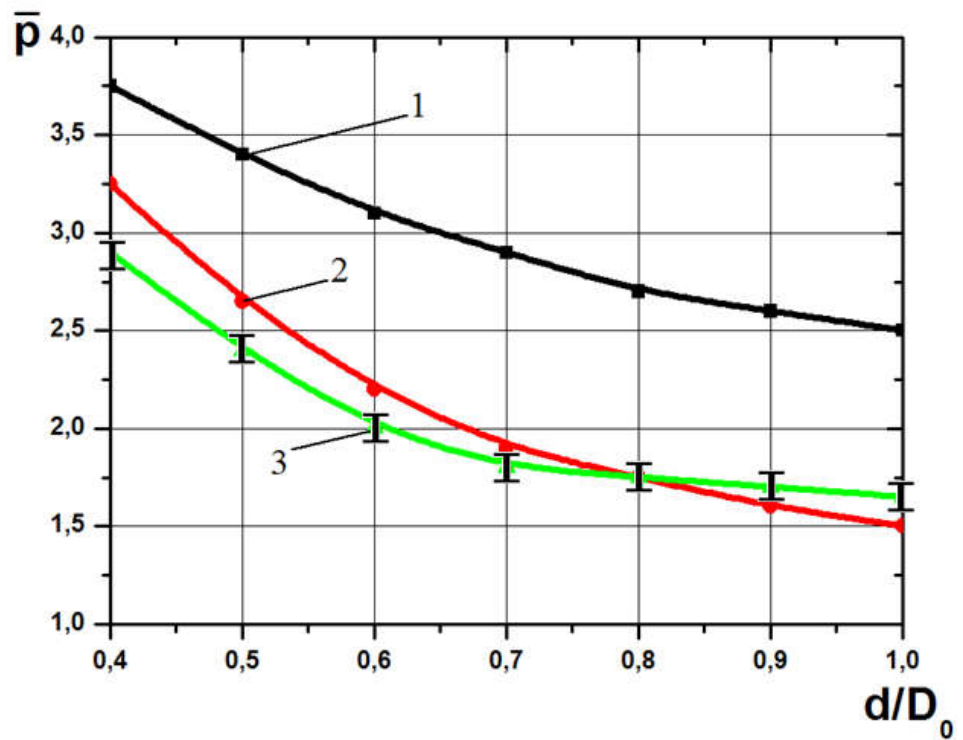


Рисунок 5.46 – Порівняння залежності експериментальних і розрахункових значень p/σ_s від відносного діаметра відростка d/D_0 :
 1 – Овчинников О. Г. [22], 2 – теоретичне дослідження,
 3 – експериментальне дослідження

Для дослідження видавлювання деталей з відростками на різних рівнях використовувалися такі схеми: одностороння подача, послідовна одностороння подача з розворотом на 180° і двостороння подача металу. Фотографії зразків, отримані після одностороннього видавлювання наведені на (рис. 5.47).

На рис. 5.47, а видно, що в початковий період відбувається формування двох пар відростків, після чого затікання металу відбувається тільки в одну пару відростків, які розташовуються ближче до деформувального пуансону (на рис. 5.47, верхня пара). При повному оформленні верхньої пари відростків починається заповнення нижньої порожнини. При цьому відбувається зсув заготовки відносно раніше сформованих відростків, що призводить до їх відокремлення.

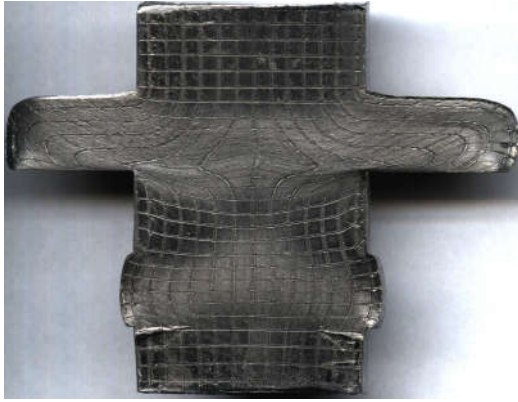
Дана схема деформування з односторонньою подачею металу не підходить для отримання деталей з відростками на різних рівнях, так як відбувається утворення дефекту у верхній парі відростків (рис. 5.47, б).

Штампування при односторонній подачі з розворотом на 180° і з двосторонньою подачею металу (рис. 5.48) дозволяє отримати відростки на різній висоті. При отриманні довгих відростків через високі зсувних деформацій можливо вичерпання ресурсу пластичності, що може привести до появи тріщин.

Для дослідження силового режиму при видавлювання деталей з елементом типу «пера» проведено ряд експериментів.

Для схеми видавлювання чотирьох відростків з товщиною три міліметри було досліджено дві схеми деформування. Перша з них це пряме і поперечне видавлювання деталі, друга це зворотне і поперечне видавлювання (табл. 5.5).

У першому випадку відбувається осадка заготовки в похилі порожнини піра з практично незмінною силою процесу.



а

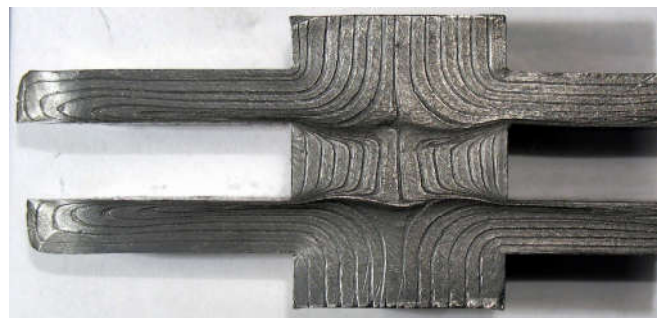


б

Рисунок 5.47 – Штампування з односторонньою подачею металу



а



б

Рисунок 5.48 – Видавлювання деталей з відростками на різних рівнях: а – одностороннє штампування з розворотом на 180° ; б – штампування з двосторонньою подачею металу

Таблиця 5.5 – Експериментальні дані видавлювання деталей з чотирма перами

Пряме та поперечне видавлювання			Зворотне та поперечне видавлювання		
Хід, мм	Сила, кН		Хід, мм	Сила, кН	
	Свинець	АД1		Свинець	АД1
0	0	0	0	0	0
5	15	113	5	14	40
10	20	134	10	22	60
15	21	149	15	22	65
20	22	164	20	22	66
			25	24	70
			27	40	120
			28	50	147
			29	66	186
			30	98	224

У другому випадку в початковий момент відбувається зворотне витискування заготовки і незначне затікання металу в бокові канали відростків. При подальшому деформуванні затікання металу відбувається в бокові порожнини з практично незмінною силою.

На рис. 5.49 наведено графік залежності сили комбінованого (зворотне і поперечне) видавлювання з алюмінієвого сплаву АД1 від ходу пуансона. Також експериментально було досліджений видавлювання деталі з трьома перами. Дані залежності сили від ходу інструменту зняті за допомогою тензодатчиків, наведені в табл. 5.6

На рис. 5.50 наведено графік залежності сили комбінованого (зворотне і поперечне) видавлювання з алюмінієвого сплаву АД1 від ходу пуансона. З графіка видно, що експериментальне і теоретичне дослідження дають гарну збіжність результатів.

На рис. 5.51 показана деталь отримана видавлюванням в експериментальному штампі.

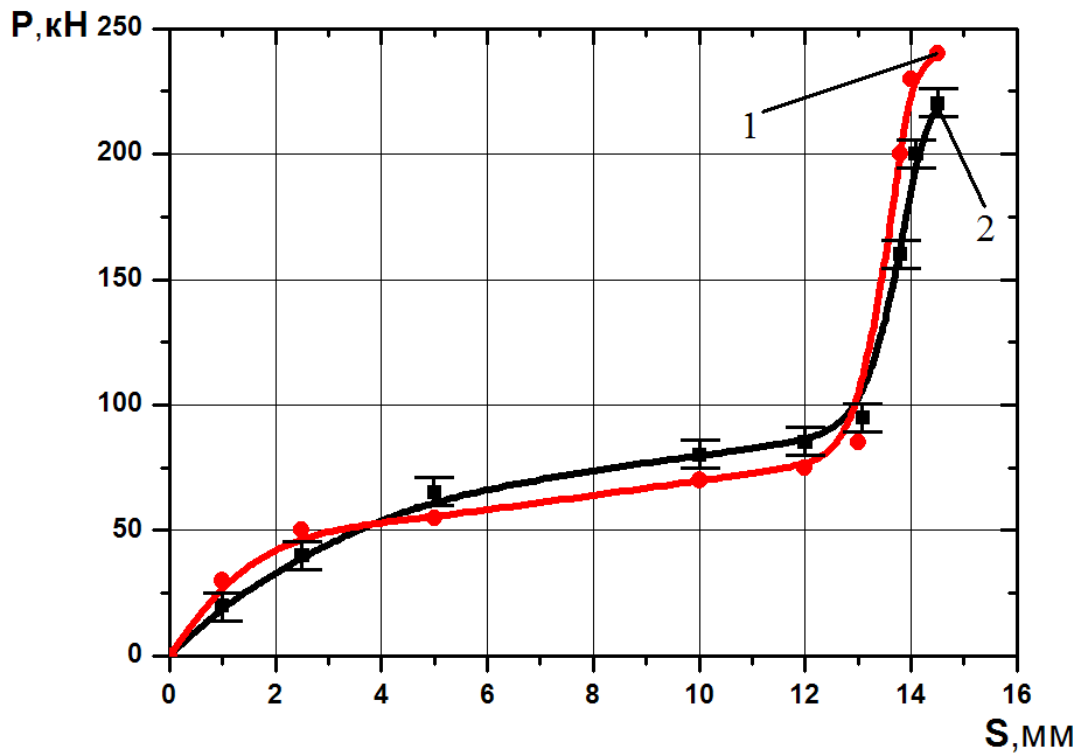


Рисунок 5.49 – Графік залежності сили процесу від ходу інструменту при різній товщині пера $S=3$ мм: 1 – МСЕ, 2 – експеримент

Таблиця 5.6 – Експериментальні дані видавлювання деталей з трьома перами

Пряме та поперечне видавлювання			Зворотне та поперечне видавлювання		
Хід, мм	Сила, кН		Хід, мм	Сила, кН	
	Свинець	АД1		Свинець	АД1
0	0	0	0	0	0
5	17	124	5	16	43
10	22	155	10	25	60
15	23	163	15	25	71
20	25	184	20	45	130
			23	63	145
			24	74	168
			25	86	185
			26	101	220
			27	123	235

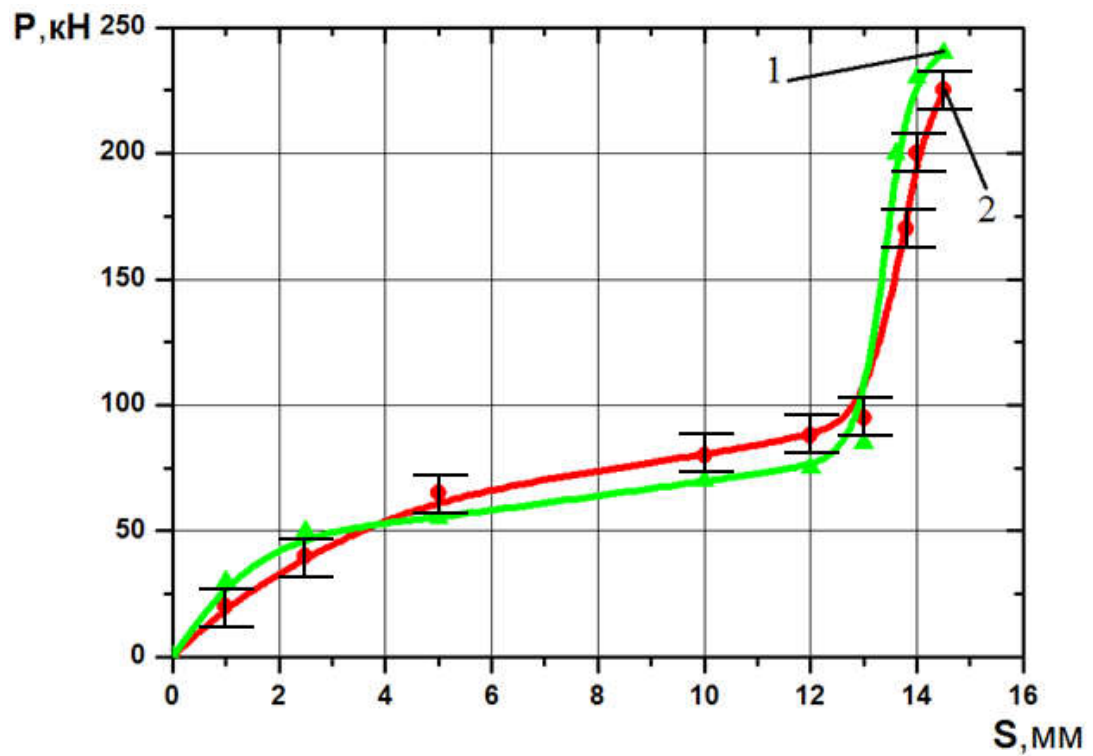


Рисунок 5.50 – Графік залежності сили процесу від ходу інструменту 1 – МСЕ, 2 – експеримент



Рисунок 5.51 – Деталі з перами, отримані боковим видалюванням

Висновки:

1. Удосконалення способів бокового видавлювання дозволило розширити номенклатуру отриманих виробів з відростками, що симетрично та несиметрично розташовані один відносно одного, відростками («перами») під кутом відносно до осі заготовки за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих схем деформування заготовки з кінематикою регулювання руху інструменту.

2. Силевий режим процесу отримання відростків на одній осі симетрії оцінено на основі методу верхньої оцінки та методу скінченних елементів. Методом верхньої оцінки встановлено, що існує діапазон відносних значень висоти відростків $H_0=0,45...0,55$, при яких значення приведенного тиску досягають свого мінімуму. При збільшенні коефіцієнта тертя в інтервалі $[0,1..0,3]$ відбувається пропорційне збільшення приведенного тиску при інших рівних геометричних параметрах процесу. Скінченно-елементне моделювання дозволило оцінити напружено-деформований стан заготовки. Осередок деформації зосереджений в місці формування відростків та має хрестоподібну форму.

3. На основі енергетичного методу балансу потужностей дано оцінки силових параметрів процесу видавлювання деталей з відростками, розташованими на різній висоті. Встановлена нерівномірність розподілу приведенного тиску при поетапному заповненні відростків, що пов'язано з необхідністю подолання сил тертя при заповненні більш віддалених відростків.

4. Аналіз силового режиму видавлювання деталей з плоским відростком та умов розподілу деформацій встановлено, що мінімальне значення приведенного тиску та рівномірний розподіл деформації спостерігається при кутах, що знаходяться в інтервалі $25^\circ...30^\circ$.

5. При виготовленні деталей з відростками, які знаходяться на одній осі

симетрії, з різною формою поперечного перерізу відростку та однаковою площею поперечного перерізу, встановлено, що різниця сили видавлювання становить 6..10 % при видавлюванні відростка з квадратним поперечним перерізом. Це пояснюється тим, що при видавлюванні відростків прямокутного перерізу контактна площа тертя більша від площі контакту при отриманні відростку круглого перерізу.

6. На силовий режим процесу отримання відростків на різній висоті заготовки значно впливає кінематична схема деформування та зміщення осей відростків відносно один одного X (варіювання розміру X в межах від $(0...2)d$). Для отриманні рівних за довжиною відростків рекомендовано застосовувати двосторонню подачу металу з дотриманням відношення швидкостей верхнього і нижнього пуансону $V_2/V_1=1$. При збільшенні параметра X , сила процесу зростає фактично лінійно до значення $X/2R_0 = 1,0$. Подальше збільшення значень до $X/2R_0 \geq 2,0$ значно впливає на напружено-деформований стан заготовки. В таких умовах в тілі заготовки з'являється зона інтенсивної деформації, що розташована в місці розвороту металу у відростки і може стати місцем відділення частини заготовки (відростка) від деталі.

7. На основі енергетичного балансу потужностей та методу верхньої оцінки отримані аналітичні залежності для визначення сили деформування для схем бокового видавлювання відростків різної конфігурації з одно- та двосторонньою подачами. Встановлено, що при формуванні відростків однієї форми односторонньою та двосторонньою подачами зниження сили при двосторонній подачі металу становить 15 – 20%. Скінченно-елементний аналіз процесу отримання бокового відростку типу «пера» дозволив встановити стадії формоутворення та особливості напружено-деформованого стану деталі. Встановлено, що інтенсивність деформацій в осередку деформування в середньому на 30% нижче при видавлюванні з заокругленням на матриці, ніж при видавлюванні з гострою перехідною кромкою; збільшення товщини «пера» сприяє зменшенню сили деформування. При порівнянні

експериментальних та теоретичних даних відхилення теоретичних розрахунків не перевищувало 12%.

8. МСЕ-модельовання видавлювання порожнистого відростка на оправці круглого і квадратного перерізу (рис. 18, а) показало, що застосування двосторонньої подачі сприяє рівномірному розподілу напружено-деформованого стану у відростку та підвищує якість формоутворення елемента. Максимальні значення логарифмічного ступеню деформації зосереджені на перехідних кромках інструменту і зменшуються зі збільшенням радіусу закруглення матриць, що сприятливо впливають на зменшення концентрацій напружень у місцях розвороту течії металу. Аналогічний розподіл деформацій спостерігається і при отриманні відростків зі змінним поперечним перерізом. Збільшення перепаду розмірів призводить до зростання як сили видавлювання, так і сили розкриття матриць.

Результати досліджень відображені в опублікованих роботах [235-251].

6 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО ТА СУМІЩЕНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

6.1 Моделювання процесу суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями

6.1.1 Аналіз силового режиму суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями методом верхньої оцінки

Мета даного дослідження – дослідження силового режиму процесу видавлювання внутрішнього фланця методом верхньої оцінки з трубчастої заготовки з використанням оправки з гострою і радіусною перехідною кромкою. Оцінка впливу тертя і геометричних параметрів на приведений тиск деформування.

Розглянуто процес висадки деталі типу втулка з фланцем методом верхньої оцінки (рис. 6.1). Суть методу верхньої оцінки полягає в тому, що обсяг осередку деформації (рис. 6.1, а) представляється у вигляді жорстких блоків, що ковзають один відносно іншого і по границях з жорсткою зоною. Тим самим дійсне поле ліній ковзання замінюємо полем, що складається з системи прямолінійних сегментів, які формують трикутники. На цій підставі будуємо поле швидкостей (рис. 6.1, б), яке при правильній побудові завжди є кінематично можливим. Число і розміри трикутних блоків спочатку вибираємо довільно. Приведений тиск розраховується як:

$$\bar{p} = \frac{1}{2 \cdot B \cdot V_0} \cdot \left[\left(l_{12} \cdot V_{12} + l_{20} \cdot V_{20} + l_{23} \cdot V_{23} + l_{34} \cdot V_{34} + \right. \right. \\ \left. \left. + l_{15} \cdot V_{15} + l_{50} \cdot V_{50} + l_{56} \cdot V_{56} + l_{67} \cdot V_{67} \right) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \mu \cdot (l_{31} \cdot V_{31} + l_{40} \cdot V_{40} + l_{61} \cdot V_{61} + l_{70} \cdot V_{70}) \right], \quad (6.1)$$

де $V_0 = \bar{h}$ – початкова швидкість інструменту;

$B = (\bar{R}_2 - \bar{R}_0)$ – площа контакту заготовки з інструментом.

Визначимо довжини межі контакту і швидкостей відносного руху блоків, між якими відбувається зріз, довжини межі контакту і швидкості відносного руху інструмента і заготовки (табл. 6.1).

Підставляючи в рівняння енергетичного балансу отримані довжини межі контакту і швидкостей відносного руху блоків, між якими відбувається зріз, а також довжини межі контакту і швидкості відносного руху інструмента і заготовки отримаємо:

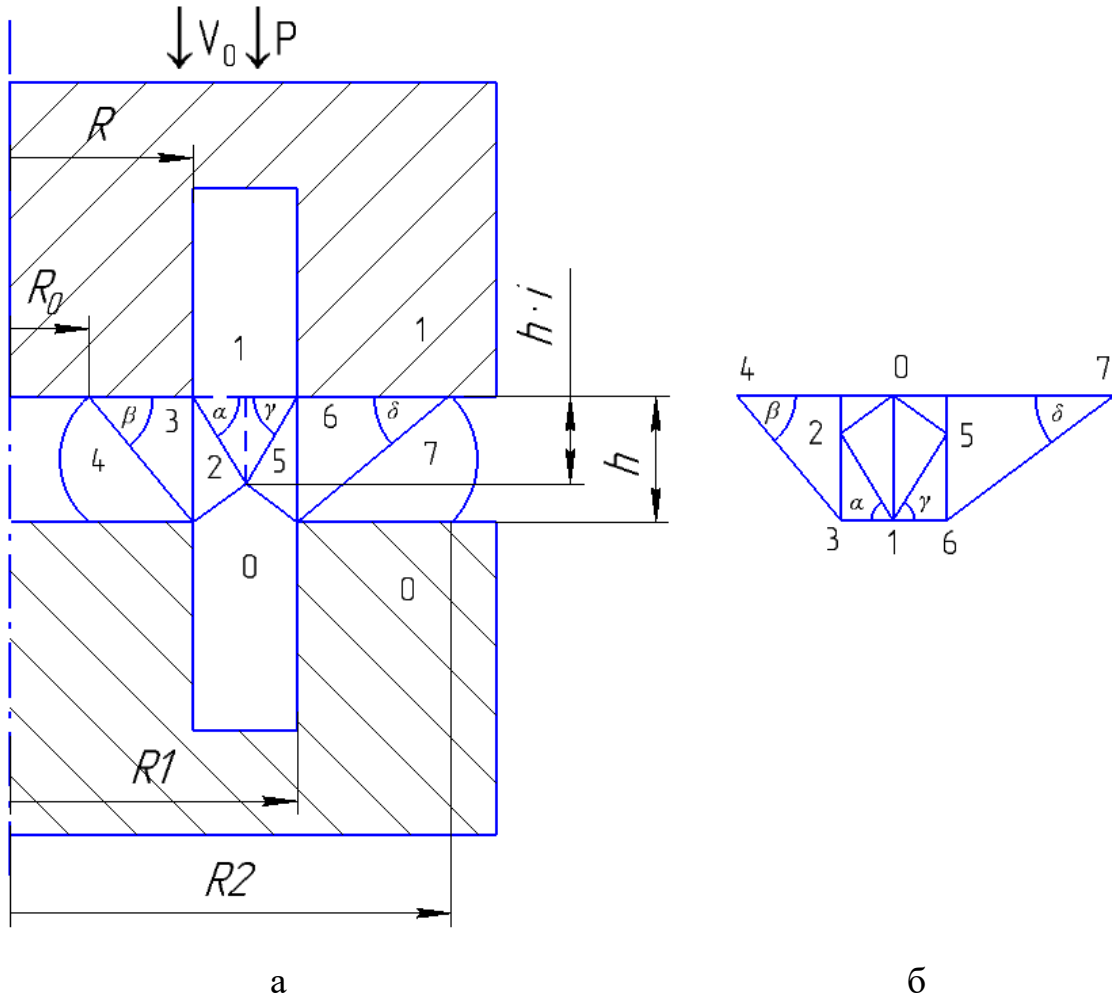


Рисунок 6.1 – Схема розбивки осередку деформації при висадці (а) і годограф швидкостей (б)

Таблиця 6.1 – Довжини межі і швидкостей переміщення блоків

ij	l_{ij}	V_{ij}
1-2	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$
2-0	$\sqrt{(\bar{h} - \bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$	$\sqrt{(\bar{h} - \bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$

2-3	$\bar{h}$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2} \cdot \sin \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}} \right)$
3-4	$\sqrt{\bar{h}^2 + (\bar{R} - \bar{R}_0)^2}$	$\sqrt{\bar{h}^2 + (\bar{R} - \bar{R}_0)^2}$
1-5	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$
5-0	$\sqrt{(\bar{h} - \bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$	$\sqrt{(\bar{h} - \bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2}$
5-6	$\bar{h}$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2} \cdot \sin \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}} \right)$
6-7	$\sqrt{\bar{h}^2 + (\bar{R}_2 - 1)^2}$	$\sqrt{\bar{h}^2 + (\bar{R}_2 - 1)^2}$
3-1	$(\bar{R} - \bar{R}_0)$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}} \right)$
4-0	$(\bar{R} - \bar{R}_0)$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}} \right) + (\bar{R} - \bar{R}_0)$
6-1	$(\bar{R}_2 - 1)$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}} \right)$
7-0	$(\bar{R}_2 - 1)$	$\sqrt{(\bar{h} \cdot i)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}\right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1-\bar{R}}{2}} \right) + (\bar{R}_2 - 1)$

$$\text{де } \bar{h} = \frac{h}{R_1}; \bar{R} = \frac{R}{R_1}; \bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_1} = 1; \bar{R}_0 = \frac{R_0}{R_1}; \bar{R}_2 = \frac{R_2}{R_1}.$$

$$\begin{aligned}
\bar{p} = \frac{1}{2 \cdot (\bar{R}_2 - \bar{R}_0) \cdot \bar{h}} \cdot & \left(\begin{aligned} & \left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2 + \left(\bar{h} - \bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2 + \\ & + \bar{h} \cdot \sqrt{\left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2} \cdot \sin \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2}} \right) + \\ & + \bar{h}^2 + \left(\bar{R} - \bar{R}_0 \right)^2 + \left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2 + \left(\bar{h} - \bar{h} \cdot i \right)^2 + \\ & + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2 + \bar{h} \cdot \sqrt{\left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2} \times \\ & \times \sin \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2}} \right) + \bar{h}^2 + \left(\bar{R}_2 - 1 \right)^2 \end{aligned} \right) + \\
+ 2 \cdot \mu \cdot & \left(\begin{aligned} & \left(\bar{R} - \bar{R}_0 \right) \cdot \sqrt{\left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2}} \right) + \\ & + \left(\bar{R} - \bar{R}_0 \right) \cdot \left(\sqrt{\left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2}} \right) + \left(\bar{R} - \bar{R}_0 \right) \right) + \\ & + \left(\bar{R}_2 - 1 \right) \cdot \sqrt{\left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2}} \right) + \\ & + \left(\bar{R}_2 - 1 \right) \cdot \left(\sqrt{\left(\bar{h} \cdot i \right)^2 + \left(\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2} \right)^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\bar{h} \cdot i}{\bar{R} + \frac{1 - \bar{R}}{2}} \right) + \left(\bar{R}_2 - 1 \right) \right) \end{aligned} \right), \quad (6.2)
\end{aligned}$$

де i – параметр оптимізації положення осередку деформацій.

Параметром оптимізації служить значення i , що описує положення осередку деформацій. На рис. 6.2 видно, що мінімальне значення приведенного тиску досягається при $i=0,25$.

Відповідно до проведених розрахунків були побудовані графіки залежності приведенного тиску від відносної висоти фланця і відносного внутрішнього радіусу труби (рис. 6.3).

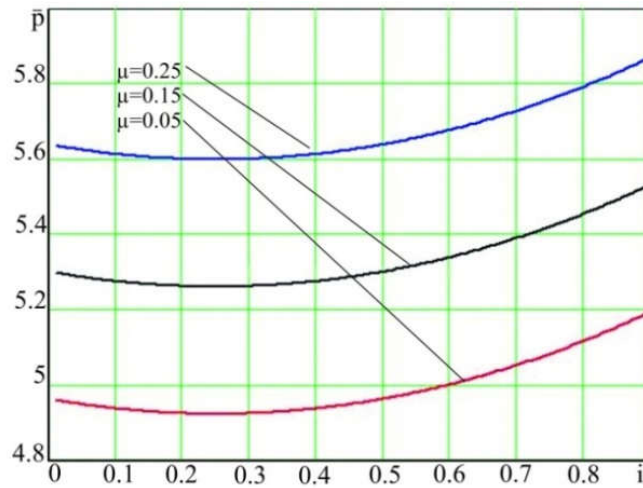
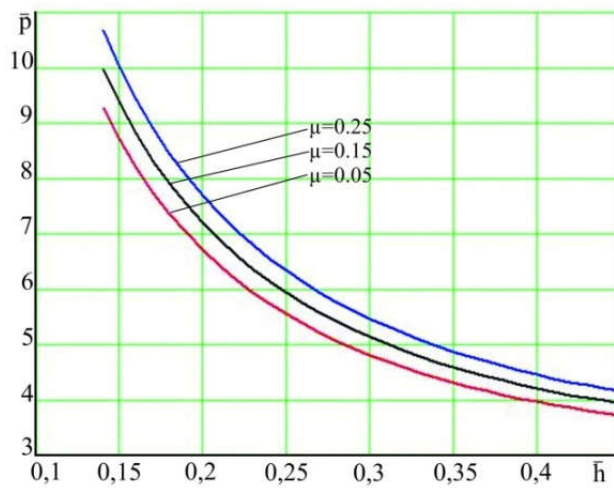
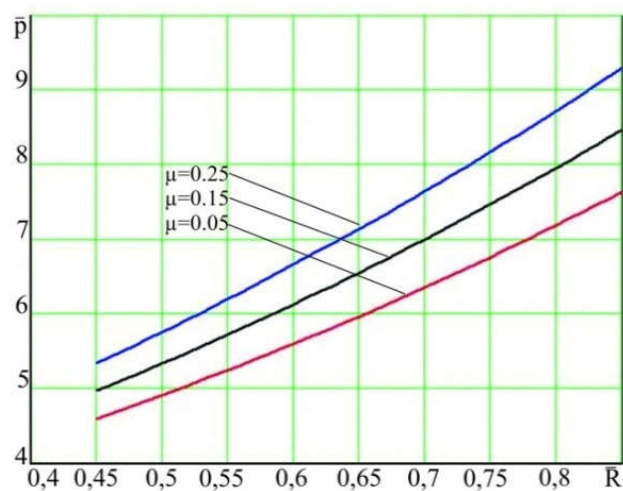


Рисунок 6.2 – Графік залежності приведенного тиску від положення осередку деформації



а



б

Рисунок 6.3 – Графіки залежності приведенного тиску від відносної висоти фланця (а) і від відносного внутрішнього радіуса труби (б) при різних значеннях тертя

На рис. 6.3, а видно, що зі збільшенням відносної висоти фланця приведений тиск падає. Це пов'язано зі зміною зон зрізу. Крім того при низьких фланцях змінюється спосіб розбивки осередку деформації. При збільшенні відносного внутрішнього радіусу труби значення приведенного тиску зростають. Це пояснюється збільшенням осередка деформації і обсягу металу в центральній зоні, що тягне за собою збільшення зон зрізу.

6.1.2 Дослідження силових характеристик суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями енергетичним методом балансу потужностей

При деформуванні трубних заготовок радіальним видавлюванням з направленням течії металу до осі симетрії та від осі досягається формоутворення на внутрішній і зовнішній поверхнях деталі. Розрахункова схема процесу побудована з простих блоків (рис. 6.4). Так як задача осесиметрична, то розглядаємо одну половину трубчастої заготовки. Об'єм деформованого металу умовно розбитий на ряд елементарних зон, з яких зони 1 і 6 приймаємо «жорсткими», а решта – пластичними. Для аналізу силового режиму деформування при радіальному видавлюванні використовують енергетичний метод. Приймаємо, що деформується матеріал однорідний і не зміцнюється ($\sigma_i = \sigma_s$), швидкість руху пуансона постійна і дорівнює V_0 , дотичні напруження на контакті постійні і пропорційні σ_s , тобто: $\tau_k = \mu \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s$, ($0 \leq \mu \leq 0.5$). Граничні умови для швидкостей переміщення на поверхнях осередку деформації такі:

<u>1 зона:</u>		<u>2 зона:</u>	
При $z=H$	$V_z=-V_0$;	При $z=h$	$V_z=-V_0$;
При $z=h$	$V_z=-V_0$;	При $z=0$	$V_z=0$;
При $r=R$	$V_r=0$;	При $r=R_{k1}$	$V_r=0$;
При $r=R_0$	$V_r=0$.	При $r=R_1$	$V_r=-V_0 \frac{R_1^2 - R_{\epsilon 1}^2}{2R_1 h}$.

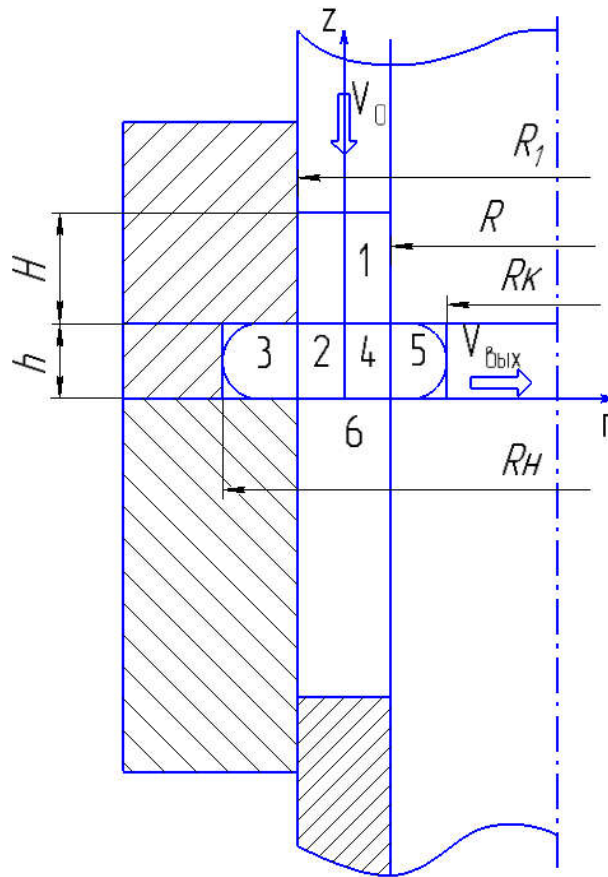


Рисунок 6.4 – Схема процесу радіального видавлювання

3 зона:

При $z=0$	$V_z=0;$
При $z=h$	$V_z=0;$
При $r=R_1$	$V_r = -V_0 \frac{R_1^2 - R_{e1}^2}{2R_1 h};$
При $r=R_H$	$V_r = -V_0 \frac{R_1^2 - R_i^2}{2R_i h}.$

5 зона:

При $z=0$	$V_z=0;$
При $z=h$	$V_z=0;$

4 зона:

При $z=h$	$V_z=-V_0;$
При $z=0$	$V_z=0;$
При $r=R_{K1}$	$V_r=0;$
При $r=R_1$	$V_r = -V_0 \frac{R_{e1}^2 - R^2}{2R h}.$
При $r=R_1$	$V_r = -V_0 \frac{R_1^2 - R_{e1}^2}{2R_1 h};$
При $r=R_H$	$V_r = -V_0 \frac{R_1^2 - R_i^2}{2R_i h}.$

Прийнята модель течії описується наступними залежностями для осьових і радіальних компонентів векторів швидкостей відповідних зон:

1 зона:

$$V_z = -V_0, \quad V_r = 0;$$

2 зона:

$$V_z = -\frac{V_0}{h}z, \quad V_r = -\frac{V_0}{2h}r - \frac{V_0 R_{\varepsilon 1}^2}{2hr};$$

3 зона:

$$V_z = 0, \quad V_r = -V_0 \frac{(R_1^2 - R_{\varepsilon 1}^2)}{2hr}.$$

4 зона:

$$V_z = -\frac{V_0}{h}z, \quad V_r = -\frac{V_0}{2h}r - \frac{V_0 R_{\varepsilon 1}^2}{2hr};$$

5 зона:

$$V_z = 0, \quad V_r = -V_0 \frac{(R_{\varepsilon 1}^2 - R^2)}{2hr}.$$

Для обчислення інтенсивності швидкостей деформацій використовуємо вираз:

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\varphi^2 + \dot{\varepsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2}, \quad (6.3)$$

Компоненти тензора швидкості деформації при цьому визначаються:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad (6.4)$$

$$\dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{\partial V_r}{r}, \quad (6.5)$$

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad (6.6)$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}. \quad (6.7)$$

і має наступний вигляд для зон:

1 зона:

$$\dot{\varepsilon}_z = 0; \quad \dot{\varepsilon}_r = 0; \quad \dot{\varepsilon}_\varphi = 0.$$

2 зона:

$$\dot{\varepsilon}_z = -\frac{V_0}{h}; \quad \dot{\varepsilon}_r = \frac{V_0}{2h} + \frac{V_0 R_{\varepsilon 1}^2}{2hr^2}; \quad \dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{V_0}{2h} - \frac{V_0 R_{\varepsilon 1}^2}{2hr^2}$$

3 зона:

$$\dot{\varepsilon}_z = 0; \quad \dot{\varepsilon}_r = V_0 \frac{(R_1^2 - R_{\dot{\varepsilon}1}^2)}{2hr^2};$$

$$\dot{\varepsilon}_Q = -V_0 \frac{(R_1^2 - R_{\dot{\varepsilon}1}^2)}{2hr^2}.$$

5 зона:

$$\dot{\varepsilon}_z = 0; \quad \dot{\varepsilon}_r = V_0 \frac{(R_{\dot{\varepsilon}1}^2 - R^2)}{2hr^2};$$

$$\dot{\varepsilon}_Q = -V_0 \frac{(R_{\dot{\varepsilon}1}^2 - R^2)}{2hr^2}.$$

$\dot{\gamma}_{rz}$ для всіх зон дорівнює нулю.

Перевірка показала, що для всіх зон умова нестисненості дотримана, тобто:

$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_Q + \dot{\varepsilon}_z = 0. \quad (6.8)$$

Значення сили деформування P визначаємо з умови рівності потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на кінематично можливих швидкостях переміщень.

$$N_a = PV_0 = p\pi(R_1^2 - R^2)V_0 = N_d + N_c + N_t = N_{d1-2} + N_{d1-4} + N_{c2-4} + N_{c4-5} + N_{c2-3} + N_{t0-3} + N_{t0-5} + 2N_{t1-0} \quad (6.9)$$

де N_{d1-4}, N_{d1-2} – потужності пластичної деформації в зонах 1, 2, 4;

$N_{c2-4}, N_{c4-5}, N_{c2-3}$ – потужності сил зрізу на поверхнях розриву швидкостей між зонами 2 і 4, 4 і 5, 2 і 3;

$N_{t0-3}, N_{t0-5}, N_{t1-0}$ – потужності сил контактної тертя заготовки і інструмента між зонами 0 і 3, 0 і 5, 1 і 0.

Звідки:

$$p = \frac{N_a}{\pi(R_1^2 - R^2)V_0}, \quad (6.10)$$

Тоді приведений тиск (відносне питоме зусилля на пуансоні):

$$\bar{p} = \frac{p}{\sigma_s} = \frac{N_a}{[\pi(R_1^2 - R^2)V_0\sigma_s]}. \quad (6.11)$$

Інтенсивності швидкостей деформацій, розраховані для зон:

1 зона: $\dot{\varepsilon}_i = 0$;

2 зона: $\dot{\varepsilon}_i = \left| \dot{\varepsilon}_r \right| = \frac{V_0}{2h} + \frac{V_0 R_1^2}{2hr^2}$;

3 зона: $\dot{\varepsilon}_i = \left| \dot{\varepsilon}_r \right| = V_0 \cdot \frac{R_1^2 - R^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$;

4 зона: $\dot{\varepsilon}_i = \left| \dot{\varepsilon}_r \right| = \frac{V_0}{2h} + \frac{V_0 R^2}{2hr^2}$;

5 зона: $\dot{\varepsilon}_i = \left| \dot{\varepsilon}_r \right| = V_0 \cdot \frac{R_1^2 - R^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$;

$$\begin{aligned} N_{d1-2-4} &= \sigma_s \int_0^{2\pi} \int_0^h \int_R^{R_1} \dot{\varepsilon}_{i1-2-4} dV = \sigma_s \int_0^{2\pi} \int_0^h \int_R^{R_1} (R_1^2 - R^2) \cdot \frac{V_0}{hr^2} r dz dr d\theta = \\ &= \sigma_s \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (R_1^2 - R^2) \pi V_0 \ln \frac{R_1}{R} \right); \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$N_{c2-4} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{V_0}{h} z R_{k1} dz d\theta = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \pi V_0 h R_{k1}; \quad (6.13)$$

$$N_{c4-5} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \int_0^{2\pi} \int_0^h \frac{V_0}{h} z R dz d\theta = \frac{\pi \sigma_s V_0 R h}{\sqrt{3}}; \quad (6.14)$$

$$N_{c2-3} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \int_0^{2\pi} \int_0^h \frac{V_0}{h} z R dz d\theta = \frac{\pi \sigma_s V_0 R_1 h}{\sqrt{3}}; \quad (6.15)$$

$$\begin{aligned} N_{c2-6} &= N_{c4-6} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \int_R^{R_1} \int_0^{2\pi} \frac{V_0}{2h} \left(\frac{r^2 - R_{k1}^2}{r} \right) r dr d\theta = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{V_0}{2h} \int_R^{R_1} \int_0^{2\pi} (r^2 - R_{k1}^2) dr d\theta = \\ &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{V_0 \pi}{h} \left((R_1 - R) R_{k1}^2 - \left(\frac{R_1^3}{3} - \frac{R^3}{3} \right) \right); \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$N_{t0-1} = N_{t1-0} = 2 \frac{2}{\sqrt{3}} \mu \sigma_s \int_0^H \int_h^{2\pi H} V_0 R_1 d\theta dz = 2 \frac{4}{\sqrt{3}} \mu \sigma_s V_0 R_1 \pi (H - h); \quad (6.17)$$

$$N_{t0-3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \mu \sigma_s \int_0^{2\pi R_i} \int_{R_1} |V_{r3}| r d\theta dr = \frac{2 \sigma_s V_0 \pi \mu (R_1^2 - R_{\varepsilon 1}^2) (R_i - R_1)}{\sqrt{3} h}; \quad (6.18)$$

$$N_{t0-5} = \frac{2}{\sqrt{3}} \mu \sigma_s \int_0^{2\pi R} \int_{R_{\varepsilon}} |V_{r5}| r d\theta dr = \frac{2 \sigma_s V_0 \pi \mu (R_{\varepsilon 1}^2 - R^2) (R - R_{\varepsilon})}{\sqrt{3} h}; \quad (6.19)$$

Загальне рівняння приведенного тиску буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{p} = & \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (R_1^2 - R^2) \ln \frac{R_1}{R} \right) + \frac{h R_{k1}}{\sqrt{3}} + \frac{R h}{\sqrt{3}} + \frac{R_1 h}{\sqrt{3}} + \frac{1}{h \sqrt{3}} \left((R_1 - R) R_{k1}^2 - \left(\frac{R_1^3}{3} - \frac{R^3}{3} \right) \right) + \\ & + 2 \frac{4}{\sqrt{3}} \mu R_1 (H - h) + \frac{2 \mu (R_1^2 - R_{\varepsilon 1}^2) (R_i - R_1)}{\sqrt{3} h} + \frac{2 \mu (R_{\varepsilon 1}^2 - R^2) (R - R_{\varepsilon})}{\sqrt{3} h}; \end{aligned} \quad (6.20)$$

Отриманий вираз можна представити у відносних величинах:

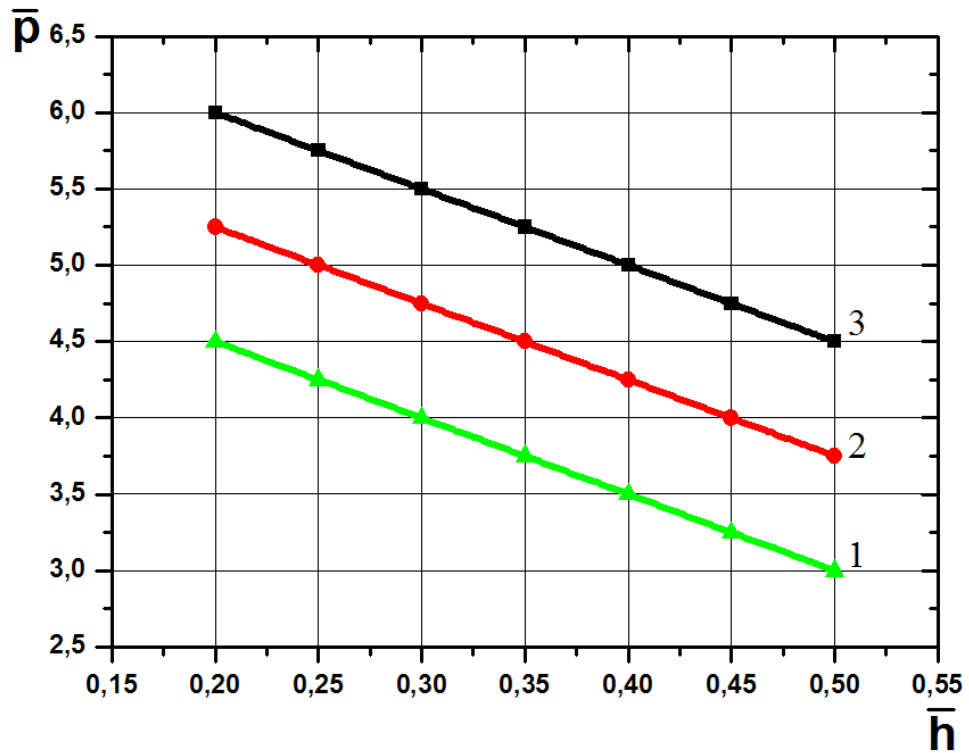
$$\begin{aligned} \bar{p} = & \frac{1}{(1 - \bar{R}^2) \sqrt{3}} \left[\left(2 \ln \frac{1}{\bar{R}} \right) + \bar{h} (\bar{R}_{\varepsilon 1} + \bar{R} + 1) + \frac{1}{\bar{h}} \left((1 - \bar{R}) \bar{R}_{k1}^2 - \left(\frac{1}{3} - \frac{\bar{R}^3}{3} \right) \right) \right] + \\ & + 8 \mu (\bar{H} - \bar{h}) + \frac{2 \mu (1 - \bar{R}_{\varepsilon 1}^2) (\bar{R}_i - 1)}{\bar{h}} + \frac{2 \mu (\bar{R}_{\varepsilon 1}^2 - \bar{R}^2) (\bar{R} - \bar{R}_{\varepsilon})}{h}; \end{aligned} \quad (6.21)$$

$$\text{де } 1 - \bar{R} = \frac{R_1 - R}{R_1} = m; \quad \bar{H} = \frac{H}{R_1}; \quad \bar{h} = \frac{h}{R_1}; \quad \bar{R}_i = \frac{R_i}{R_1}; \quad \bar{R}_{\varepsilon} = \frac{R_{\varepsilon}}{R_1}; \quad \bar{R}_{\varepsilon 1} = \frac{R_{\varepsilon 1}}{R_1}$$

Тоді

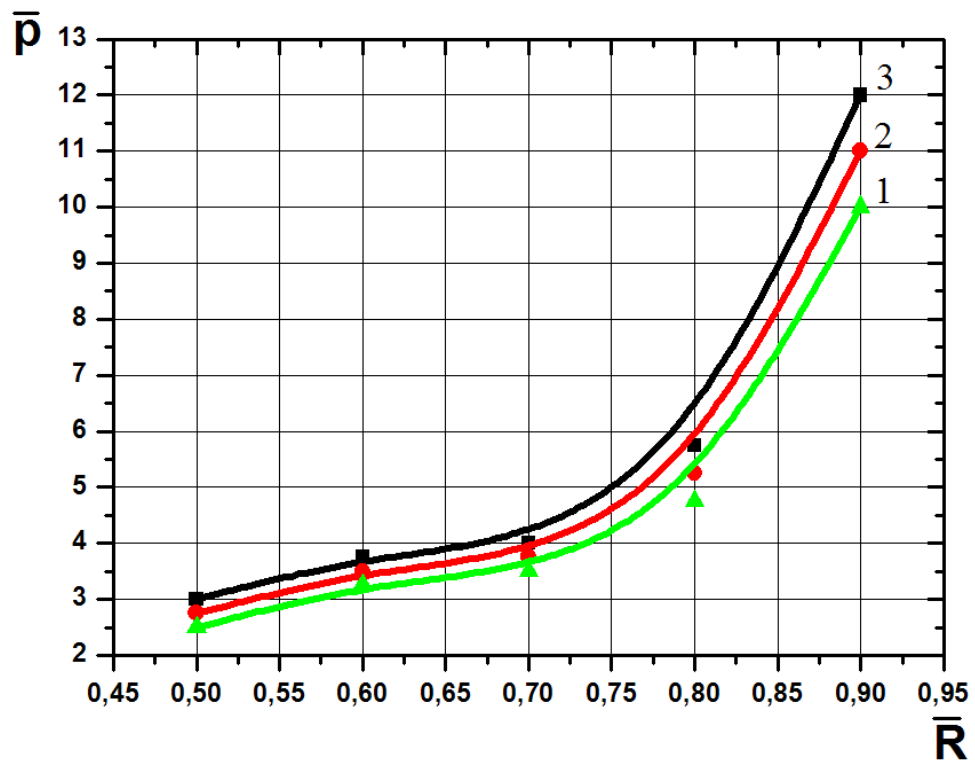
$$\begin{aligned} \bar{p} = & \frac{1}{(1 - m^2) \sqrt{3}} \left[\left(2 \ln \frac{1}{\bar{R}} \right) + \bar{h} (\bar{R}_{k1} + \bar{R} + 1) + \frac{1}{\bar{h}} \left((1 - \bar{R}) \bar{R}_{k1}^2 - \left(\frac{1}{3} - \frac{\bar{R}^3}{3} \right) \right) \right] + \\ & + 8 \mu (\bar{H} - \bar{h}) + \frac{2 \mu (1 - \bar{R}_{\varepsilon 1}^2) (\bar{R}_i - 1)}{\bar{h}} + \frac{2 \mu (\bar{R}_{\varepsilon 1}^2 - \bar{R}^2) (\bar{R} - \bar{R}_{\varepsilon})}{h}; \end{aligned} \quad (6.22)$$

Для наглядного відображення силового режиму при зміні геометричних параметрів процесу отримано графіки (рис. 6.5...6.7).



1 – $\mu_s=0,1$; 2 – $\mu_s=0,2$; 3 – $\mu_s=0,3$

Рисунок 6.5 – Графік залежності $\bar{p}$ від величини фланця $\bar{h}$



1 – $\mu_s=0,1$; 2 – $\mu_s=0,2$; 3 – $\mu_s=0,3$

Рисунок 6.6 – Графік залежності $\bar{p}$ від величини внутрішнього радіусу $\bar{R}$

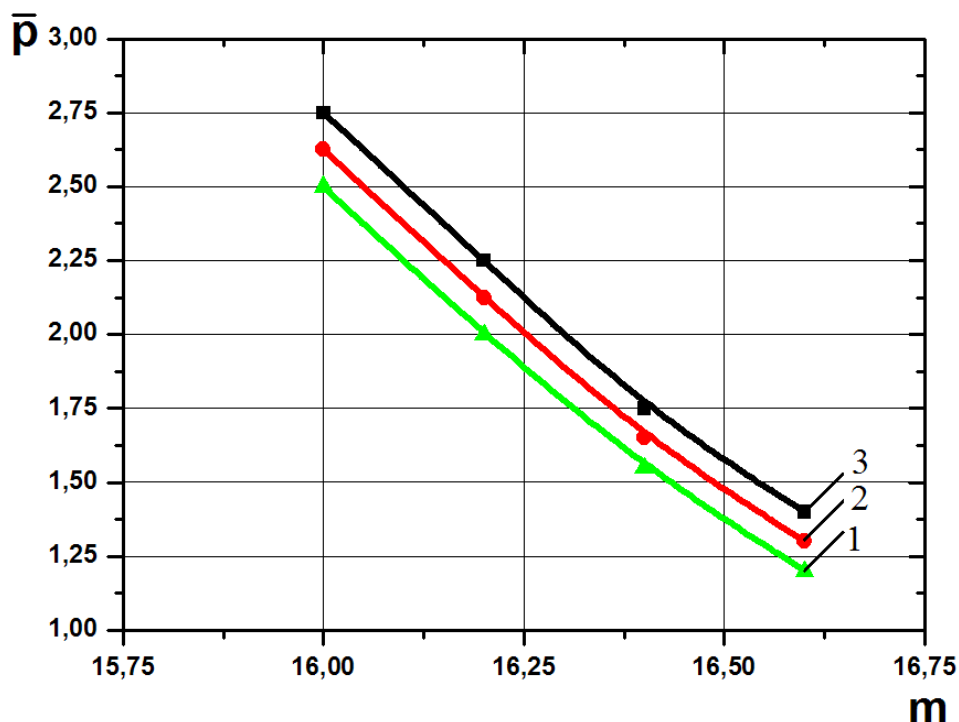


Рисунок 6.7 – Графік залежності $\bar{p}$ від товщини стінки m

Аналіз кривих наведених на рис. 6.5...6.7 показує, що збільшення товщини фланця до величини рівній 0,5 радіуса деталі призводить до зниження приведенного тиску, а подальше збільшення висоти фланця на величину тиску не впливає. Аналізуючи вплив внутрішнього радіуса на величину приведенного тиску можна зробити висновок, що збільшення радіуса призводить до нелінійного збільшення тиску. Вплив товщини стінки на приведений тиск виражено в монотонному зниженні приведенного тиску при збільшенні товщини.

6.1.3 Моделювання силового режиму процесу суміщеного радіального видавлювання деталі типу втулка з фланцями на основі планування експерименту

Моделювання процесу суміщеного видавлювання деталі типу втулка з фланцями проводилося в програмному продукті QForm 2D з граничними умовами: зміцнення алюмінієвого матеріалу АД31 описується кривою

зміцнення $\sigma_s = 19155 \cdot e^{0,202} \text{ МПа}$ при швидкості деформування $0,25 \text{ с}^{-1}$, густина матеріалу 2800 кг/м^3 ; модуль Юнга 71000 МПа ; коефіцієнт Пуассона $0,3$; коефіцієнт тертя за Левановим $\mu_s = 0,16$; швидкість переміщення інструментів 1 мм/с ; інструмент абсолютно жорсткий.

Картина поетапної формозміни при суміщеному видавлюванні представлена на рис. 6.8. Осередок деформування зосереджений на частині заготовки, яка безпосередньо деформується, і дорівнює висоті фланця. Максимальні значення логарифмічної деформації рівні $2 - 2,5$ (86%...91%) і спостерігаються на перехідних кромках інструментів.

Варійованими факторами обрані: відносна висота фланця ($\bar{h} = h/R_1$), відносний внутрішній радіус труби ($\bar{R} = R/R_1$) і контактне тертя (μ), де: R_1 – зовнішній радіус труби; R – внутрішній радіус труби, h – висота фланця. Інтервали варіювання факторів і їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому і нижньому рівнях вказані в таблиці рівнів факторів (табл. 6.2).

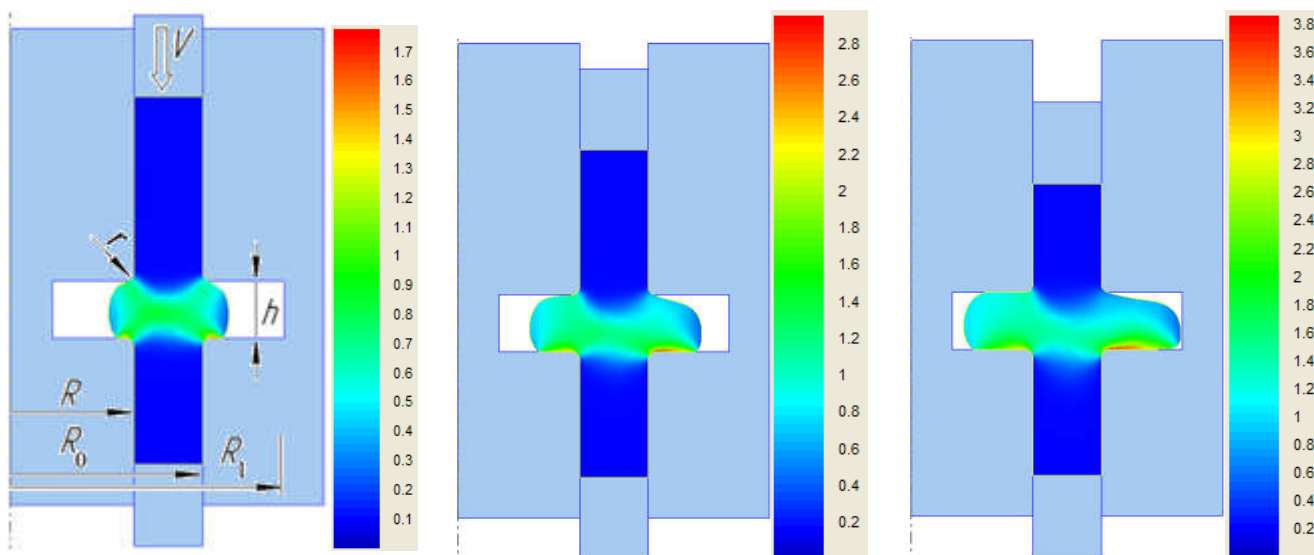


Рисунок 6.8 – Розподіл інтенсивності деформацій ε_i при суміщеному видавлюванні

Таблиця 6.2 – Рівні факторів

Фактори	X_1 ($\bar{h}$)	X_2 (μ)	X_3 ($\bar{R}$)
Основний рівень (X_{i_0})	0,22	0,2	0,64
Інтервал варіювання (ΔX_i)	0,07	0,2	0,19
Верхній рівень ($x_i=1$)	0,29	0,4	0,83
Нижній рівень ($x_i=-1$)	0,15	0	0,45

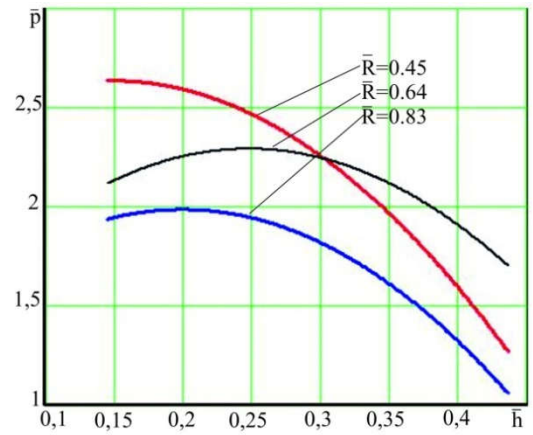
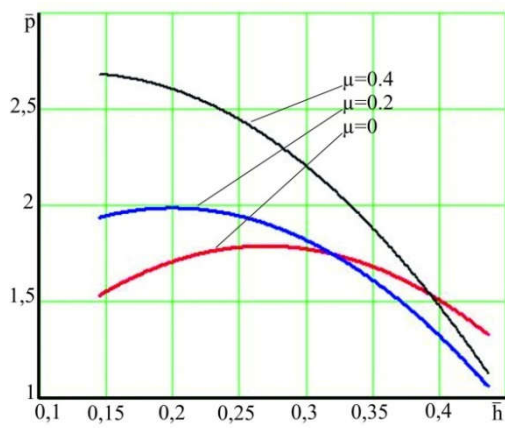
Рівняння регресії процесу суміщеного доцентрового і радіального видавлювання:

$$\begin{aligned}
 Y(h, \mu, R) = & b_0 + b_1 \cdot \frac{h-0.22}{0.07} + b_2 \cdot \frac{\mu-0.2}{0.2} + b_3 \cdot \frac{R-0.636}{0.182} + \left(b_{12} \cdot \frac{h-0.22}{0.07} \cdot \frac{\mu-0.2}{0.2} \right) + \\
 & + \left(b_{13} \cdot \frac{h-0.22}{0.07} \cdot \frac{R-0.636}{0.182} \right) + \left(b_{23} \cdot \frac{\mu-0.2}{0.2} \cdot \frac{R-0.636}{0.182} \right) + b_{11} \cdot \left(\frac{h-0.22}{0.07} \right)^2 + \\
 & + b_{22} \cdot \left(\frac{\mu-0.2}{0.2} \right)^2 + b_{33} \cdot \left(\frac{R-0.636}{0.182} \right)^2
 \end{aligned} \quad (6.23)$$

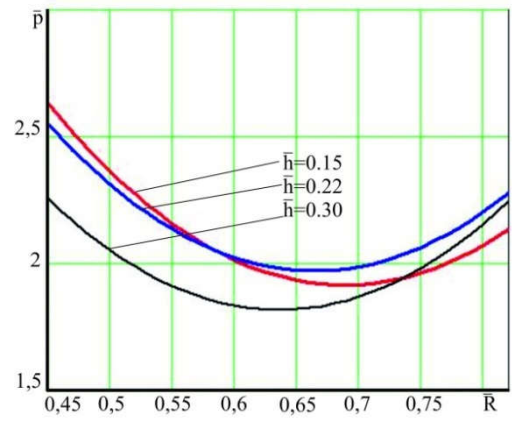
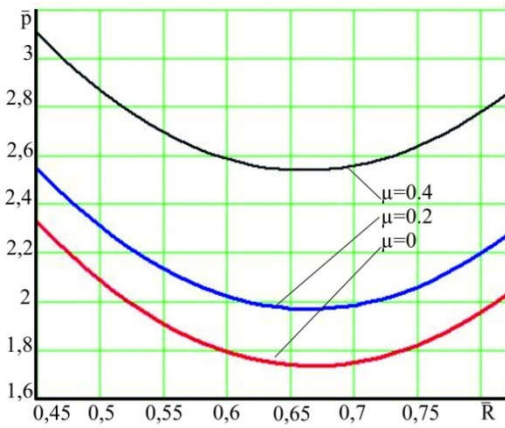
Коефіцієнти регресійного рівняння представлені в табл. 6.3.

Графіки залежності приведенного тиску видавлювання від варійованих параметрів (рис. 6.9), показали, що зі збільшенням відносної висоти фланця приведений тиск падає. Причиною тому служить зменшення ступеня деформації. При збільшенні відносного внутрішнього радіуса труби характер розподілу приведенного тиску змінний. Спостерігається мінімум тиску.

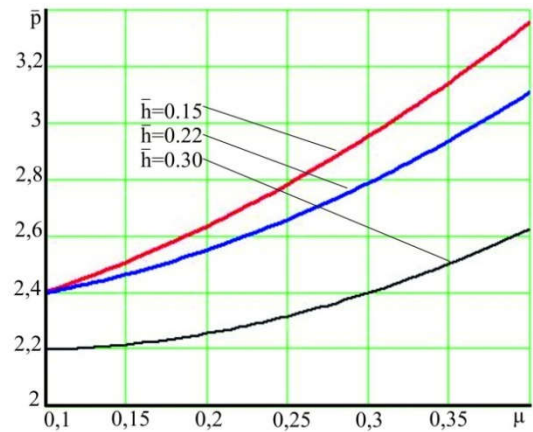
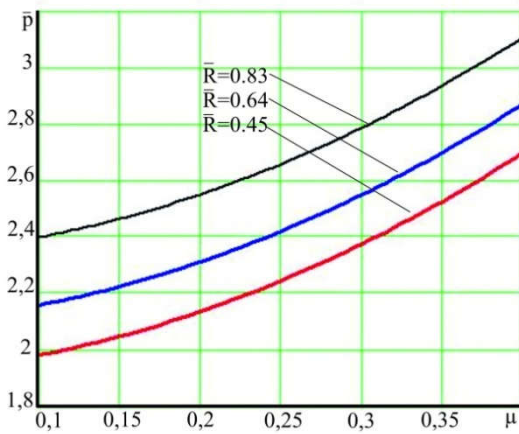
На рис. 6.10, залежність приведенного тиску розкриття матриці від варійованих параметрів, видно, що зі збільшенням відносної висоти фланця значення зростають. Таке спостерігається за рахунок зростання обсягу металу, який впливає під фланець. При зміні товщини стінки значення при веденого тиску мають змінний розподіл.



а

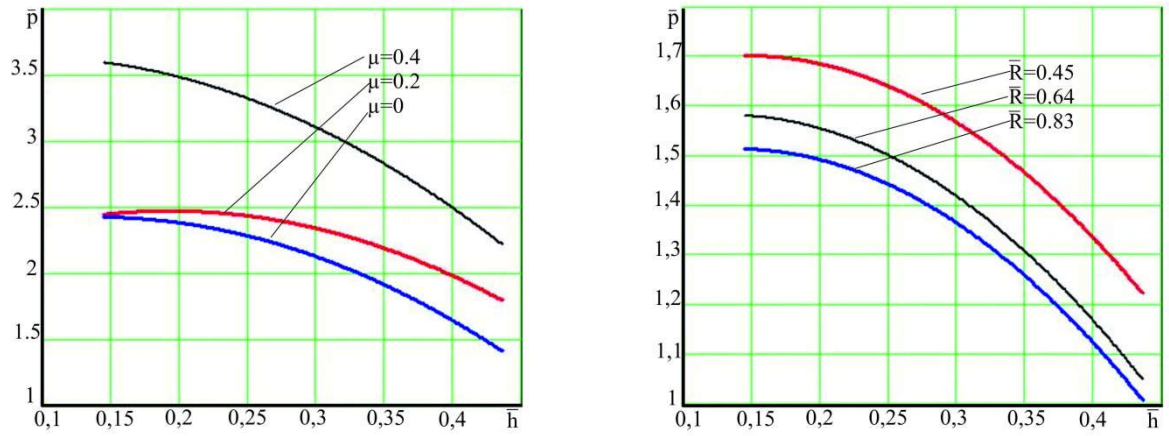


б

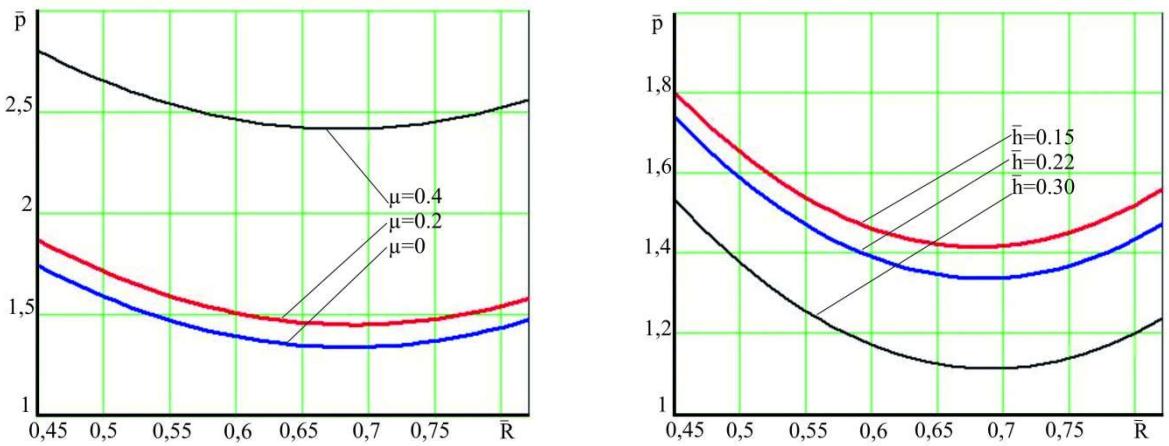


в

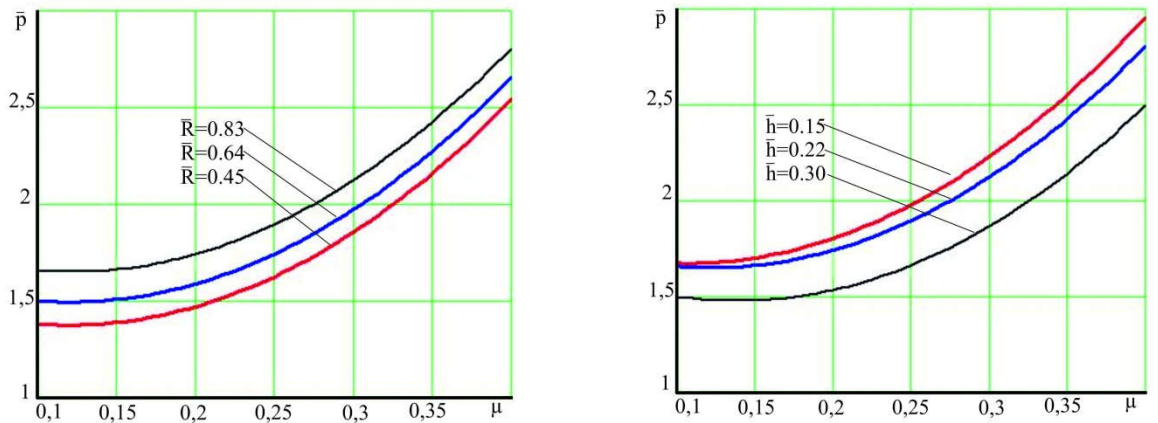
Рисунок 6.9 – Графіки залежності приведенного тиску видавлювання від відносної висоти фланця (а), від відносного внутрішнього радіусу труби (б) і тертя (в) при різних варійованих факторах



а



б



в

Рисунок 6.10 – Графіки залежності приведенного тиску розкриття матриці від відносної висоти фланця (а), від відносного внутрішнього радіусу труби (б) і тертя (в) при різних варійованих факторах

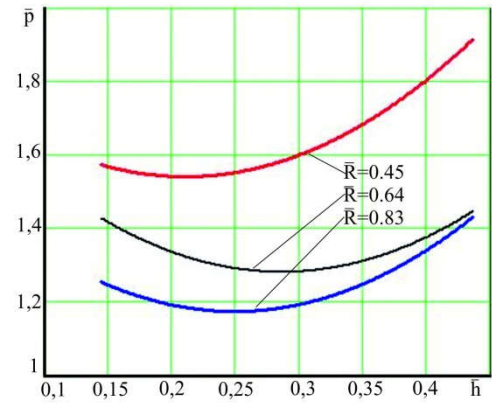
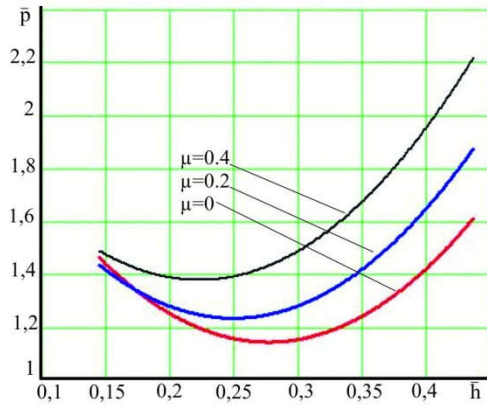
Неоднозначний характер розподілу приведенного тиску розкриття оправлення (рис. 6.11) говорить про те, що при різній геометрії процесу внутрішній фланець заповнюється по-різному.

На всіх графіках, де показані залежність енергосилових параметрів процесу суміщеного радіального видавлювання деталі типу втулка з фланцями від тертя, зберігається характер зростання значень зі збільшенням контактного тертя.

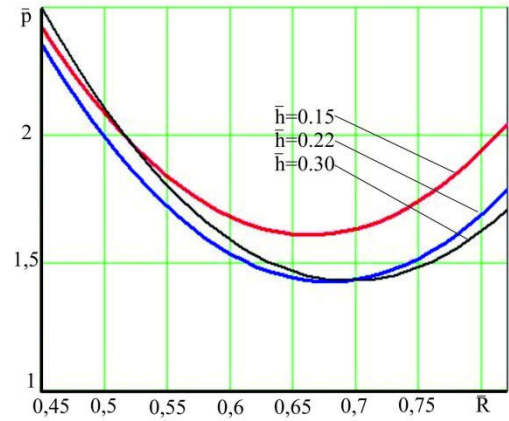
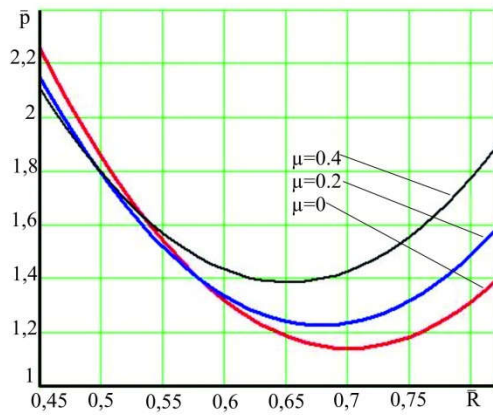
Таблиця 6.3 – Коефіцієнти регресійного рівняння

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Енергосилові параметри видавлювання										
Р, кН	491	13,5	43,5	-130	-90,7	235,6	36,9	9,07	74,06	119,06
р, МПа	365	-11,4	78,4	-25,5	-30,5	20,1	1,9	-11,8	34,1	84,8
$\bar{p}$	1,9	-0,05	0,4	-0,13	-0,16	0,11	0,012	-0,08	0,17	0,4
Енергосилові параметри розкриття матриці										
Р, кН	31,2	-3,0	32,0	-2,0	-7,5	-8,8	1,3	-6,3	33,8	8,8
р, МПа	67,2	-25,0	89,5	-25,3	-21,1	0,16	3,3	-13,0	114,4	44,6
$\bar{p}$	0,4	-0,13	0,5	-0,13	-0,09	0,013	0,013	-0,06	0,6	0,2
Енергосилові параметри розкриття оправлення										
Р, кН	24,1	-13,0	-5,0	-20,9	3,8	8,8	16,3	25,9	25,9	5,4
р, МПа	88,4	-13,0	14,1	-54,0	10,4	-19,3	28,0	15,8	6,7	109,3
$\bar{p}$	0,5	-0,07	0,08	-0,3	0,07	-0,1	0,2	0,09	0,04	0,6
Формоутворення										
$\frac{V_{\text{всеред.фланця}}}{V_{\Sigma}}$	0.33	-0.035	0.02	0.05	0.03	-0.09	-0.02	-0.02	-0.01	-0.06

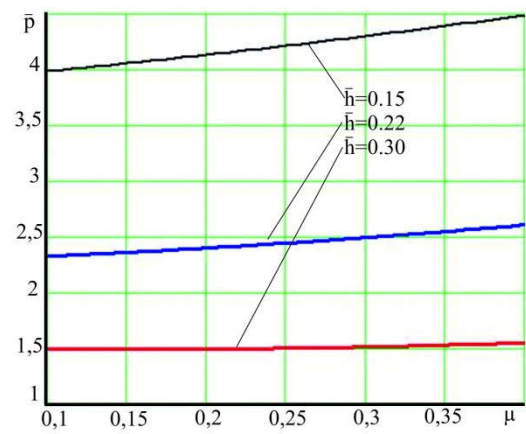
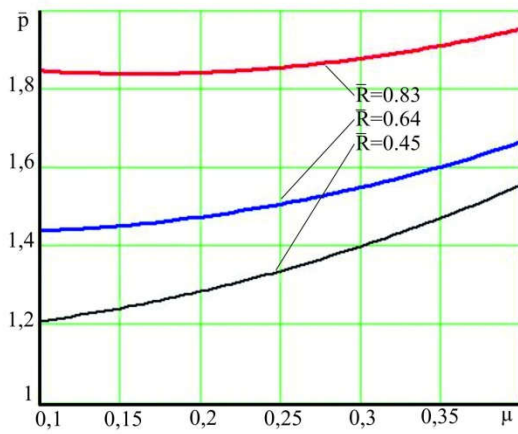
Формозміна заготовки описана графіками, показаними на рис. 6.12. При збільшенні відносної висоти фланця характер кривої заповнення внутрішнього фланця має параболічний характер. Коли значення



а



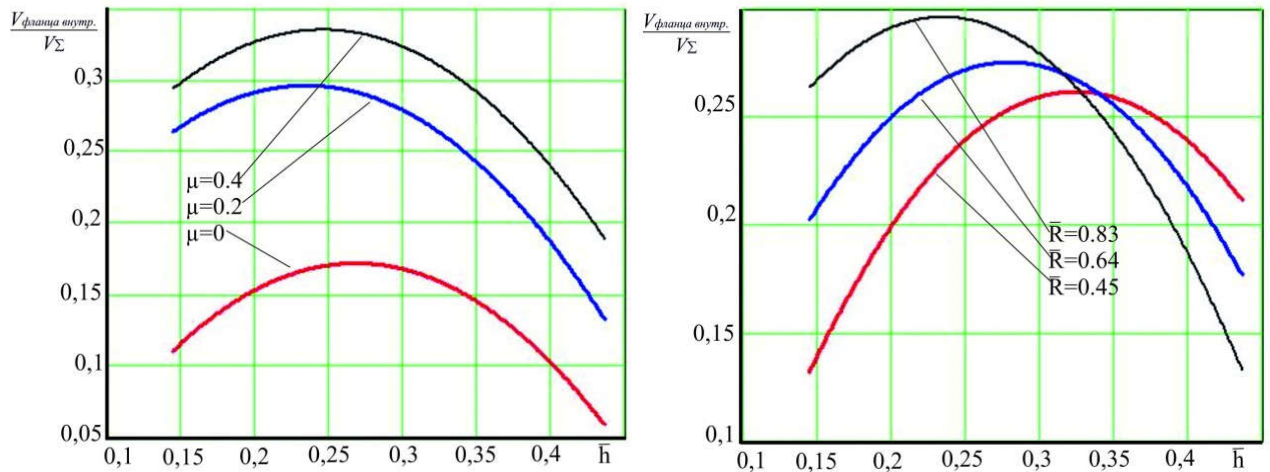
б



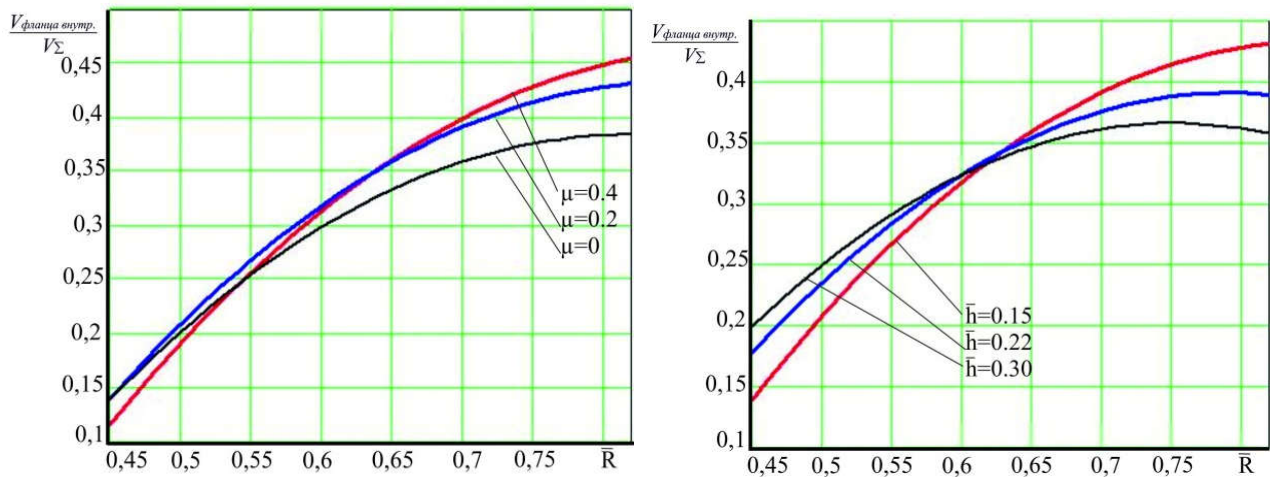
в

Рисунок 6.11 – Графіки залежності приведенного тиску розкриття оправлення від відносної висоти фланця (а), від відносного внутрішнього радіуса труби (б) і тертя (в) при різних варійованих факторах

спостерігається максимальне значення. З подальшим збільшення значень заповнення внутрішнього фланця зменшується, так як утворенню зовнішнього фланця сприяють додаткові напруження розтягу. Зі збільшенням відносного внутрішнього радіусу труби зростає заповнення внутрішнього фланця, так як зменшується вплив окружних напружень.



а



б

Рисунок 6.12 – Графіки залежності формозміни від відносної висоти фланця (а) і від відносного внутрішнього радіусу труби (б) при різних варійованих факторах

6.2 Визначення ступеню використання ресурсу пластичності на основі методу скінченних елементів

Провівши моделювання процесу висадки було встановлено, що осередок течії матеріалу розходитьсся в двох напрямках. Межа розподілу течії проходить приблизно по центру заготовки, трохи зрушуючи в бік зовнішнього фланця. Це пояснюється наявністю додаткових напружень, що розтягуються в процесі радіального плину металу. На торцях фланця утворюється сфера, що є наслідком пригальмовування зовнішніх шарів металу (які стикаються з інструментом) за рахунок контактного тертя.

Результати розрахунків напружено-деформованого стану (рис. 6.13) були використані для оцінки значень використаного ресурсу пластичності Ψ , який визначали за критерієм І. О. Сивака.

Для розрахунку використаного ресурсу пластичності в скінченно-елементної моделі задавалося поле трасованих точок (по висоті 20 точок, по товщині 50 точок). Розглядалася криві, побудовані за трасованими точкам, розташованим по контуру зовнішнього фланця і по межі поділу течії металу. Графіки розподілу вихідних параметрів для розрахунку використаного ресурсу пластичності і отримані значення (рис. 6.14...6.16) наведені в залежності від номера трасованої точки ($\bar{h} = h/R_1 = 0,2$); ($\bar{R} = R/R_1 = 0,45$); ($\bar{R}' = R_0/R_1 = 0,25$); ($\bar{r} = r/R_1 = 0,03$).

На рис. 6.16, б видно, що згідно розподілу ресурсу пластичності точка 4 має максимальне значення, а значить саме в цій точці прогнозується руйнування. Провівши дослідження в даній точці до повного вичерпання ресурсу пластичності, отримали графік розподілу ресурсу пластичності від ступеня деформації (рис. 6.17). На графіку видно, що при досягненні логарифмічної степені деформації $e = 0,79$ настає вичерпання ресурсу пластичності, тобто руйнування.

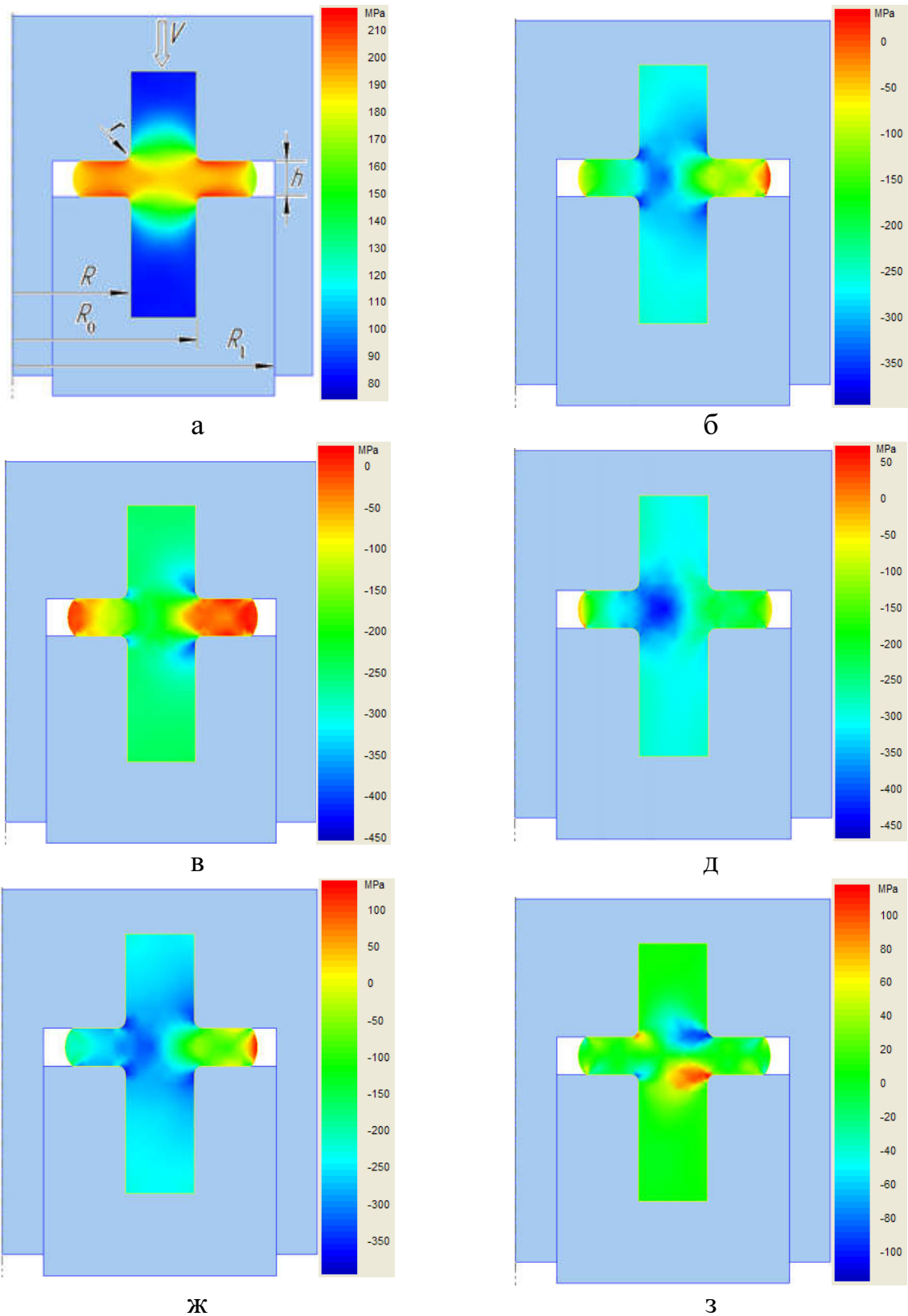


Рисунок 6.13 – Компоненти напружено-деформованого стану процесу висадки: інтенсивність напружень – σ_i (а), середнє напруження (гідростатичний тиск) – σ_0 (б), радіальне напруження – σ_r (в), осьове напруження – σ_z (д), тангенціальне напруження – σ_θ (ж), напруження зсуву – τ_{rz} (з)

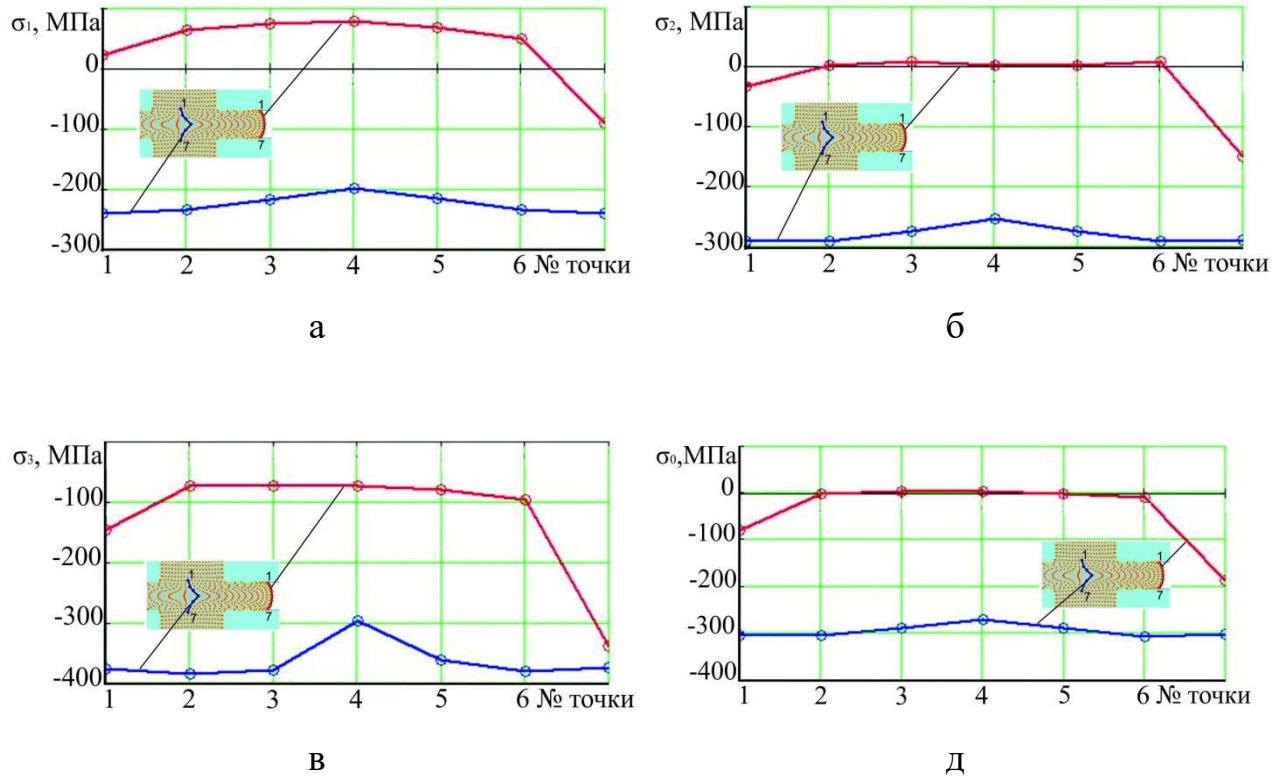


Рисунок 6.14 – Графік розподілу значень напруження головного тензора (а, б, в) і гідростатичного напруження (д) в залежності від положення трасованої точки

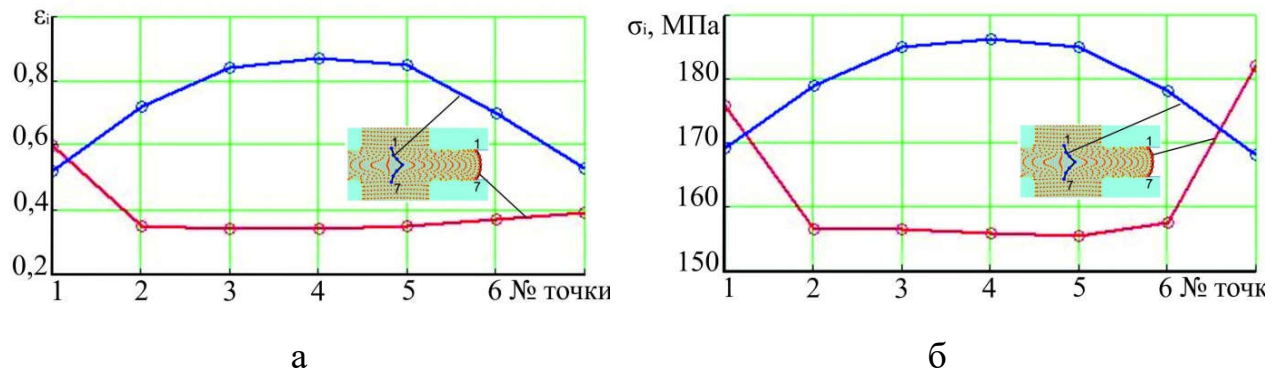


Рисунок 6.15 – Графік розподілу інтенсивності деформацій (а) і опору деформації (б) в залежності від положення трасованої точки

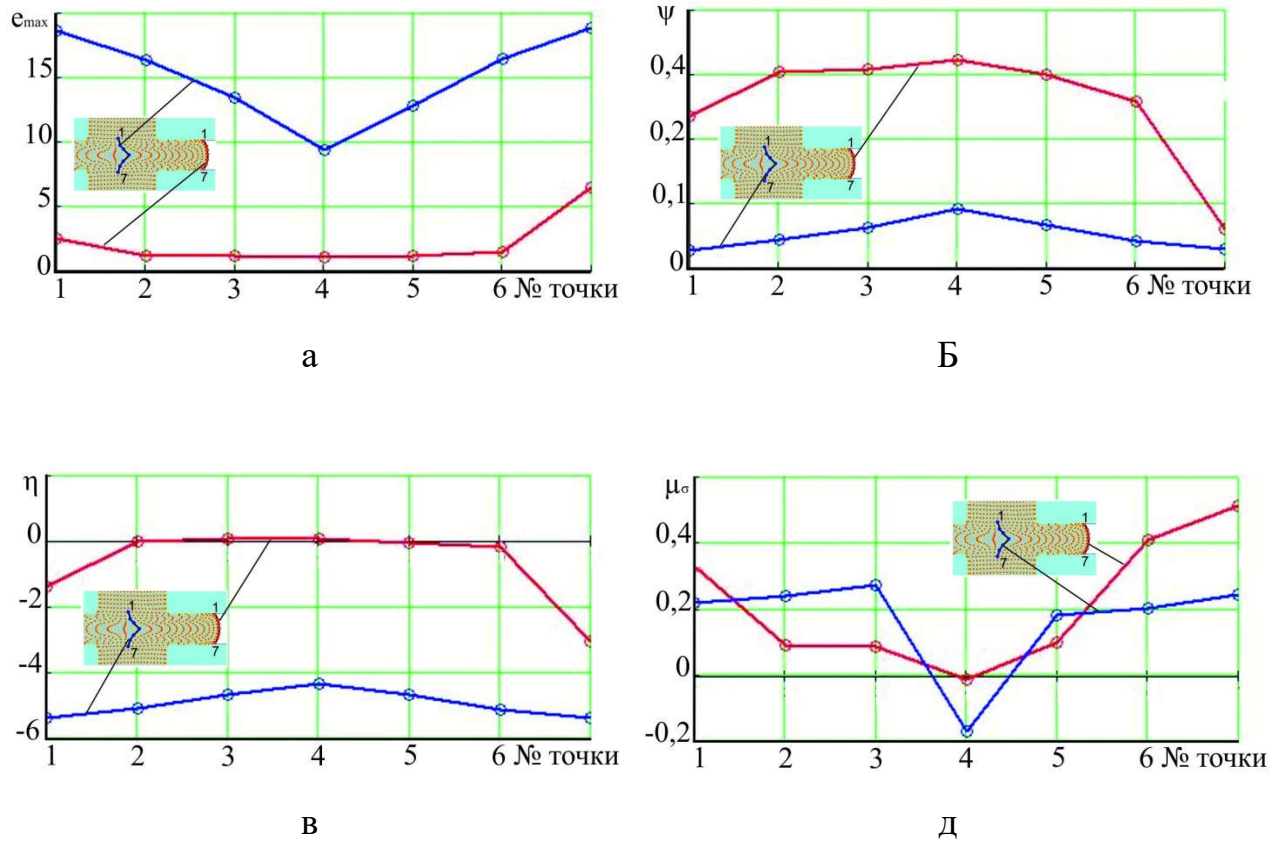


Рисунок 6.16 – Графік розподілу значень максимальної логарифмічної деформації (а), ресурсу пластичності (б), показника жорсткості напруженого стану (в) і показника Надаї-Лоде (д) в залежності від положення трасованої точки

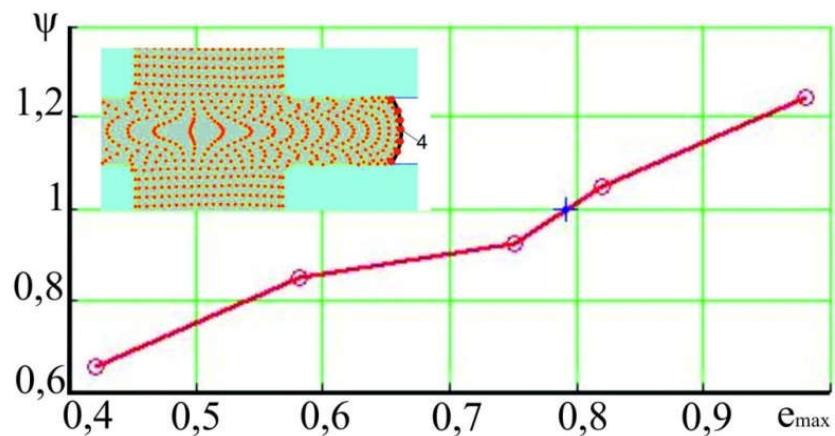


Рисунок 6.17 – Графік розподілу ресурсу пластичності в залежності від ступеня деформації в точці ймовірного руйнування

Альтернативним способом отримання внутрішніх і зовнішніх фланців є процес суміщеного радіального видавлювання. Для порівняння ресурсу пластичності проведені аналогічні дослідження. Згідно картинам напружено-деформованого стану (рис. 6.18) та графікам розподілу вихідних параметрів (рис. 6.19...6.21) небезпечною з точки зору можливого руйнування є точка 2. Дана точка розташована ближче до верхньої півматриці в порівнянні з процесом висадки. Проведені дослідження показали (рис. 6.22), що у випадку суміщеного радіального видавлювання максимальна степінь деформування досягає $e=0,72$ що є дещо нижче ніж при висадці ($\bar{h}=h/R_1=0,2$); ($\bar{R}=R/R_1=0,45$); ($\bar{R}'=R_0/R_1=0,25$); ($\bar{r}=r/R_1=0,03$).

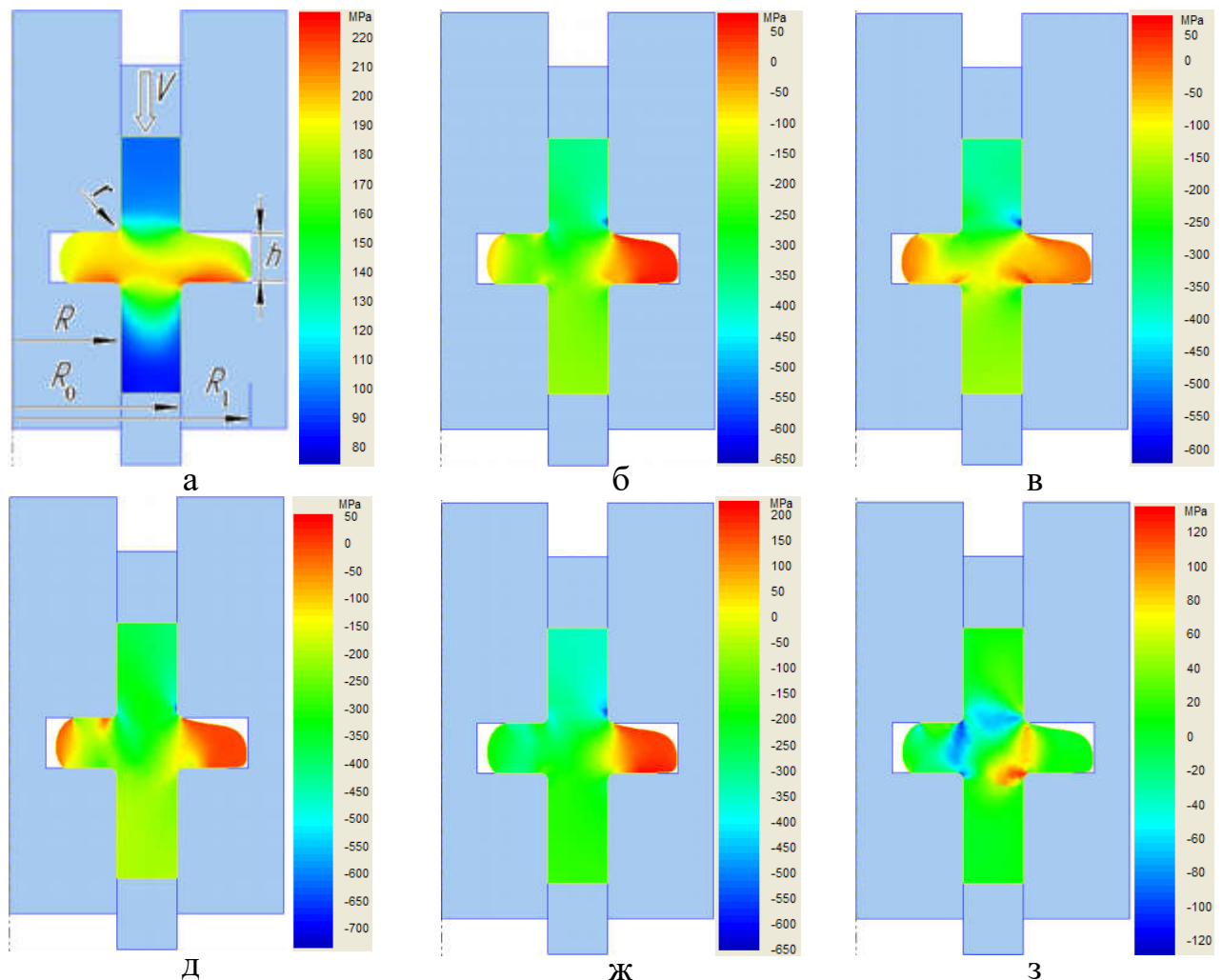


Рисунок 6.18 – Компоненти напружено-деформованого стану процесу суміщеного видавлювання: інтенсивність напружень – σ_i (а), середнє напруження (гідростатичний тиск) – σ_0 (б), радіальне напруження – σ_r (в), осьове напруження – σ_z (д), тангенціальне напруження – σ_θ (ж), напруження зсуву – τ_{rz} (з)

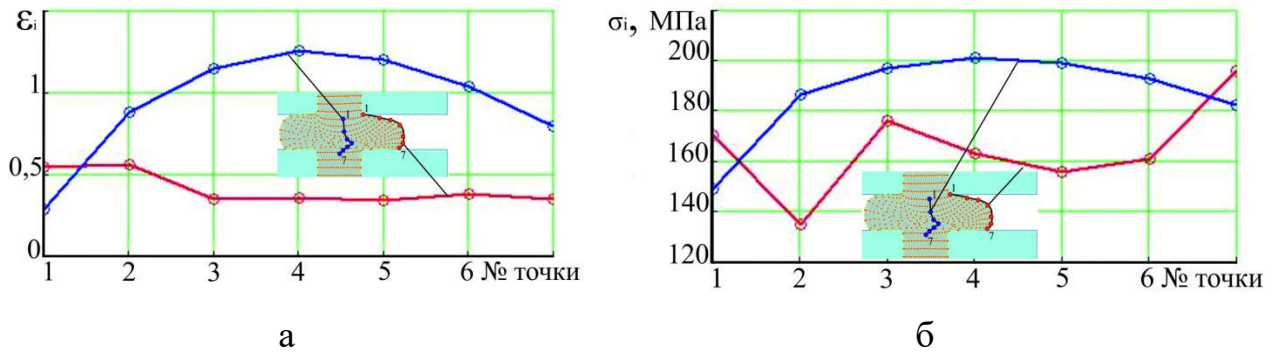


Рисунок 6.19 – Графік розподілу інтенсивності деформацій (а) і опору деформації (б) в залежності від положення трасованої точки

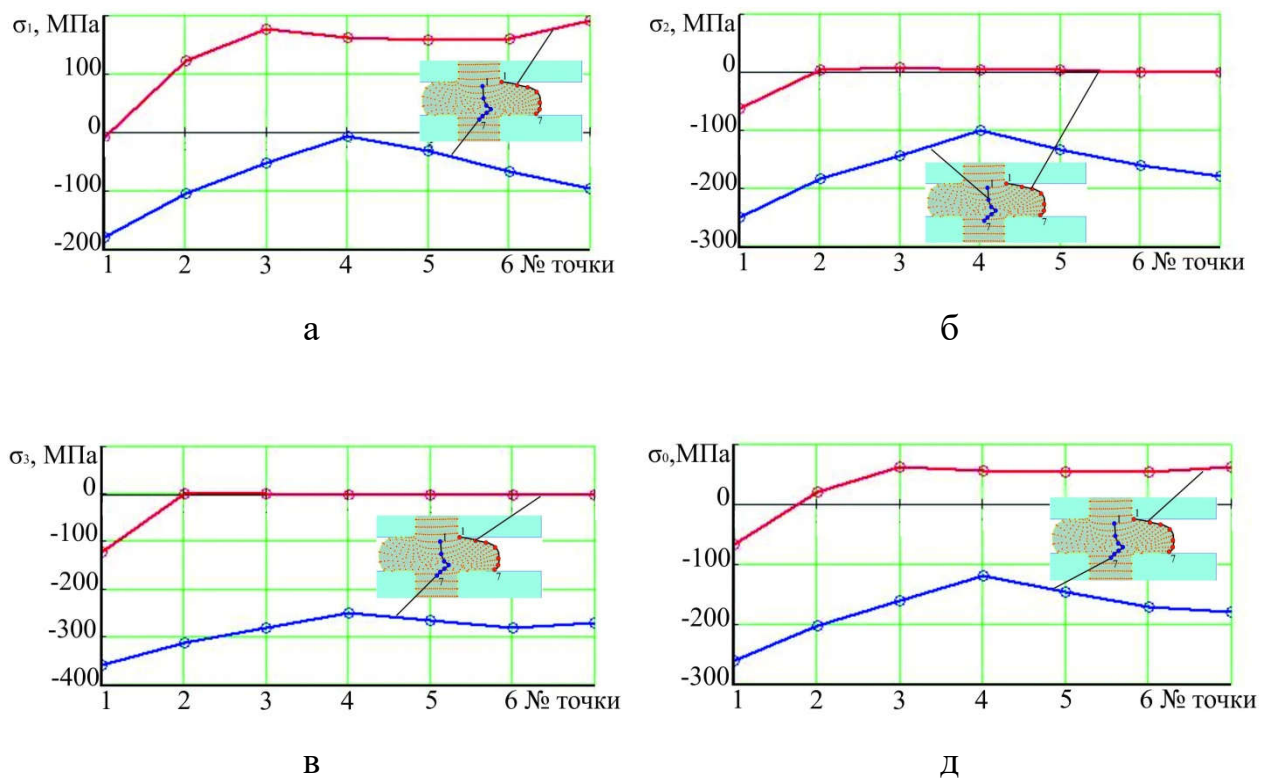


Рисунок 6.20 – Графік розподілу значень напруження головного тензора (а, б, в) і гідростатичного напруження (д) в залежності від положення трасованої точки

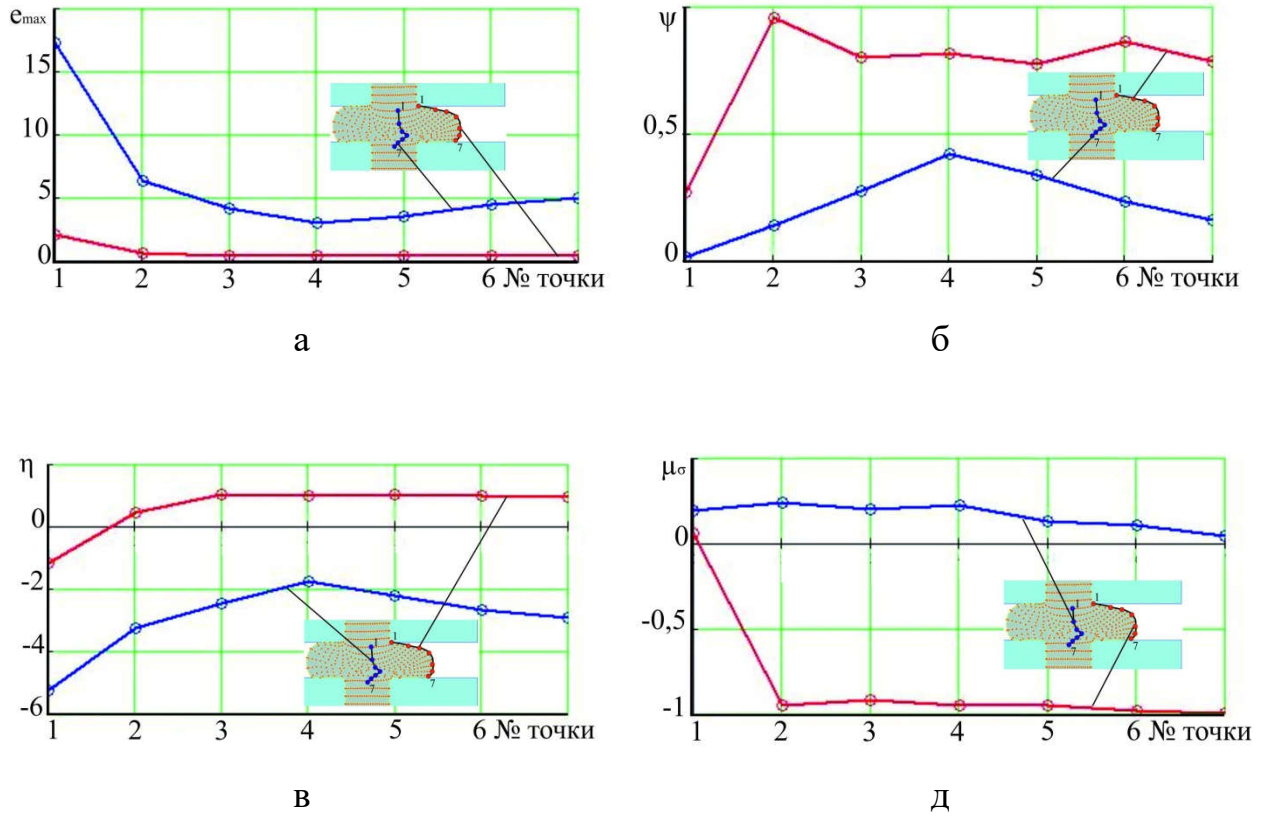


Рисунок 6.21 – Графік розподілу значень максимальної логарифмічної деформації (а), ресурсу пластичності (б), показника жорсткості напруженого стану (в) і показника Надаї-Луде (д) в залежності від положення трасованої точки

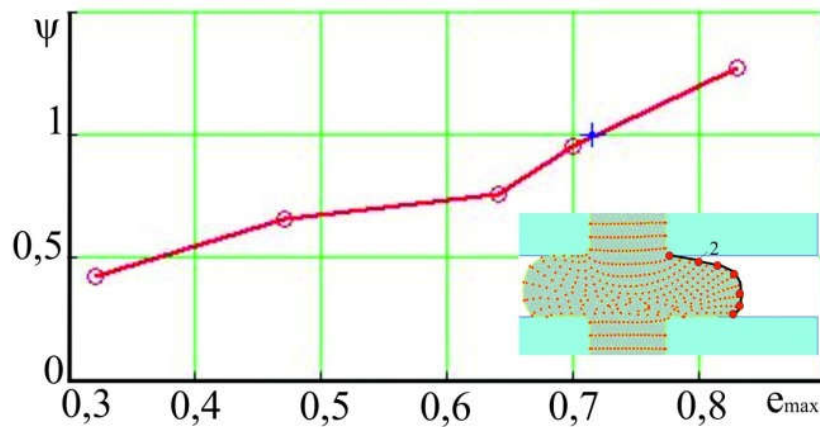


Рисунок 6.22 – Графік розподілу ресурсу пластичності в залежності від ступеня деформації в точці ймовірного руйнування

6.3 Аналіз кінематики формозмінення для усунення дефектів типу утягнення

При формування зовнішніх та внутрішніх фланців за схемою суміщеного доцентрового та радіального видавлювання (рис. 6.23) при відносно тонкій стінці t з формуванням відносно високих фланців висотою h спостерігається дефект у вигляді утягнення на внутрішньому фланці (рис. 6.24) – матеріал заготовки АМцМ.

Причинами утворення такого дефекту слугують втрата стійкості заготовки в осередку деформування та вплив радіальних розтягуючих напружень. Набір математичних моделей дозволив встановити, що для бездефектного деформування за схемою суміщеного видавлювання варто дотримуватися наступних співвідношень $h/t < 1,6$ та $R_1/R_0 < 0,6$. Отримані бездефектні моделі показані на рис. 6.25.

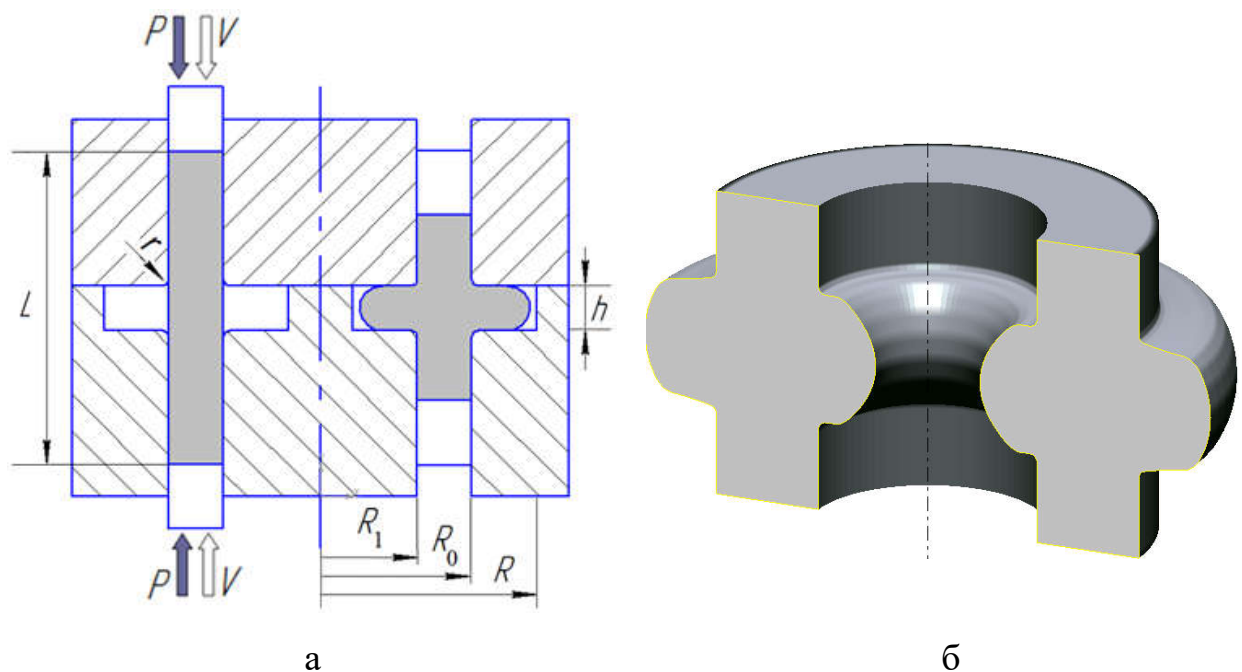
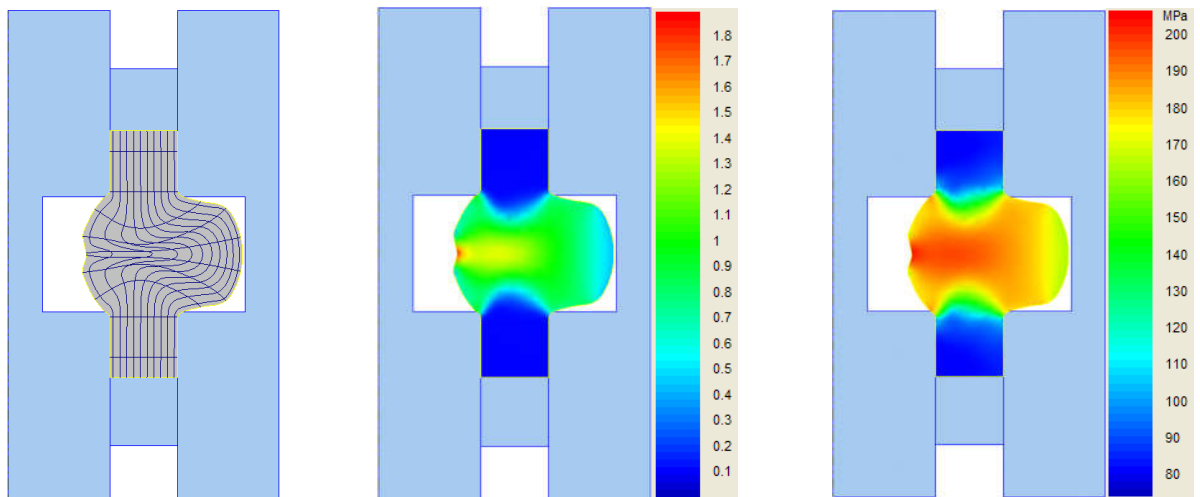
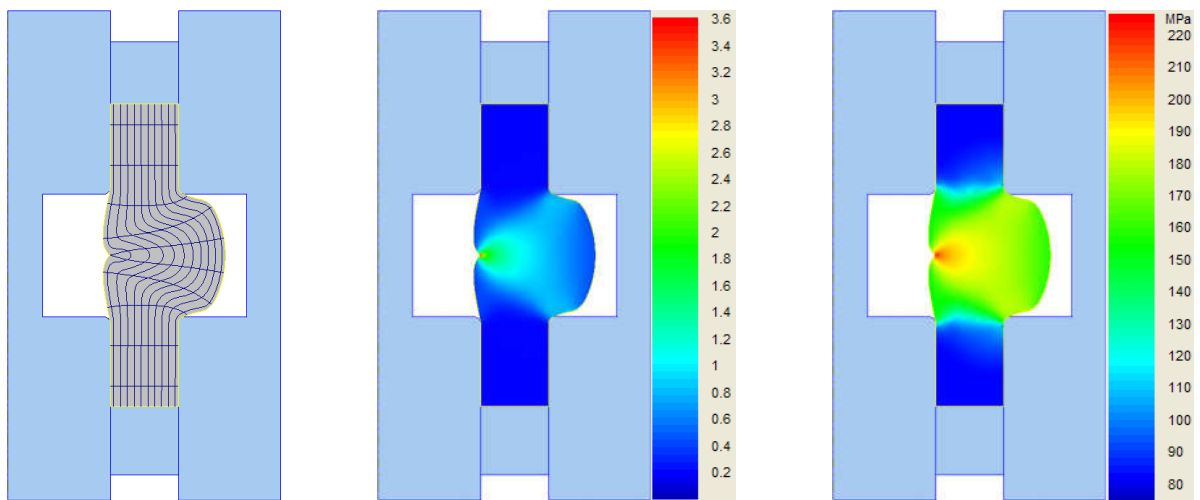


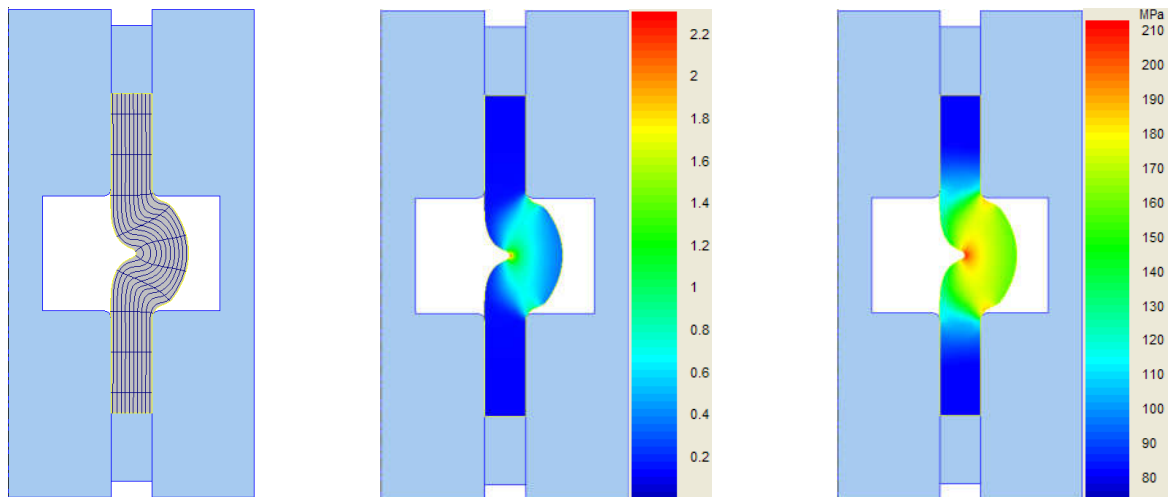
Рисунок 6.23 – Схема суміщеного радіального видавлювання з двосторонньою подачею (а) та отриманий напівфабрикат (б)



$R_1/R_0=0,6$; $R_1=7,5$; $R_0=12,5$; $h/t=1,7$; $h=8,5$; $t=5$

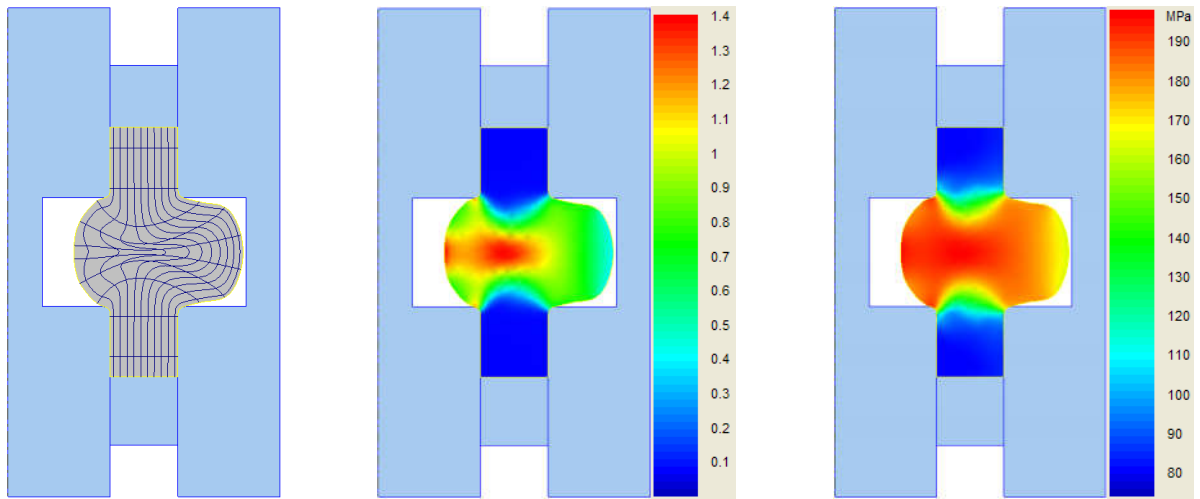


$R_1/R_0=0,6$; $R_1=7,5$; $R_0=12,5$; $h/t=1,8$; $h=9$; $t=5$

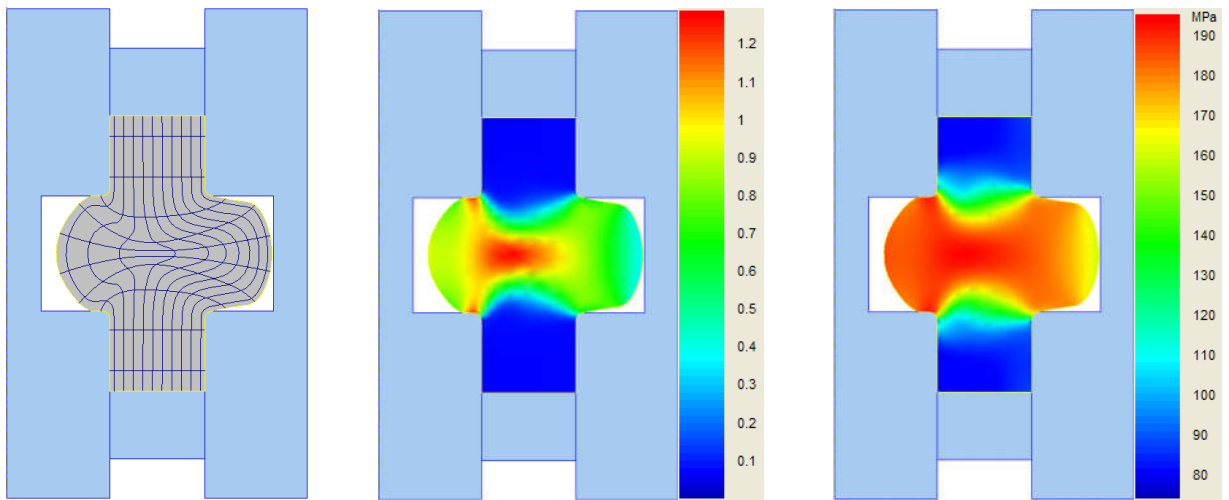


$R_1/R_0=0,7$; $R_1=7,5$; $R_0=10,5$; $h/t=2,8$; $h=8,5$; $t=3$

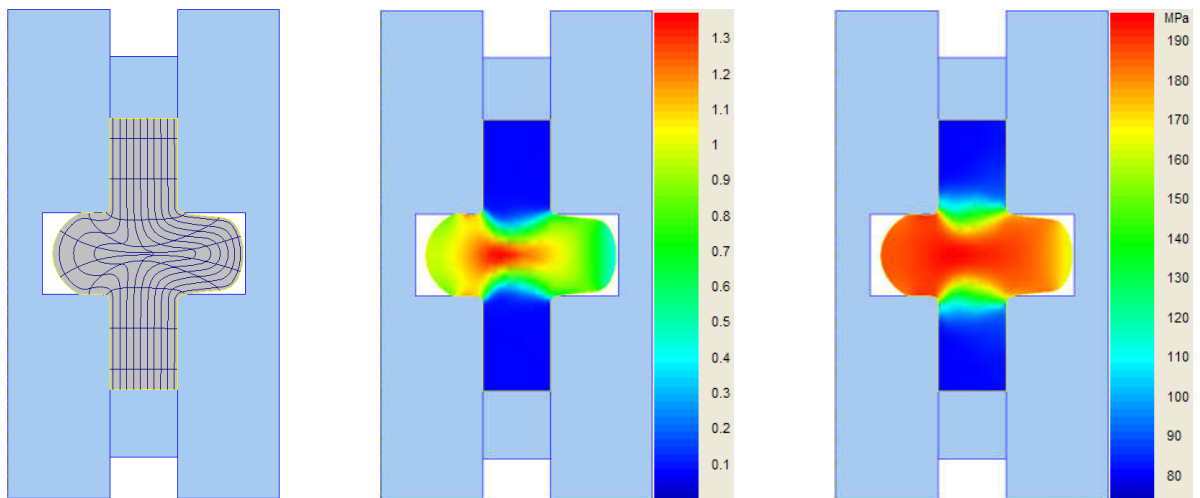
Рисунок 6.24 – Утворення дефекту утягнення на внутрішньому фланці



$$R_1/R_0=0,6; R_1=7,5; R_0=12,5; h/t=1,6; h=8; t=5$$



$$R_1/R_0=0,5; R_1=7,5; R_0=14,5; h/t=1,2; h=8,5; t=7$$



$$R_1/R_0=0,6; R_1=7,5; R_0=12,5; h/t=1,2; h=6; t=5$$

Рисунок 6.25 – Формування внутрішнього та зовнішнього бездефектного фланця за схемою суміщеного видавлювання

При отриманні порожнистих виробів з фланцем та поліпшення якості деталей типу стакану з фланцем (матеріал заготовки АМцМ) за рахунок усунення утягнення біля дна порожнини (рис. 6.26). Для усунення утягнення застосовується радіально-зворотне видавлювання металу в порожнину, утворену півматрицями, з радіальною течією металу в кругову поперечну порожнину з формуванням фланця та зі зворотною течією металу з формуванням стінки виробу, в результаті чого отримують порожнисті вироби типу стакану з фланцем. На заключній стадії процесу деформування виконується осадка утвореного фланця переміщенням верхньої півматриці. При осадженні фланця метал тече також в напрямку до центру заготовки, що сприяє заповненню утягнення. Таким чином, утягнення усувається, в результаті чого підвищується якість деталі типу стакану з фланцем, що штампується. Технологічна порожнина може бути виконана як на горизонтальній площині, так і у вертикальній, і описуються значеннями X та Y відповідно. Варіювання розмірів порожнини X та Y показало, що при усуненні утягнення за рахунок горизонтальної порожнини значення $X > 5$ (рис. 6.27, а). При усуненні дефекту за рахунок вертикальної порожнини значення Y рекомендоване менше 2 (рис. 6.27, б). При досягненні необхідних розмірів виробу рух інструментів припиняється.

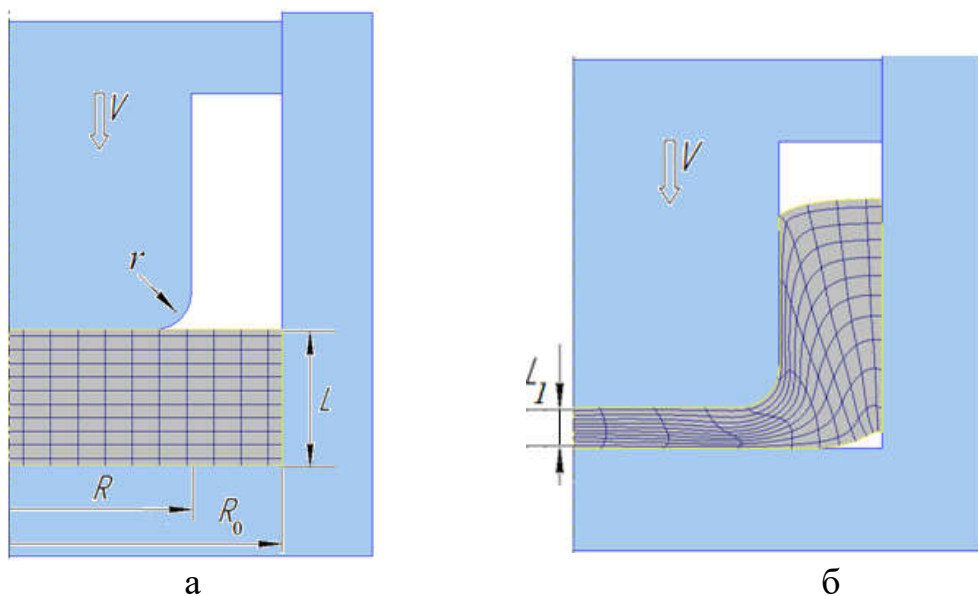


Рисунок 6.26 – Радіально-зворотне видавлювання з технологічною порожниною: $R_0=15$ мм, $R=10$ мм, $r=2$ мм, $L=7,5$ мм, $L_1=2$ мм

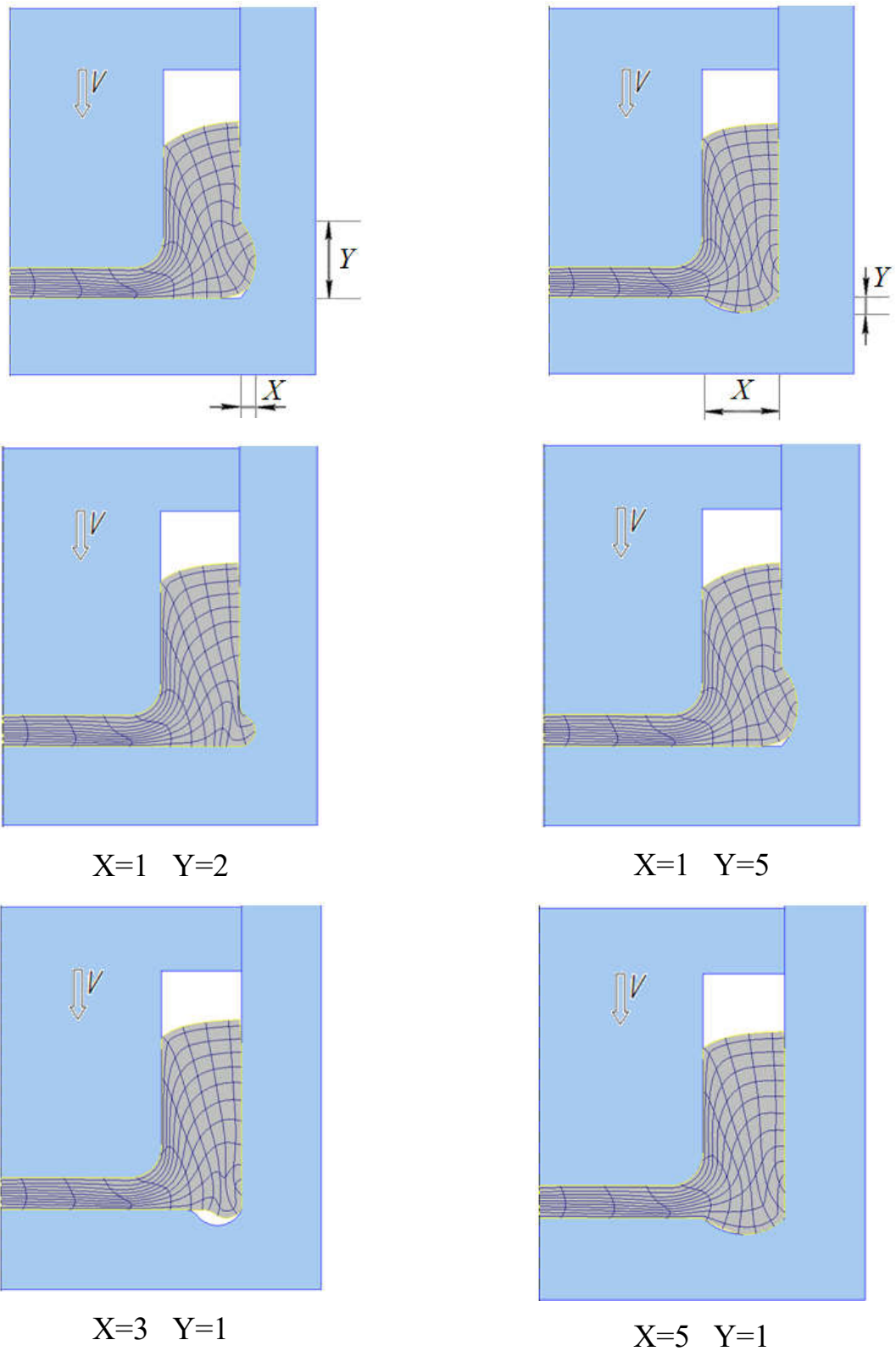


Рисунок 6.27 – Вибір геометричних параметрів технічної порожнини для усунення дефекту утягнення: горизонтальне (а) та вертикальне (б) розташування

6.4 Моделювання процесу радіально-прямого видавлювання

У зв'язку з ускладненням і збільшенням кількості випуску машин і механізмів, стала більшою потреба в розширенні номенклатури виробів складної форми. Великим попитом стали використовувати складнопрофільовані деталі типу втулок зі змінною товщиною стінки, які в основній своїй масі виготовляються механічною обробкою різанням.

Ресурсозберігаючими процесами виготовлення пустотілих виробів є зворотне або пряме видавлювання, для яких характерно збільшена кількість переходів, високі енергосилові параметри. Процес радіально-прямого видавлювання відноситься до групи нових маловивчених способів видавлювання з інтенсивною роздачею, що дозволяє отримати порожнисті вироби з поперечними розмірами, що перевищують розміри заготовки, а також складнопрофільовані стакани зі змінною і постійною товщиною стінки по висоті.

Початкова стадія процесу радіально-прямого видавлювання пустотілих деталей характеризується радіальним плином матеріалу заготовки, для якого характерні переважно окружні напруження, що розтягують та сприяють зниженню пластичності металу і появи тріщин на периферії фланця. Гранична ступінь деформації при видавлюванні фланців залежить від пластичних властивостей матеріалу заготовки і геометричних параметрів процесу. Для підвищення граничного ступеня деформації при видавлюванні фланців необхідно застосовувати схеми, що включають комбінування радіального видавлювання і висадки, схеми з знакозмінними деформаціями або схеми, що підвищують гідростатичний тиск в області фланця.

Найбільша точність розмірів і форми, видавлених деталей досягаються застосуванням процесів закритого радіального видавлювання. Недоліком цього процесу є значне зростання сили деформування і дефектоутворення на стадії формування стінки стакану.

6.4.1 Дослідження напружено-деформованого стану та силового режиму при радіально-прямому видавлюванні

Для аналізу основних параметрів процесу проведено моделювання радіально-прямого видавлювання з односторонньою подачею без оправки (рис. 6.28, а) та на оправці (рис. 6.28, б) – матеріал заготовки АМцМ, $t=R'-R$, $t'=R_0-R''$.

Аналіз напружено-деформованого стану (рис. 6.29) показав, що осередок деформування по висоті обмежується висотою приймальної порожнини, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в нижній частині осередку деформації. Інтенсивність напружень в осередку деформування розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення. Зміна геометричних параметрів процесу призводить до незначної зміни напружено-деформованого стану. Встановлено, що при збільшенні відносної товщини стінки стакану ступінь деформування знижується. Збільшення радіусу заокруглення на протипуансоні призводить до зниження інтенсивності деформацій в зоні розвороту матеріалу і знижує концентрацію напружень, що є позивним ефектом.

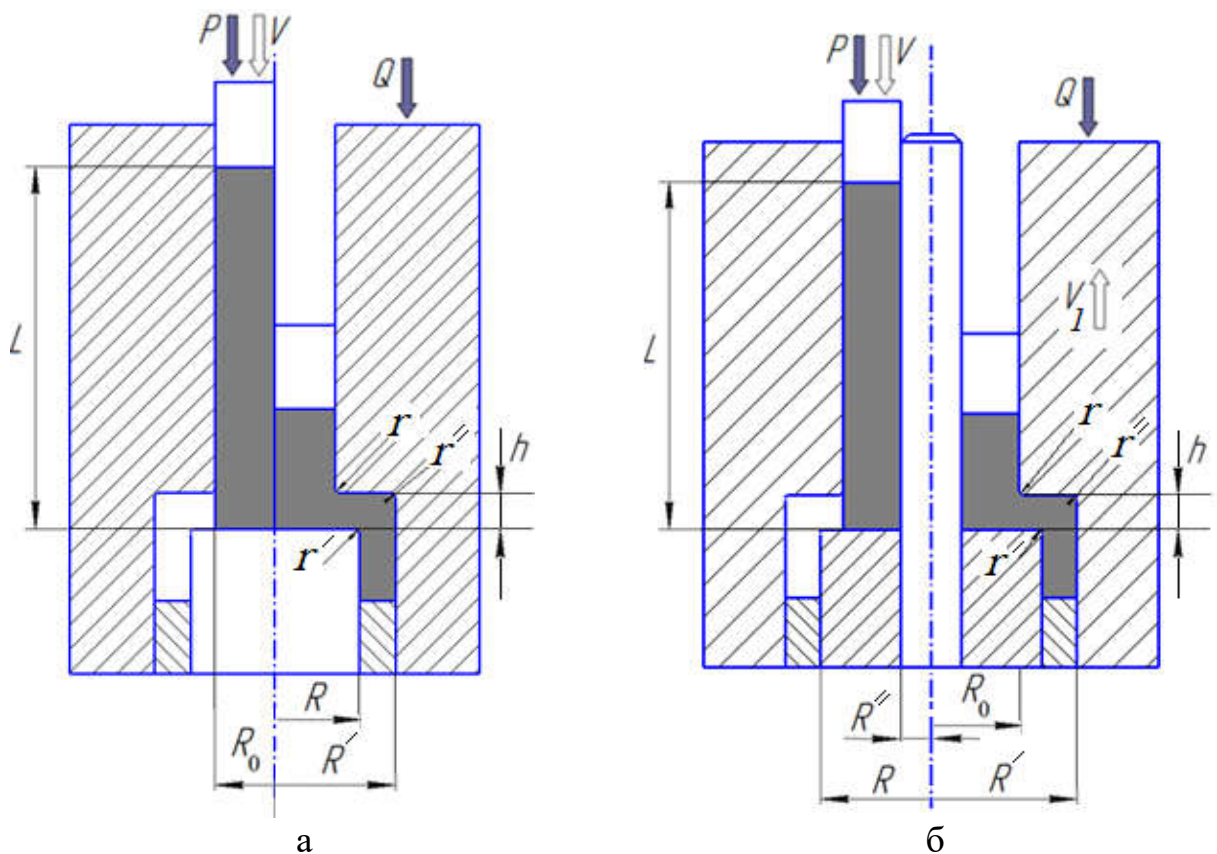


Рисунок 6.28 – Схеми радіально-прямого видавлювання

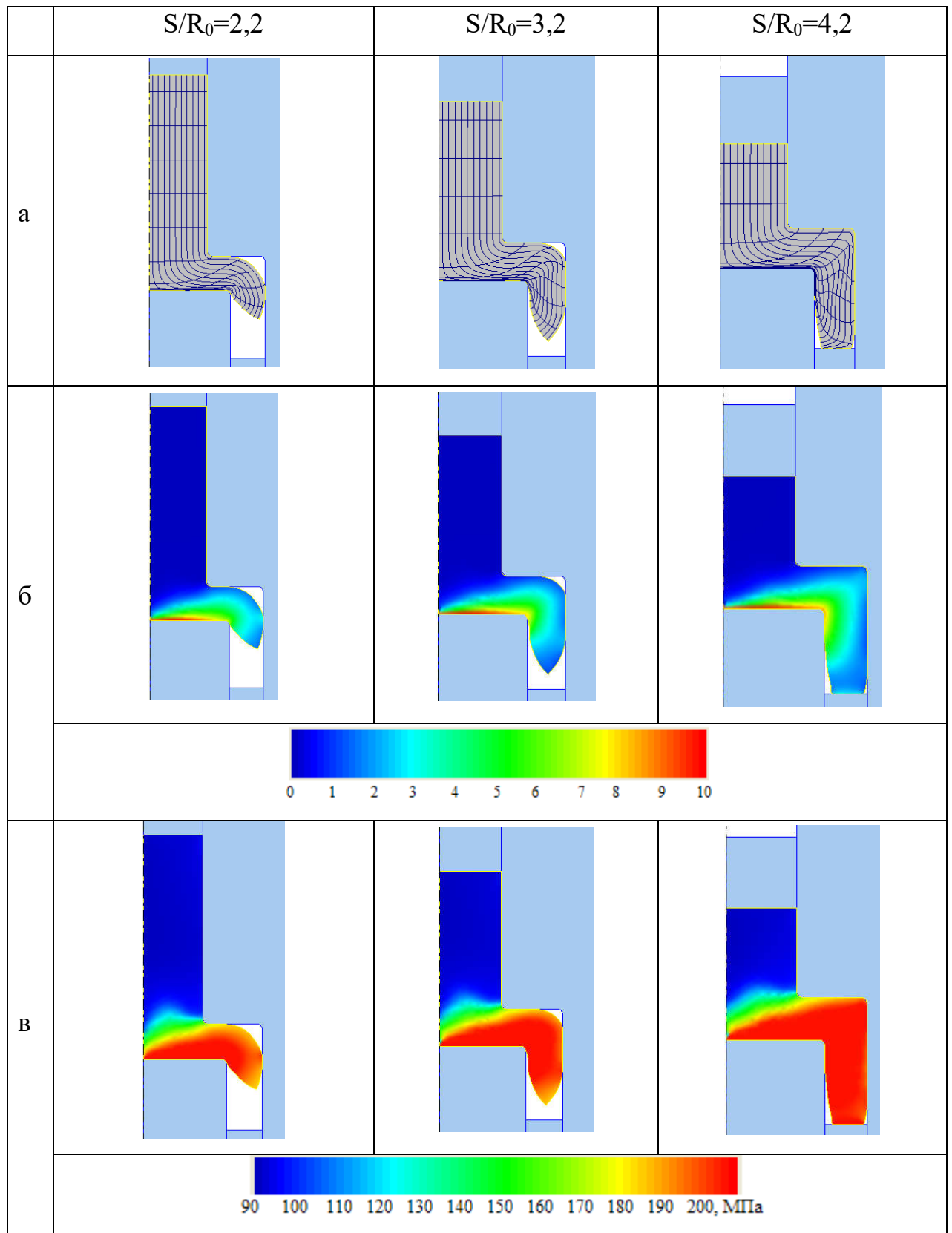


Рисунок 6.29 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіально-прямому видавлюванні при $h/t=1$, $R=35$ мм, $r=r'=r''=2$ мм, $\mu=0,08$

Дослідження силового режиму (рис. 6.30) проведено в залежності від ходу процесу в інтервалі відносних значень $h/t=1; 1,4; 1,8$. З графіка видно, що сила зростає протягом усього процесу видавлювання. Це пов'язано зі збільшенням контактної поверхні тертя і зміцненням матеріалу. Також з графіка можна помітити, що при збільшенні відносної висоти приймальної порожнини, значення сили видавлювання знижуються. Це можна пояснити тим, що зі збільшенням висоти металу простіше заповнювати порожнину, тобто змінюється жорсткість системи. На рис. 6.31 відображено залежність сили від ходу процесу в інтервалі значень $R=35; 40; 45$ мм. Деформування відбувається плавно з різким зростанням в кінці процесу. Це пояснюється тим, що при прямому видавлюванні збільшується площа контакту металу з інструментом. При збільшенні внутрішнього радіусу напівфабрикату R з графіка можна побачити, що значення приведенного тиску збільшуються. Така зміна виходить за рахунок збільшення контактної поверхні тертя з нижньою півматрицею.

6.4.2 Дефектоутворення при радіально-прямому видавлюванні складнопрофільованих деталей

Отримання типових деталей з відносно великими радіусами закруглення оправки $r=4...6$ мм та відносно великою товщиною стінки $t/h > 1$ та його дном $h/t > 1,4$ супроводжується появою дефекта у вигляді затиску (рис. 6.32). Застосування поетапного видавлювання з рухомою матрицею дозволяє уникнути дефекту. На першому етапі, для отримання бездефектної стінки стакану (рис. 6.33, а, б) нижній інструмент знаходиться в верхньому статичному положенні до того моменту, поки метал не заповнить весь простір. На другому етапі (рис. 6.33, в, г, д) інструмент рухається вниз з певною швидкістю. Для уникнення затисків на дні отримуваного стакану варто застосувати рухому верхню матрицю, рух якої дозволяє поступово збільшити приймальну порожнину в радіальному напрямку видавлювання (рис. 6.34).

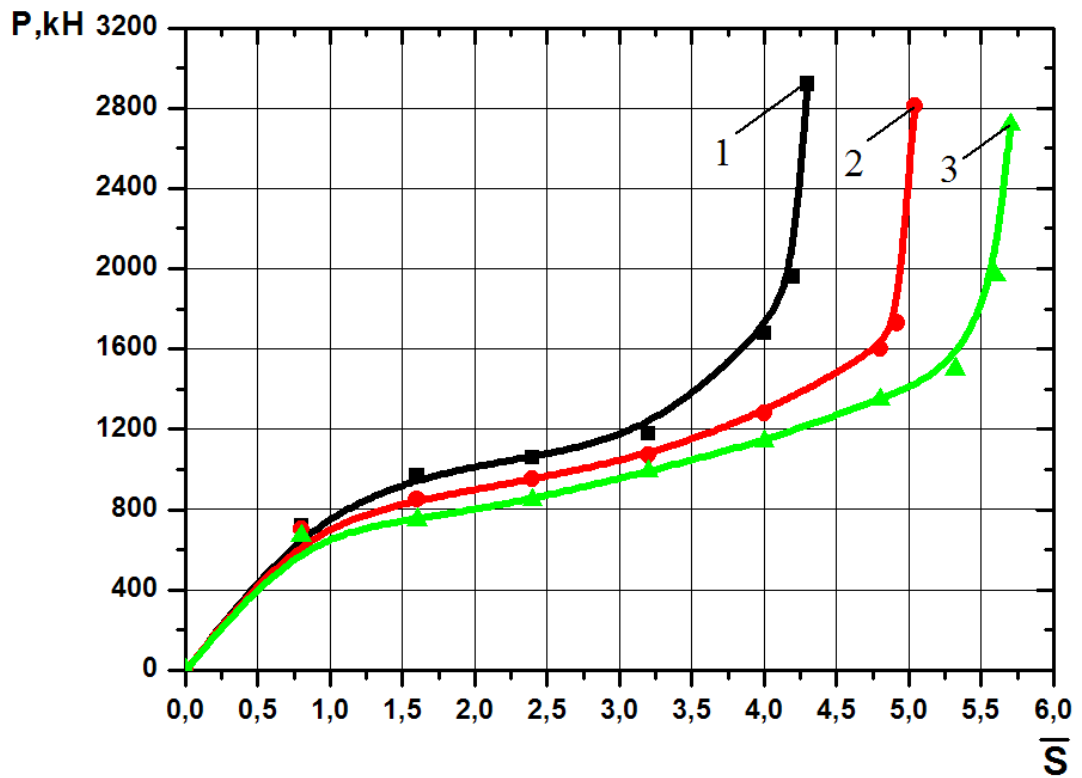


Рисунок 6.30 – Графік залежності сили видавлювання від відносного ходу процесу: 1 – $h/t=1$; 2 – $h/t=1,4$; 3 – $h/t=1,8$

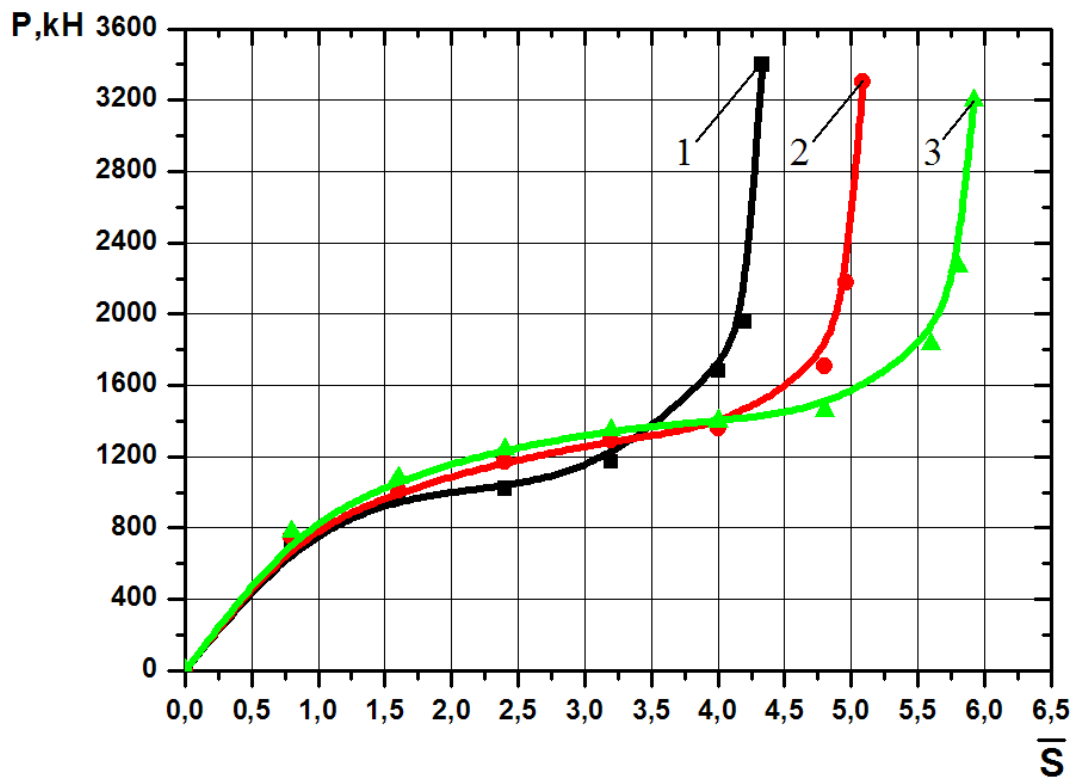


Рисунок 6.31 – Графік залежності сили видавлювання від відносного ходу процесу: 1 – $R=35$ мм; 2 – $R=40$ мм; 3 – $R=45$ мм

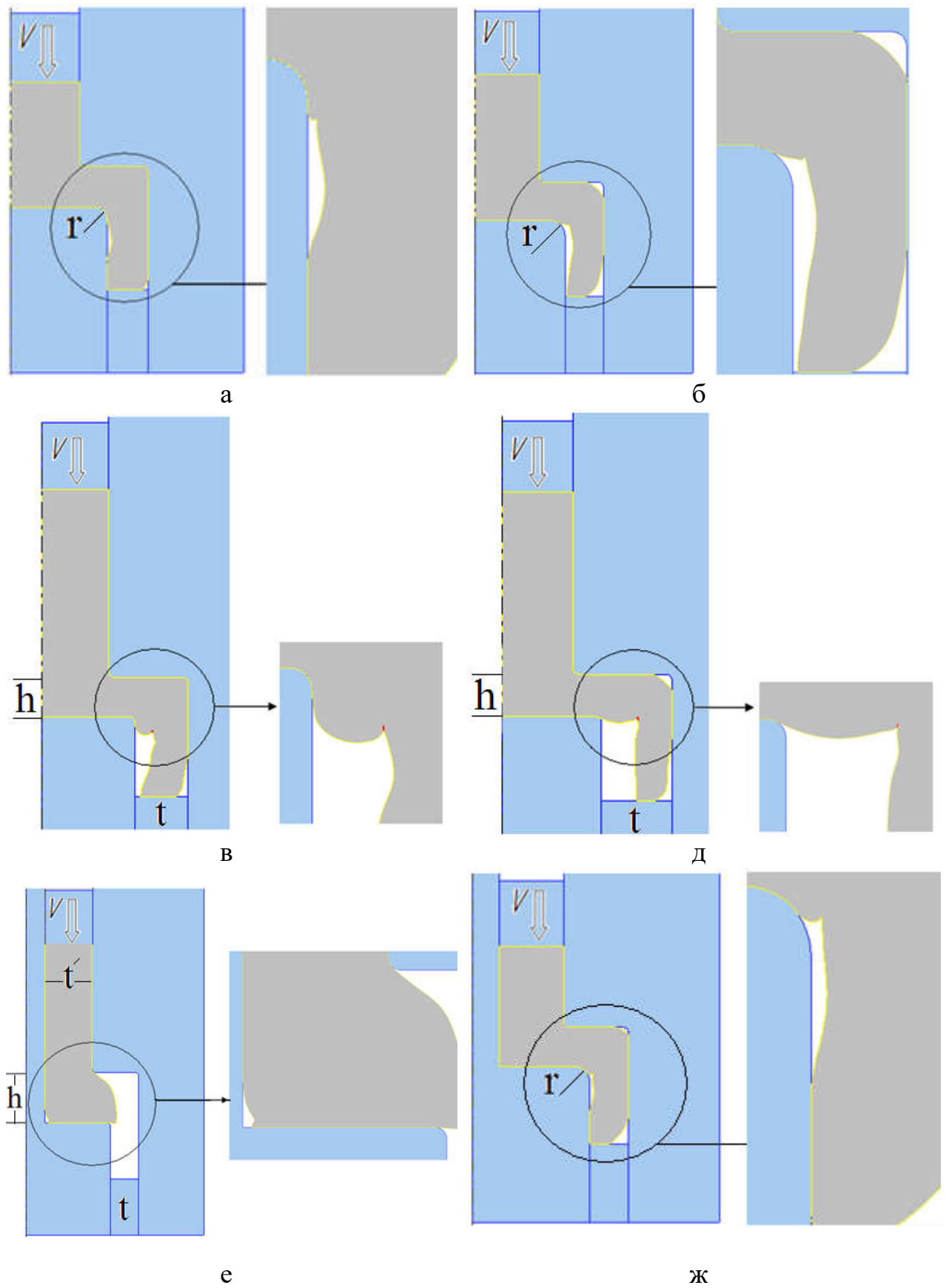


Рисунок 6.32 – Дефектоутворення типу затиску при радіально-прямому видавлюванні а – $r=4$ мм; б – $r=6$ мм; в – $t/h=1,4$; г – $t/h=1,8$; е – $h/t=1,8$ та $h/t'=1,08$; ж – $r=6$ мм

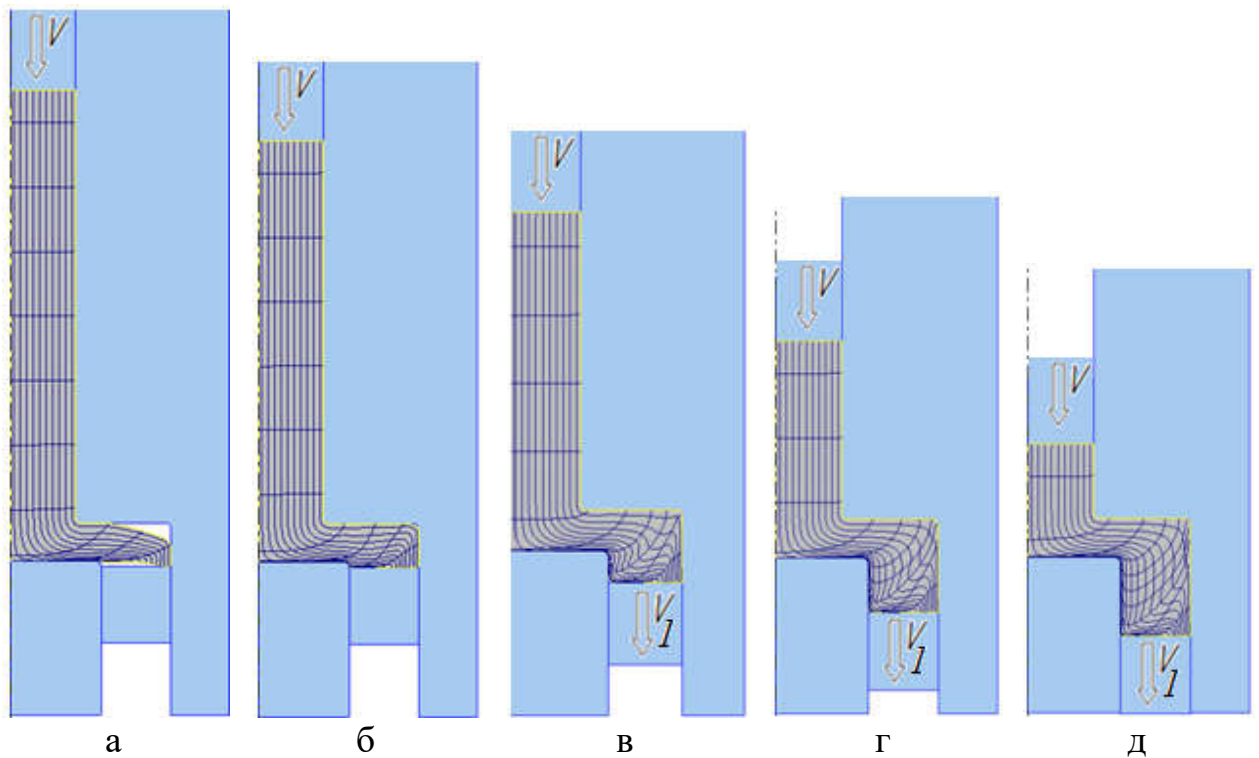


Рис. 6.33 – Викривлення ділянки сітки по ходу деформування при радіально-прямому видавлюванні з відносним ходом: а – $s/R_0=2,65$; б – $s/R_0=3,46$; в – $s/R_0=5,06$; г – $s/R_0=6,65$; д – $s/R_0=8,25$; при $h/t=1$, $t/h=1,8$; $R=35$ мм, $V_1/V=0,235$, $r=r'=r''=2$ мм та $\mu=0,08$

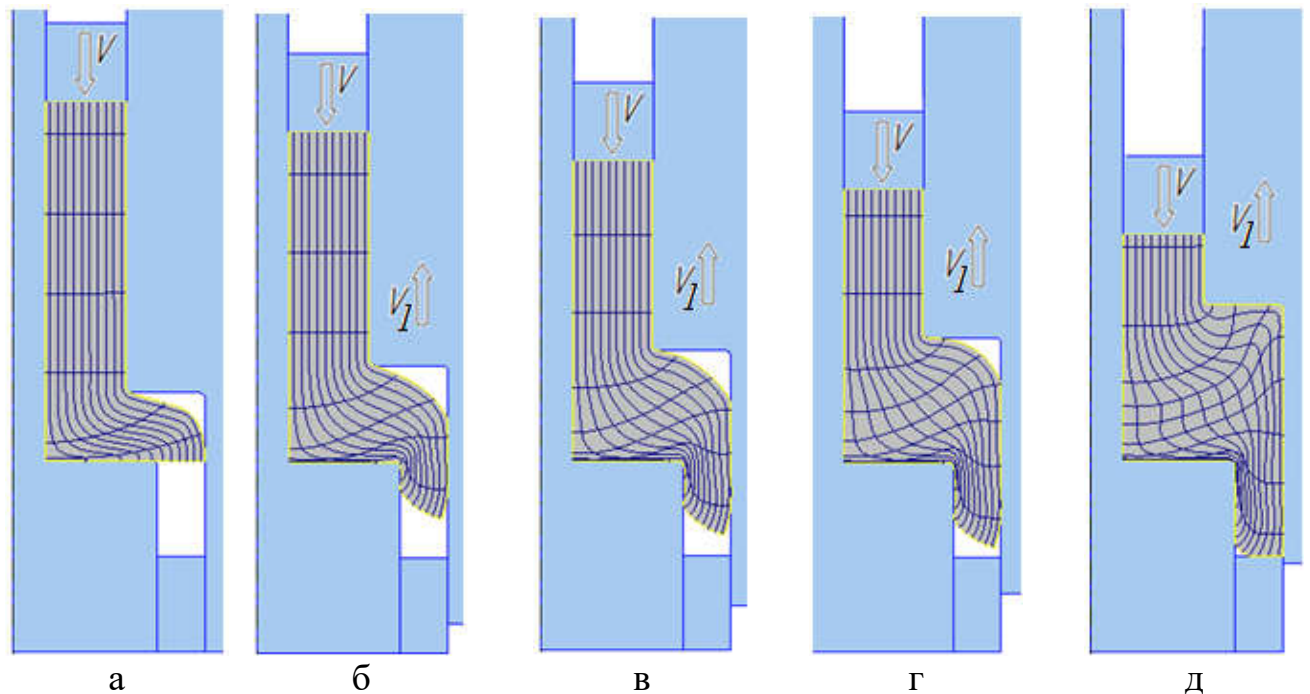


Рис. 6.34 – Викривлення ділянки сітки по ходу деформування при радіально-прямому видавлюванні при а – $(S/t')=1,43$; $h/t'=0,85$; б – $(S/t')=2,89$; $h/t'=1,21$; в – $(S/t')=3,63$; $h/t'=1,4$; г – $(S/t')=4,36$; $h/t'=1,58$; д – $(S/t')=5,8$; $h/t'=1,95$; $h/t=3,25$; $V_1/V=0,25$

На рис. 6.35 помітно, що з до значень $\bar{h}=1,04$ з відносним ходом $\bar{S}=0,23$ утягнення не спостерігається, а значить, відбувається заповнення металом порожнини під фланець. Далі з'являється утягнення, при $\bar{h}=1,04$ з відносним ходом $\bar{S}=0,23$, при $\bar{h}=1,08$ понад $\bar{S}=0,75$; при $\bar{h}=1,12$ понад $\bar{S}=0,13$ і при $\bar{h}=1,0$ понад $\bar{S}=0,1$. На основі проведеного моделювання дані рекомендації по дефектоутворенню у вигляді діаграми, що дає можливість прогнозувати появу дефекту за рахунок регулювання геометрії деталі (див. рис. 6.32, е).

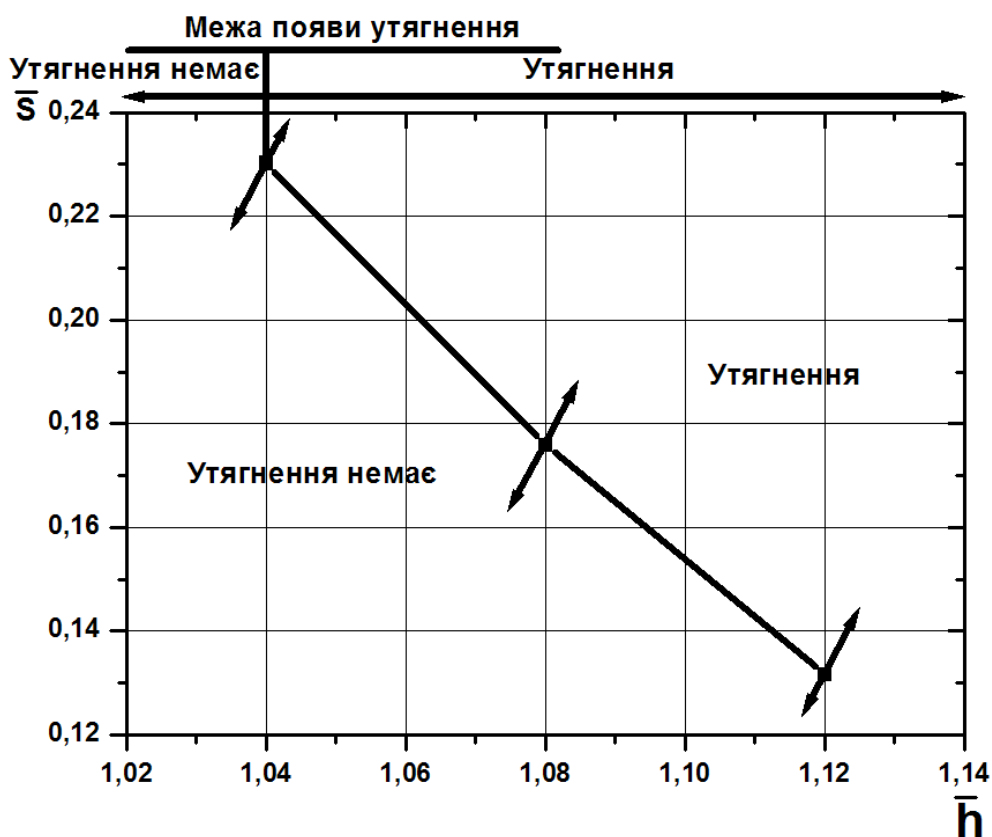


Рисунок 6.35 – Діаграма залежності появи утягнення від відносного ходу деформувального пуансона ($\bar{S}$) і відносної висоти фланця ($\bar{h}$) при $h/t=1,8$

6.5 Моделювання процесу видавлювання порожнистих деталей з перемінною товщиною стінки

6.5.1 Аналіз силового режиму видавлювання порожнистих деталей з перемінною товщиною стінки методом верхньої оцінки

Для аналізу розглянуто плоску задачу на основі методу верхньої оцінки. Схема годографів з варіюванням відносного зазору між матрицею і пуансоном, з поступовим переміщенням пуансона, представлена на рис. 6.36, де $\bar{z} = \frac{R_m - R_n}{R_n}$.

Для визначення сили в ході процесу необхідно визначити величину і напрям швидкості течії металу.

$$\bar{P} = \frac{1}{2BV_0} \left[(l_{02}V_{02} + l_{23}V_{23} + l_{34}V_{34} + l_{12}V_{12} + l_{13}V_{13} + l_{45}V_{45}) + 2\mu(l_{04}V_{04} + l_{05}V_{05}) \right], \quad (6.24)$$

Визначимо величини l_{ij} :

$$l_{0-2} = \sqrt{h_1^2 + R_n^2}, \quad (6.25)$$

$$l_{23} = H_0, \quad (6.26)$$

$$l_{3-4} = \sqrt{h_2^2 + (R_m - R_n)^2}, \quad (6.27)$$

$$l_{4-5} = \sqrt{(R_{\phi} - R_n)^2 + (h_3 - h_2)^2}, \quad (6.28)$$

$$l_{1-2} = \sqrt{R_n^2 + (h_0 - h_1)^2}, \quad (6.29)$$

$$l_{1-3} = \sqrt{(R_m - R_n)^2 + (h_0 - h_2)^2}, \quad (6.30)$$

$$l_{0-4} = \sqrt{(R_{\phi} - R_m)^2 + h_2^2}, \quad (6.31)$$

$$l_{0-5} = \sqrt{l_{4-5}^2 - (R_{\phi} - R_n)^2}. \quad (6.32)$$

де R_{ϕ} – радіус фланцю;

R_m – радіус матриці;

R_n – радіус пуансону.

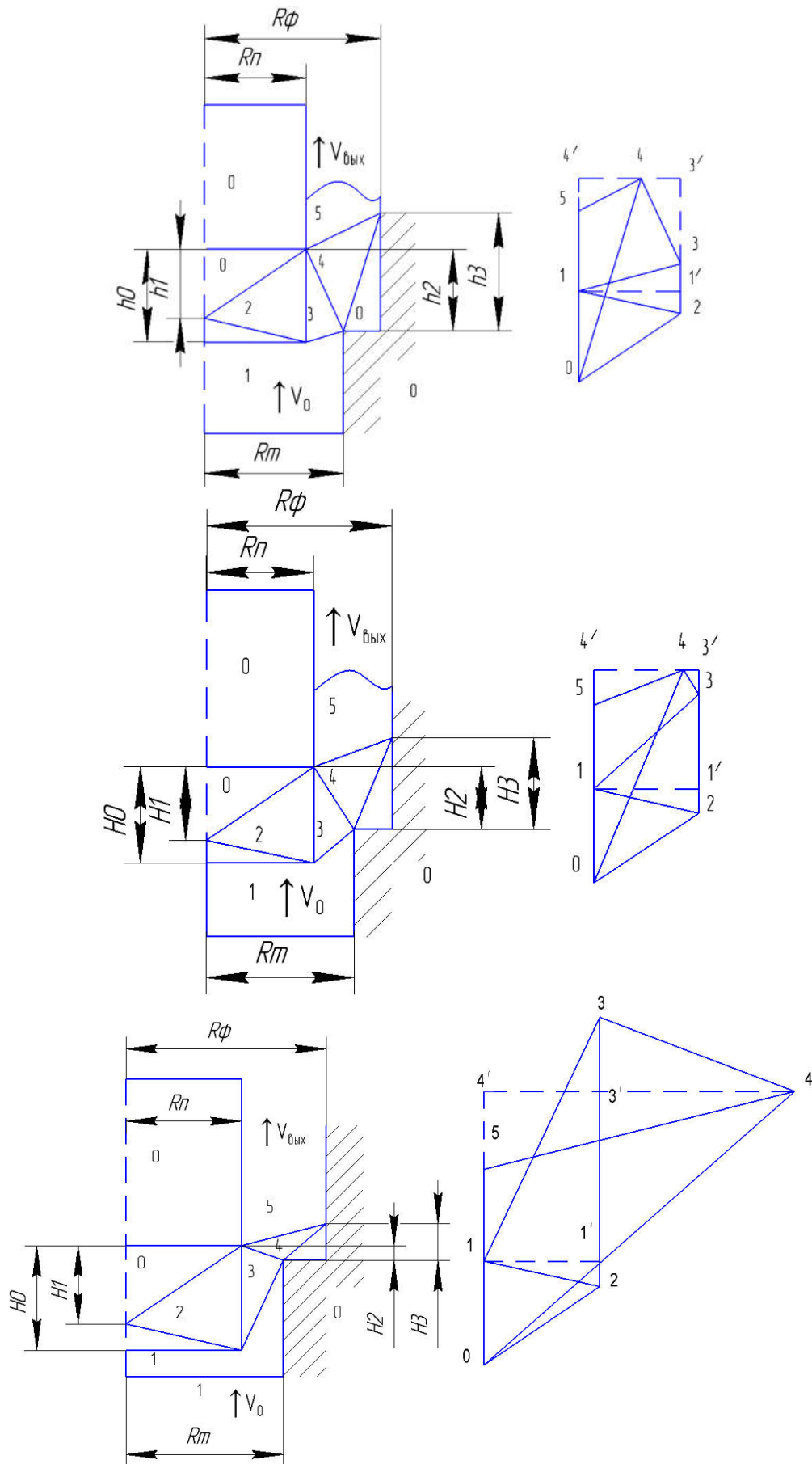


Рисунок 6.36 – Розрахункова схема процесу комбінованого видавлювання з величиною зазору між матрицею і пуансоном $R_m - R_n = 0,36$

Для визначення величин V_{ij} необхідно виконати додаткові побудови.

Розглянемо систему рівнянь, що складається з трьох невідомих:

$$\frac{V_{44'}}{V_{4'5}} = \frac{R_{\Phi} - R_n}{h_3 - h_2}, \quad (6.33)$$

$$\frac{V_{44'}}{V_{04'}} = \frac{R_{\Phi} - R_m}{h_3}, \quad (6.34)$$

$$V_{4'5} = V_{04'} - V_{05}, \quad (6.35)$$

Нехай $R_{\Phi}=a$; $R_n=b$; $R_m=c$; $H_2=d$; $H_3=e$;

$V_{05}=f$; $V_{44}=x$; $V_{54}=y$; $V_{04}=z$.

Тоді,

$$\frac{x}{y} = \frac{a-b}{e-d}; \quad (6.36)$$

$$\frac{x}{z} = \frac{a-c}{e}; \quad (6.37)$$

$$y = z - f. \quad (6.38)$$

Звідси,

$$x = \frac{y(a-b)}{e-d}, \quad (6.39)$$

$$x = \frac{z(a-c)}{e}. \quad (6.40)$$

Виражаючи змінну X і прирівнюючи між собою отримаємо рівність, з якої виражаємо змінну Z , попередньо замінюючи змінну Y виразом $z-f$:

$$\frac{y(a-b)}{(e-d)} = \frac{z(a-c)}{e}; \quad (6.41)$$

$$\frac{(z-f)(a-b)}{(e-d)} = \frac{z(a-c)}{e}; \quad (6.42)$$

$$z-f = \frac{z(a-c)(e-d)}{e(a-b)}; \quad (6.43)$$

$$z \left(1 - \frac{(a-c)(e-d)}{e(a-b)} \right) = f; \quad (6.44)$$

$$z = \frac{f}{1 - \frac{(a-c)(e-d)}{e(a-b)}}. \quad (6.45)$$

Отримуємо наступні вирази швидкостей:

$$V_{04'} = \frac{V_{05}}{1 - \frac{(R_{\phi} - R_m)(H_2 - H_2)}{H_2(R_{\phi} - R_n)}}; \quad (6.46)$$

$$V_{45} = V_{05} \left(\frac{1}{1 - \frac{(R_{\phi} - R_m)(H_2 - H_2)}{H_2(R_{\phi} - R_n)}} - 1 \right); \quad (6.47)$$

$$V_{44'} = \frac{V_{05}(R_{\phi} - R_m)}{\left(1 - \frac{(R_{\phi} - R_m)(H_2 - H_2)}{H_2(R_{\phi} - R_n)} \right) H_2}; \quad (6.48)$$

$$V_{11'} = \frac{R_n V_{01}}{H_0}; \quad (6.49)$$

$$V_{04} = \sqrt{V_{44'}^2 + V_{04'}^2}; \quad (6.50)$$

$$V_{21'} = \frac{(H_0 - H_1)V_{01}}{H_0}; \quad (6.51)$$

$$V_{02} = \frac{V_{01} \sqrt{R_n^2 + H_1^2}}{H_0}; \quad (6.52)$$

$$V_{12} = \sqrt{V_{21'}^2 + V_{11'}^2}; \quad (6.53)$$

$$V_{13} = \frac{(H_0 - H_2)V_{11'}}{(R_m - R_n)}; \quad (6.54)$$

$$V_{13} = \sqrt{V_{11'}^2 + V_{1'3}^2}; \quad (6.55)$$

$$V_{45} = \sqrt{V_{4'5'}^2 + V_{44'}^2}; \quad (6.56)$$

$$V_{3'4} = V_{11'} - V_{44'}; \quad (6.57)$$

$$V_{34} = \frac{\left(\sqrt{(R_m - R_n)^2 + H_2^2} \right) V_{3'4}}{(R_m - R_n)}. \quad (6.58)$$

На основі отриманих виразів розраховано приведений тиск комбінованого видавлювання. Основними параметрами, що впливають на зміни сили деформування є зазори між матрицею та пуансоном ($R_m - R_n$) та зазор, що відповідає за зміну товщини стінки ($R_\phi - R_n$). Встановлено, що збільшення зазору між матрицею та пуансоном ($R_m - R_n$) сприяє зниженню приведенного тиску, що пояснюється зменшенням степені деформування (рис. 6.37). Аналогічний характер розподілу сили зберігається і при зміні зазору ($R_m - R_n$).

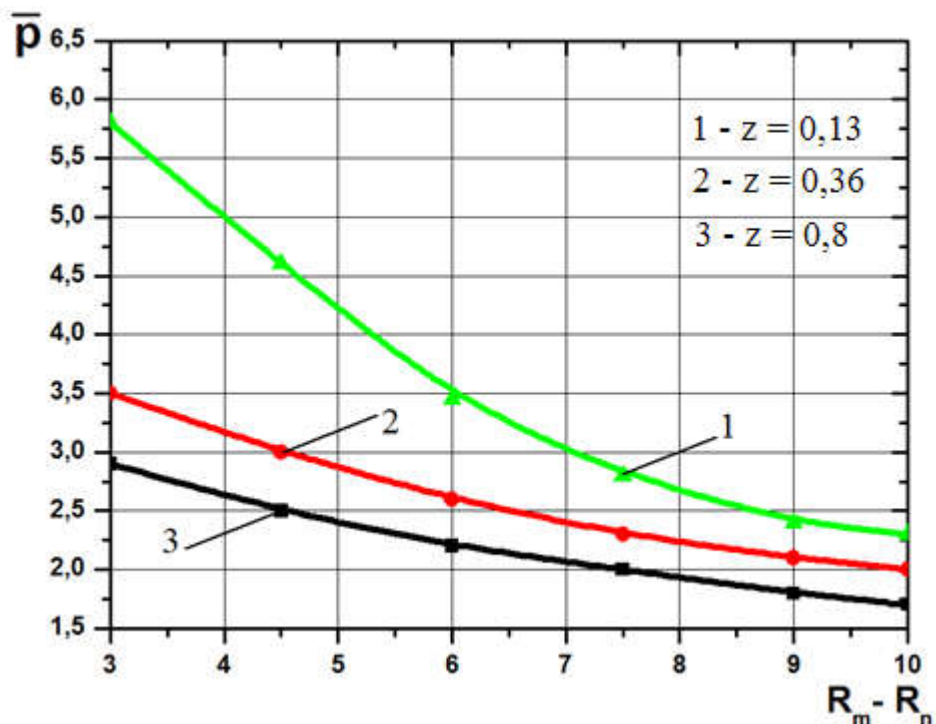


Рисунок 6.37 – Графік залежності приведенного тиску від величини зазору між матрицею і пуансоном ($R_m - R_n$) при постійній величині H_2

6.5.2 Дослідження формоутворення процесу видавлювання пустотілих деталей зі змінною товщиною стінки методом скінченних елементів

На основі методу скінченних елементів проаналізовано формозміну заготовки в процесі комбінованого видавлювання пустотілих деталей зі змінною товщиною стінки (рис. 6.38). Вихідними геометричними даними для моделювання взято $R_m=18$ мм, $R_n=15$ мм, $R_\phi=27$ мм, $r_n=3$ мм, $r_m=3$ мм. Використання різних схем кінематичного впливу на заготовку дозволяє отримувати деталі зі змінною товщиною стінки. особливістю такого процесу є утворення дефекту у вигляді прострілу на внутрішній поверхні деталі.

Проаналізувавши деформацію під час процесу було виявлено, що максимальна деформація на стадії утворення першого фланця спостерігалася на зовнішніх торцях фланцю, а середня величина деформації – розподілилася на поверхні зіткнення торця пуансона з заготовкою. На стадії формування стінки деталі максимальна деформація збільшилася. Максимальний ступінь деформації спостерігався на внутрішній частині стінки деталі.

Для більш детального аналізу введемо умовні позначення: $r_n / s = \bar{r}_n$ – відносний радіус закруглення пуансона; $a/s = \bar{a}$ – відносне утягнення; $R_d / s = \bar{\eta}$ – відносна ширина каналу; $R_d / R_M = \bar{R}_d$ – відносний радіус фланця деталі; $s / R_M = \bar{s}$ – відносна товщина стінки стакану; $z / s = \bar{z}$ – відносний зазор між торцем пуансона і торцем матриці; k – ширина каналу плин у металу при певному положенні інструменту.

В процесі аналізу встановлено, що основними геометричними параметрами, що впливають на формоутворення деталі є значення зазору між торцем пуансона та торцем матриці z та зазору між внутрішньою поверхнею матриці та зовнішньою поверхнею пуансона S . Розрахунок методом скінченних елементів проводився в трьох різних положеннях зазору між торцем пуансона та торцем матриці: $z=0$; $z=R_M - R_n$; $z=2(R_M - R_n)$.

Розрахункові схеми процесу комбінованого видавлювання в рухомих матрицях з вільною течією металу наведені на рис. 6.39. Схеми відрізняються

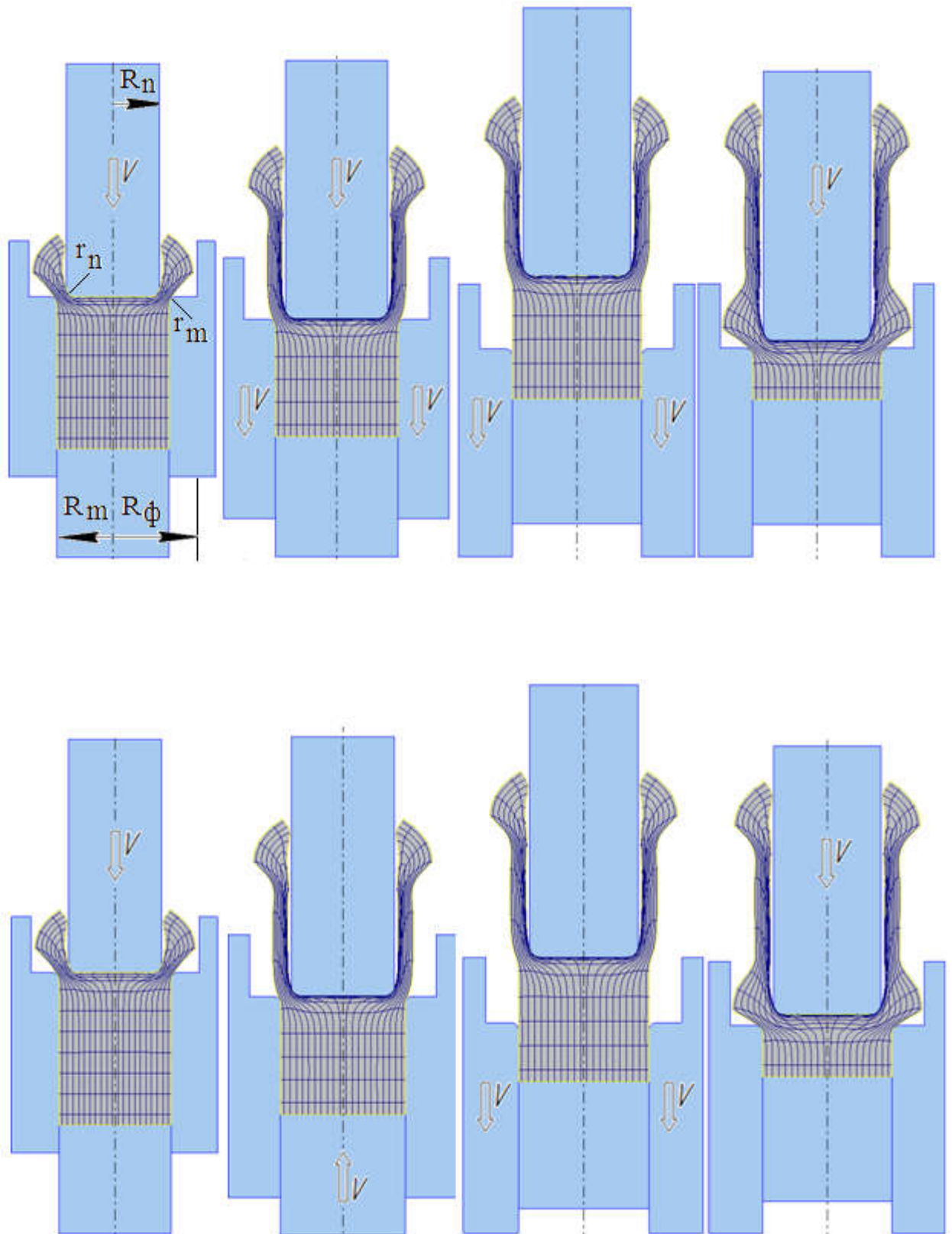


Рисунок 6.38 – Стадії формоутворення деталі зі змінною товщиною стінки при різних кінематичних схемах видавлювання

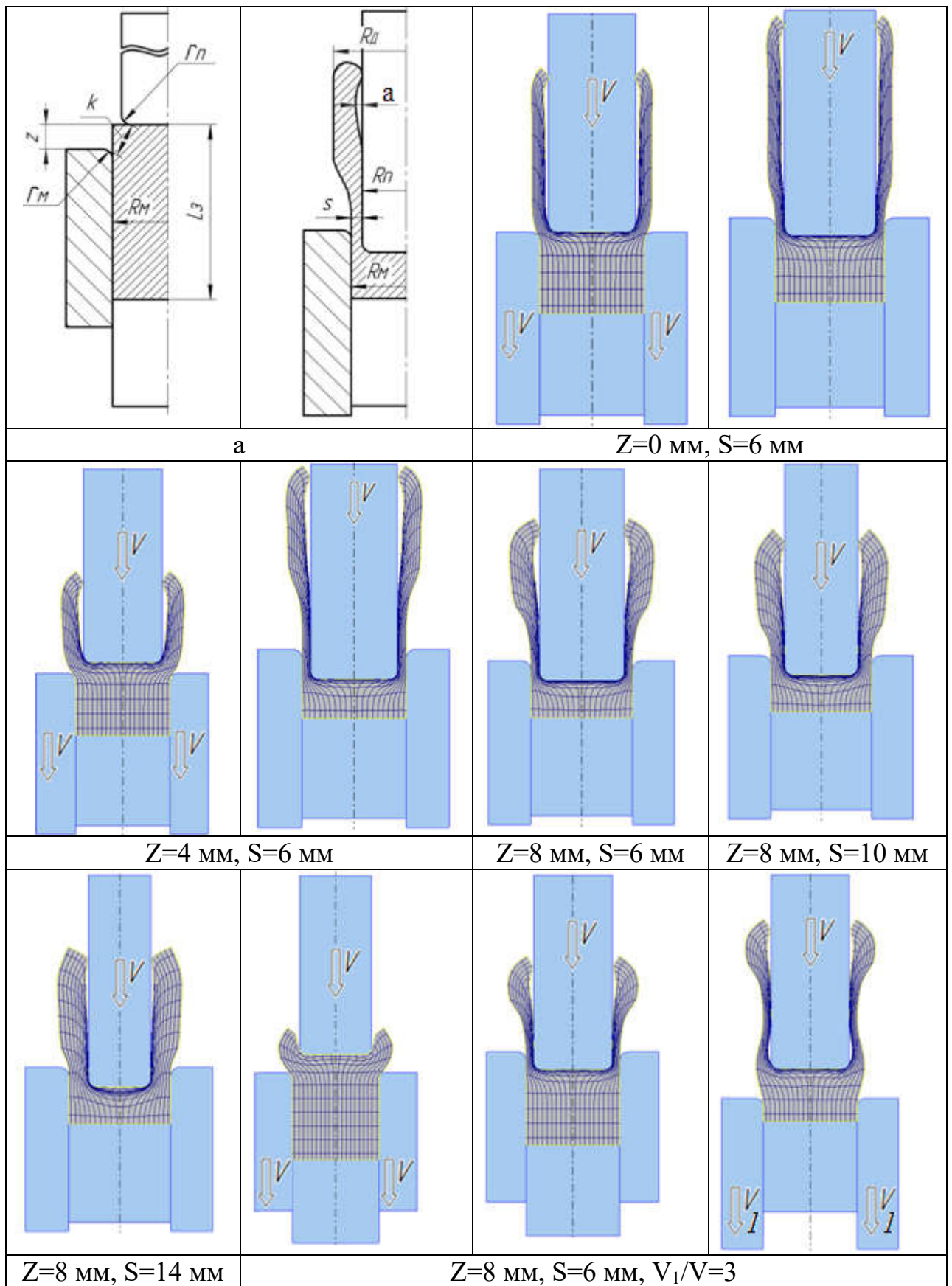


Рисунок 6.39 – Розрахункові схеми процесу комбінованого видавлювання в рухомих матрицях з вільною течією металу

одна від одної початковим положенням робочого інструменту з $R_m=18$ мм, $R_n=15$ мм, $R_\phi=27$ мм, $r_n=r_m=3$ мм.

Варіювання параметрами z і S дозволяє отримати деталі різної конфігурації, що розширює номенклатуру виробів. На рис. 6.40 зображено графік залежності відносного радіуса фланця деталі від відносної товщини стінки стакана ($z=8$ мм), з цього графіка бачимо, що при постійному зазорі при збільшенні відносної товщини стінки в діапазоні від 0,17 до 0,44 (63%), відносний радіус фланця деталі зменшується від 1,42 до 1,19 (84%). Це відбувається за рахунок того, що збільшується ширина каналу плин у металу k , при цьому витиснення металу в радіальному напрямку зменшується. На рис. 6.41 зображено графік залежності відносної ширини каналу від відносного радіуса закруглення пуансона при різних величинах зазору між торцем пуансона та торцем матриці ($z=0$; 4; 8 мм), з цього графіка видно, що при збільшенні відносного радіуса закруглення пуансона в діапазоні від 0 до 1,67 (100%), відносна ширина каналу збільшується від 6,69 до 7,56 (12%) для $z=0$ мм, від 7,7 до 8,16 (6%) для $z=4$ мм, від 8,5 до 8,7 (2%) для $z=8$ мм. Також можна визначити, що значне збільшення радіуса фланця деталі буде спостерігатися при зазорі $z=0$ мм, а незначне збільшення – при зазорі $z=8$ мм, це пов'язано з величиною утягнення, яке має своє максимальне значення при зазорі 8 мм. Різниця у відсотковому значенні складає 40% між графіками залежності при зазорах 0 мм, 4 мм та 30% між графіками залежності при $z=4$ мм і $z=8$ мм.

На рис. 6.42 зображено графік залежності величини прострілу від відносного радіуса закруглення пуансона при різних величинах зазору між торцем пуансона та торцем матриці ($z=0$; 4; 8 мм), з цього графіка видно, що при збільшенні відносного радіуса закруглення пуансона в діапазоні від 0 до 1,67 (100%), величина відносного утягнення зменшується від 0,35 до 0,18 (49%) для $z=0$ мм, від 0,5 до 0,19 (61%) для $z=4$ мм, від 0,56 до 0,21 (62%) для $z=8$ мм. З графіка залежності величини прострілу від відносного радіуса закруглення пуансона можна визначити, що відбувається інтенсивне зниження величини утягнення, також можна визначити, що максимальні

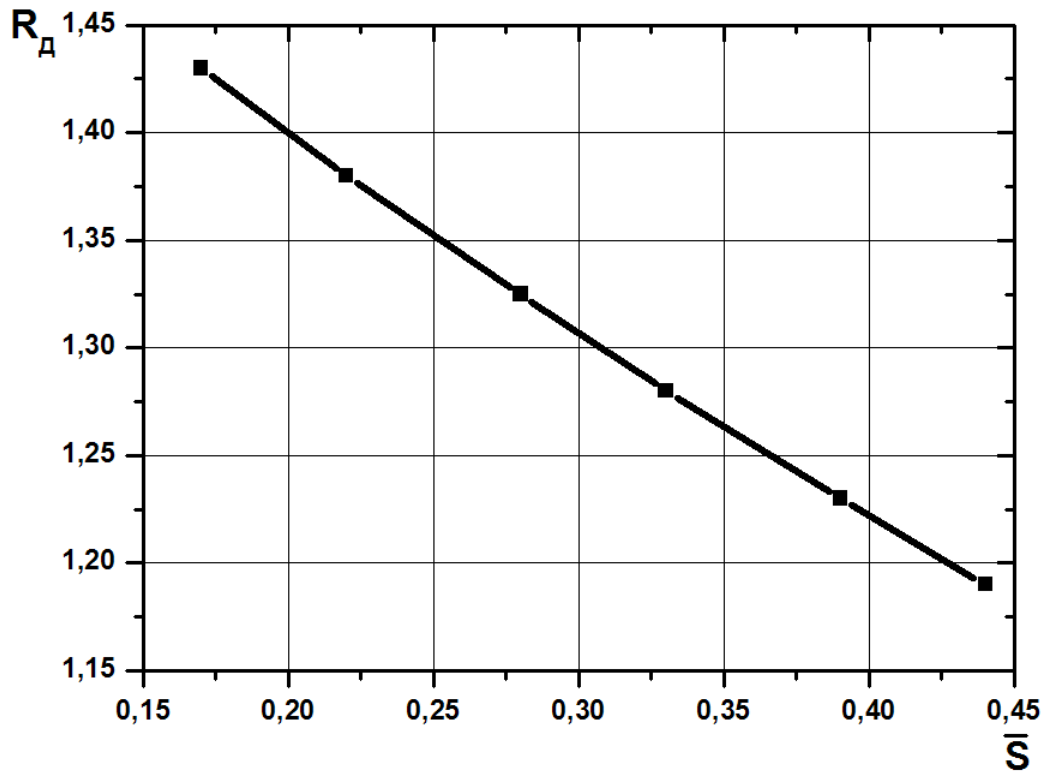


Рисунок 6.40 – Графік залежності відносного радіуса фланця деталі від відносної товщини стінки стакану

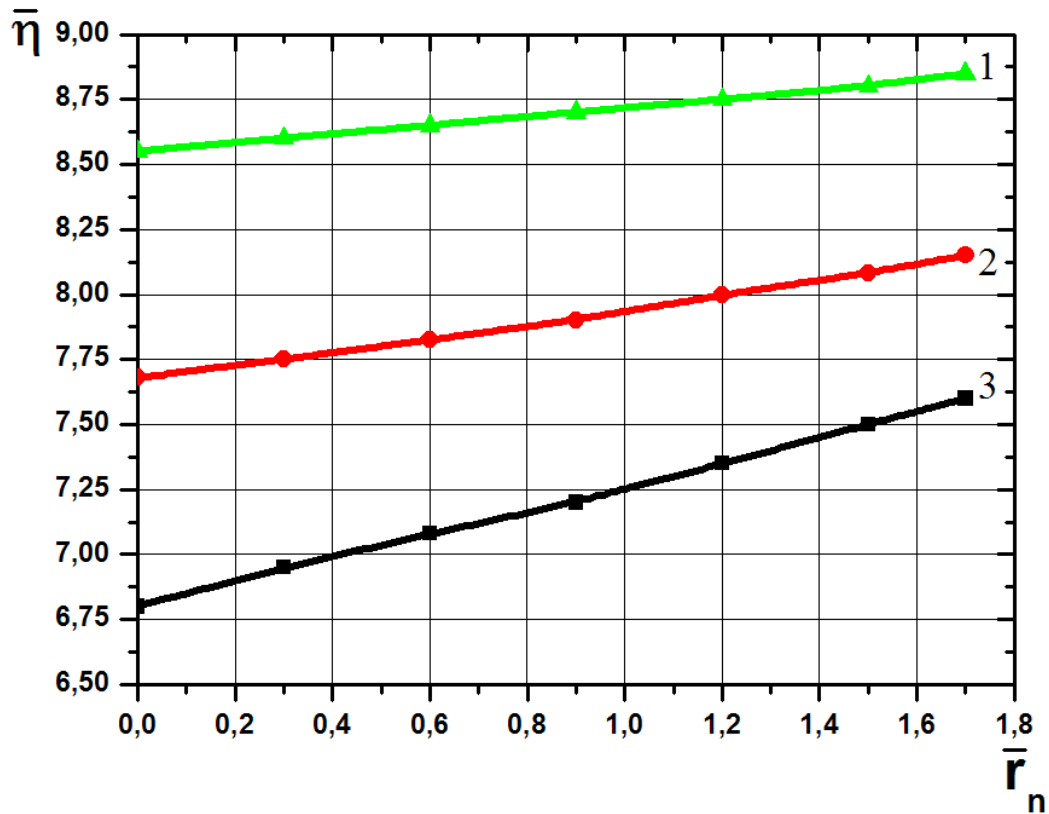


Рисунок 6.41 – Графік залежності відносної ширини каналу від відносного радіуса закруглення пуансона при різних величинах зазору;
1 – $z=8$ мм; 2 – $z=4$ мм; 3 – $z=0$ мм

значення утягнення будуть при $z=8$ мм, а мінімальні значення при $z=0$ мм. Різниця у відсотковому значенні складає 35% між графіками залежності при зазорах 0 мм і 4 мм та 15% між графіками залежності при $z=4$ мм і $z=8$ мм.

На рис. 6.43 зображено графік залежності відносної величини прострілу від відносного зазору між торцем пуансона та торцем матриці ($s=3$ мм), з цього графіка бачимо, що при постійній товщині стінки стакану при збільшенні відносного зазору між торцем пуансона та торцем матриці в діапазоні від 0 до 1,33 (100%), відносне утягнення збільшується від 0,25 до 0,36 (30%). Це відбувається за рахунок того, що збільшується зазор (z) між торцем пуансона та торцем матриці.

На рис. 6.44 зображено графік залежності відносної величини прострілу від відносної товщини стінки стакану ($z=8$ мм), з цього графіка бачимо, що при постійному зазорі при збільшенні відносної товщини стінки стакану діапазоні від 0,17 до 0,44 (63%), відносна величина прострілу зменшується від 0,36 до 0,13 (63%). Це відбувається за рахунок того, що збільшується ширина каналу плинну металу k , тому що зменшується радіус пуансона, при цьому витіснення металу в радіальному напрямку зменшується, що зменшує вірогідність утворення прострілу. Визначено, що при відносній товщині стінки стакану 0,17, простріл має максимальне значення, а мінімальне – при $\bar{s}=0,44$.

6.6 Формоутворення складнопрофільованих деталей способами комбінованого видавлювання на основі регулювання кінематики течії металу

6.6.1 Усунення дефектів типу «простріл» при формоутворенні складнопрофільованих деталей комбінованим видавлюванням

Серед дефектів, що найчастіше зустрічаються в процесах комбінованого видавлювання, є дефект у вигляді незаповнення порожнини матриці та дефект типу простріл.

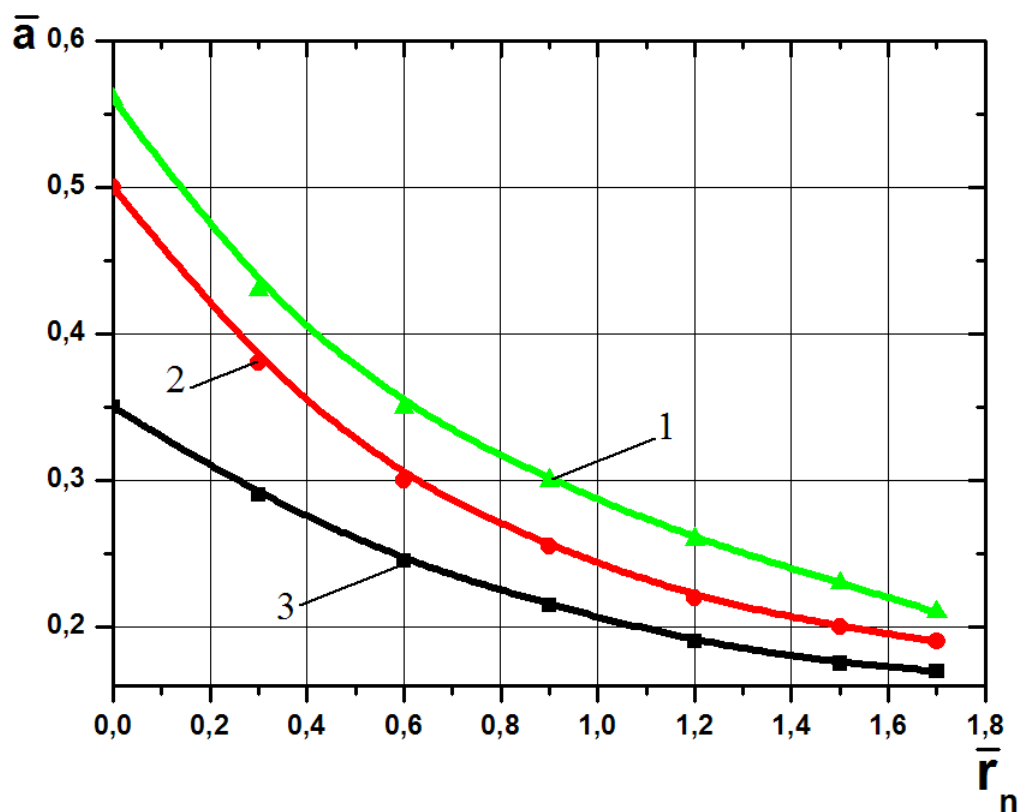


Рисунок 6.42 – Графік залежності відносного утягнення від відносного радіуса закруглення пуансона при різних величинах зазору: 1 – $z=8$ мм; 2 – $z=4$ мм; 3 – $z=0$ мм

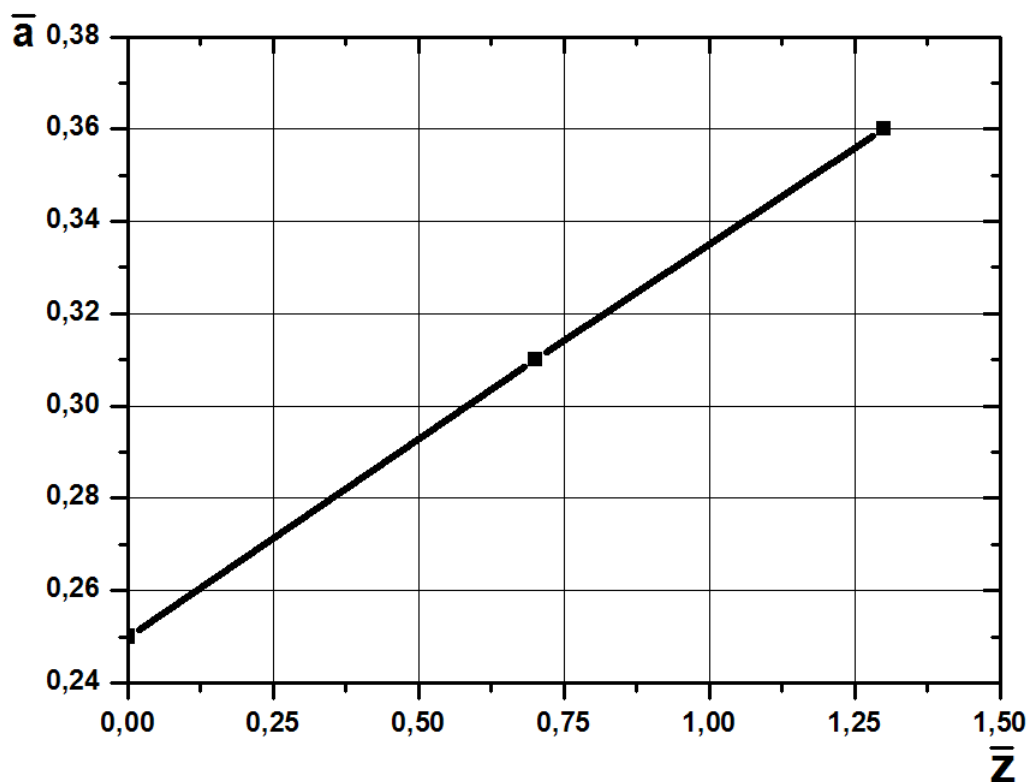


Рисунок 6.43 – Графік залежності величини прострілу від відносного зазору між торцем пуансона та торцем матриці

Результати моделювання показали, що застосування кінематики руху матриці, при отриманні відносно високих фланців, дозволяє отримувати деталь, що має ідеально заповнену форму. Така операція називається підсадкою (рис. 6.45). Утворення дефекту у вигляді прострілу при видавлюванні деталей за схемою радіально-зворотного видавлювання спостерігається при отримання відносно високого фланцю $h/R_0=1,0$.

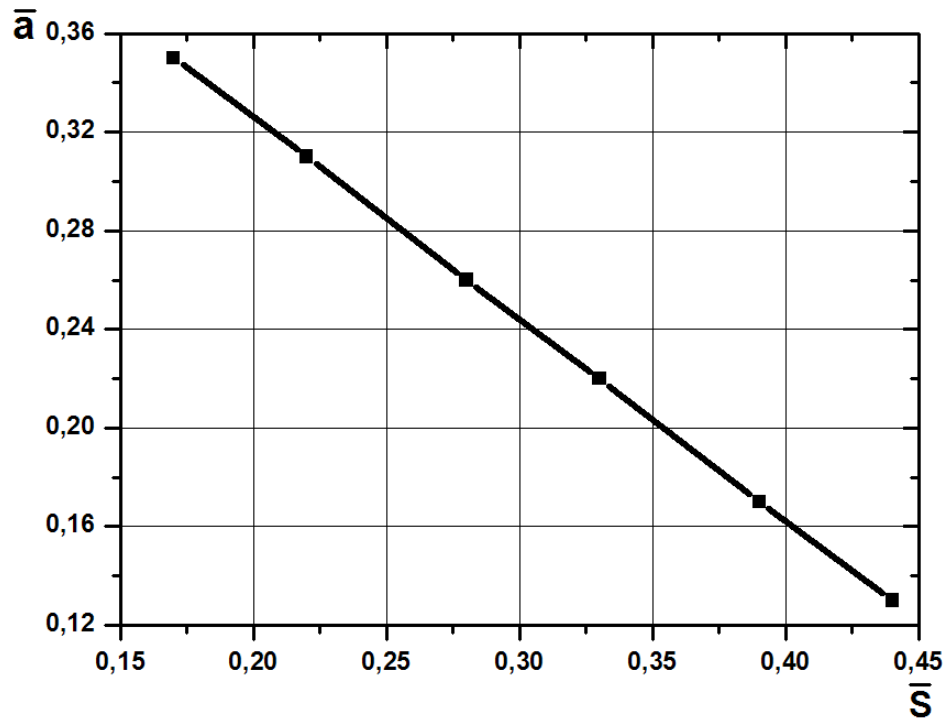


Рисунок 6.44 – Графік залежності величини прострілу від відносної товщини стінки стакану

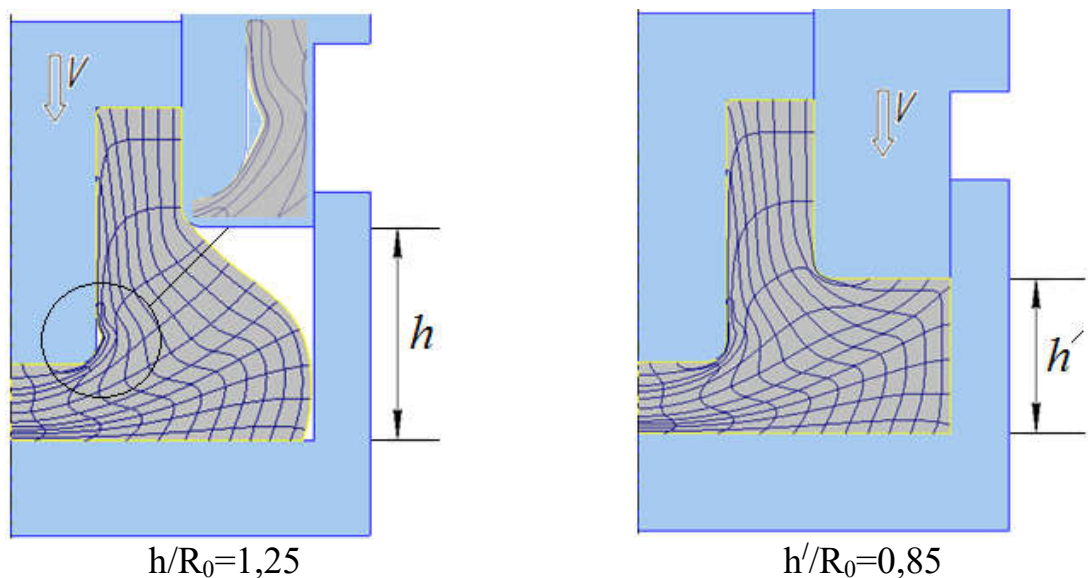


Рисунок 6.45 – Схеми регулювання кінематики руху інструменту для бездефектного радіально-зворотного видавлювання

Для створення рекомендацій по усуненню дефекту прострілу в процесах радіально-прямого (рис. 6.46) видавлювання проведено моделювання з наступними параметрами: R_0 – радіус заготовки ($R_0=18$ мм), R_1 – ($R_1=9$ мм), R – ($R=40$ мм), h – висота приймальної порожнини ($h=11,7$ мм), $h/R_0=0,65$, r – радіус заокруглень кромки інструменту ($r=2$ мм), L_1 – ($L_1=27$ мм), L – висота заготовки ($a-L=54$ мм, $b-L=72$ мм, $v-L=120$ мм).

Утворення дефекту у вигляді прострілу при видавлюванні деталей за схемою радіально-зворотного видавлювання спостерігається при отриманні відносно товстого фланцю. Результати моделювання показали, що регулювання кінематики руху матриці при отриманні відносно товстих фланців дозволяє отримувати деталі, які мають заповнений контур.

При формуванні різнотовщинних фланців дефект у порожнині деталі спостерігається на внутрішній частині стінок. На основі проведеного моделювання надано рекомендації по дефектоутворенню у вигляді діаграми, що дає можливість прогнозувати появу дефекту з урахуванням геометричних параметрів деталі та схеми деформування (рис. 6.47, 6.48). Для усунення дефектів типу прострілів запропоновано спосіб регулювання руху півматриці на заключній стадії видавлювання (рис. 6.49 – 6.52).

6.6.2 Усунення дефектів типу «зажим» при комбінованому видавлюванні складнопрофільованих деталей

Розширення номенклатури отримуваних виробів можливе за рахунок виготовлення деталей з внутрішнім та зовнішнім фланцями та штампування з декількома буртами та фланцями за схемами суміщеного та комбінованого видавлювання. Характер кінематичного впливу на заготовку дозволяє варіювати формою, силою та дефектоутворенням складнопрофільованих заготовок.

Видавлювання деталі типу «шестерні» в закритих штампах (рис. 6.53) показало, що максимальні деформації зосереджуються на перехідних кромках основних інструментів. Зміна кінематичного впливу з одностороннього на двосторонній сприяє більш якісному пропрацюванню центральної частини заготовки (рис. 6.54).

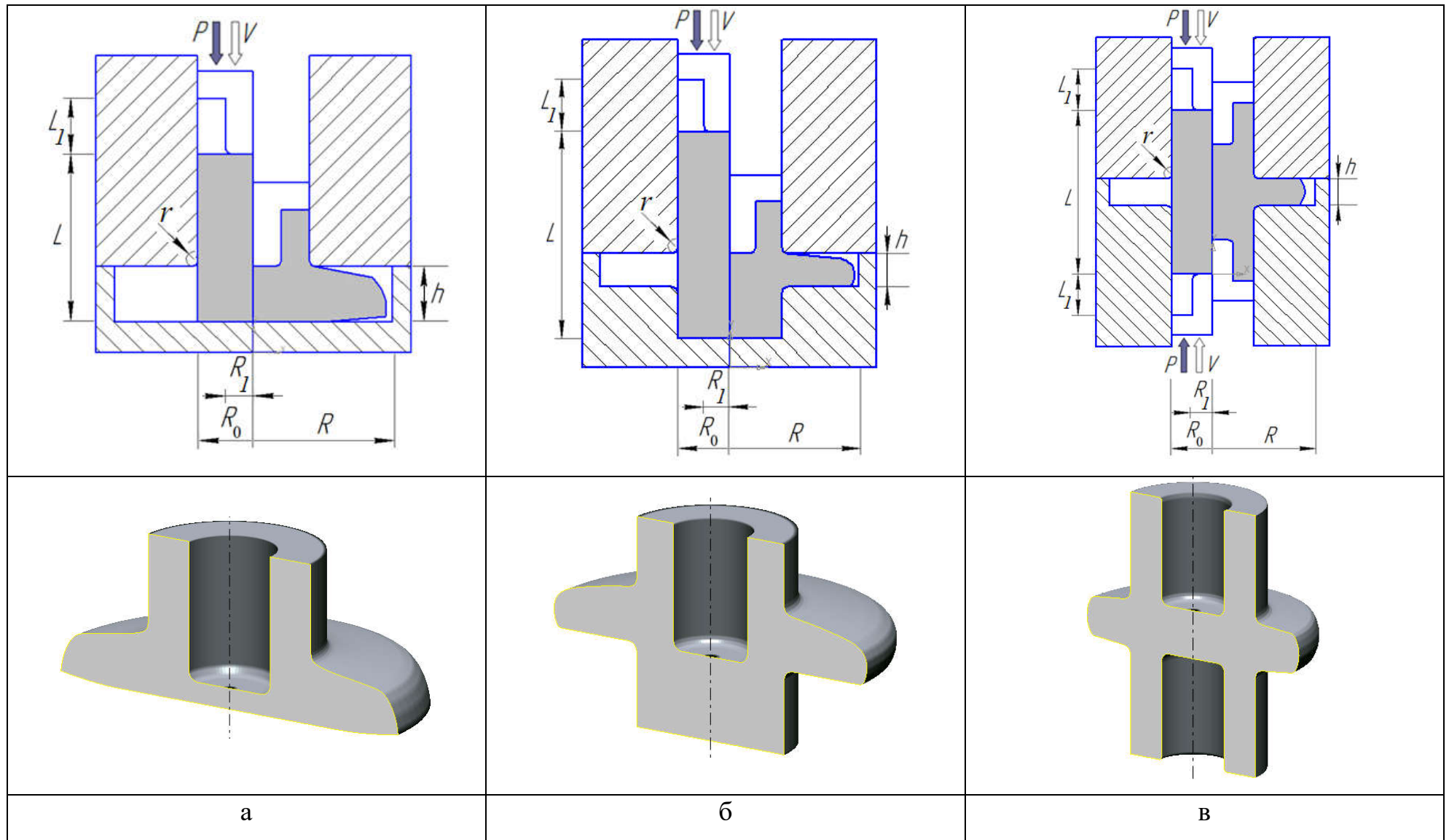


Рисунок 6.46 – Формування різновисотних фланців в процесі радіально-зворотного видавлювання

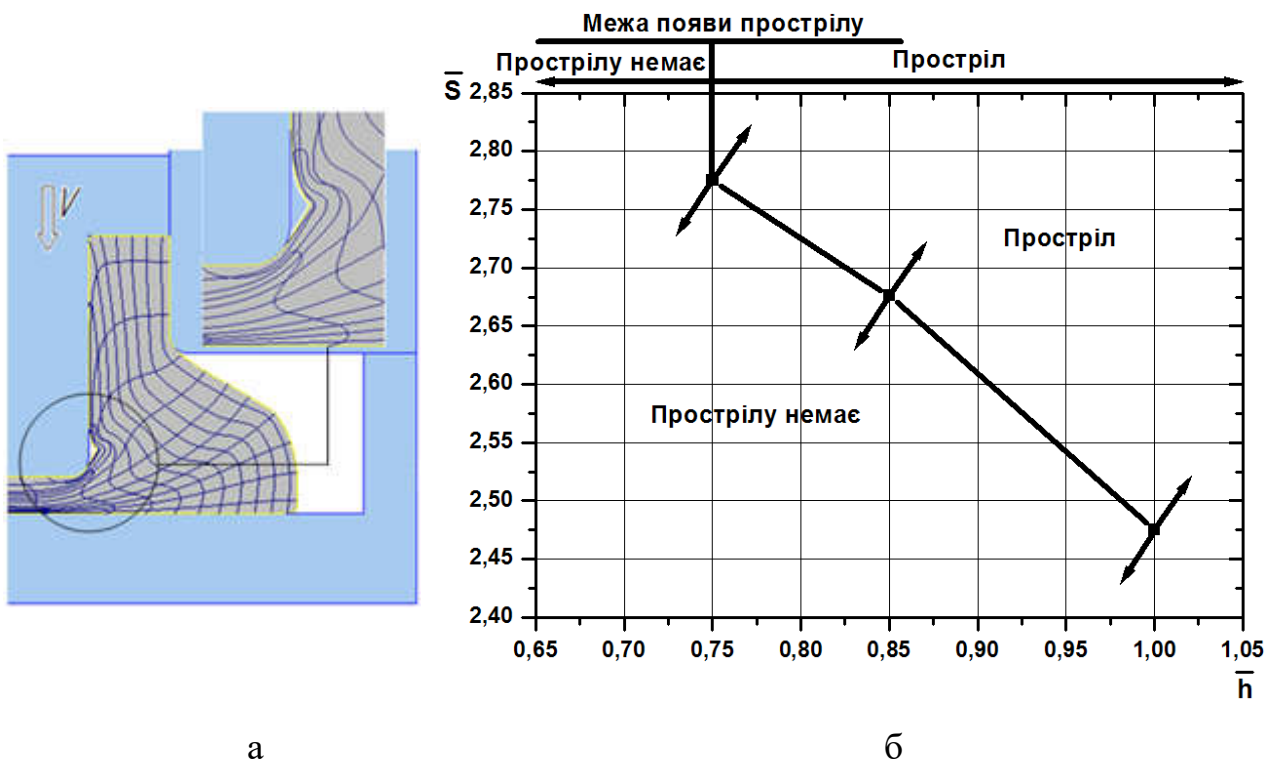


Рисунок 6.47 – Утворення дефекту у вигляді прострілу $h/R_0=1,0$ (а) та діаграма залежності появи прострілу при зміні відносної висоти зовнішнього фланцю $\bar{S} = S/R_1$, $\bar{h} = h/R_0$ (б)

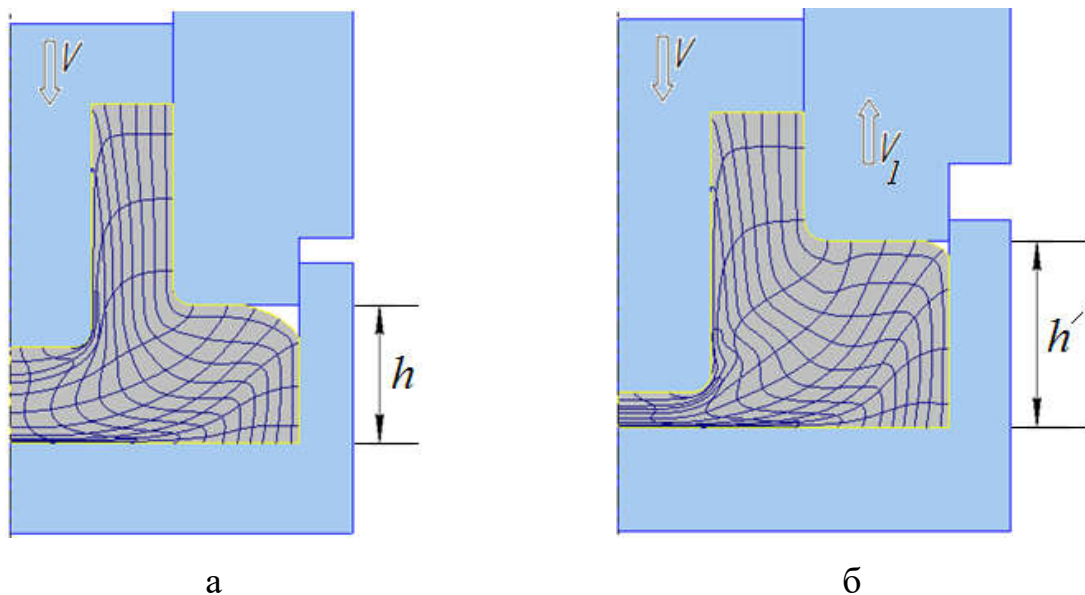


Рисунок 6.48 – Усунення дефекту прострілу за рахунок регулювання кінематики руху інструменту: а – $h/R_0=0,85$; б – $h'/R_0=1,0$; $V_1/V=0,375$

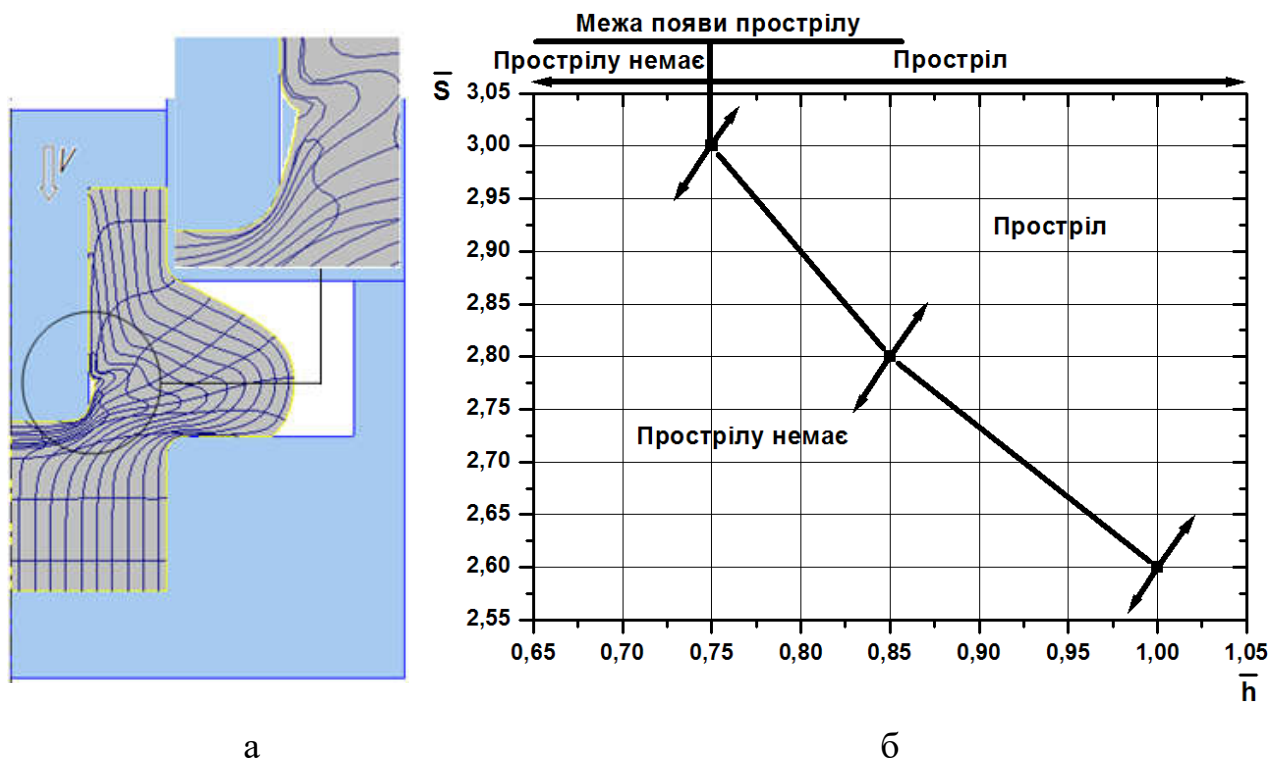


Рисунок 6.49 – Утворення дефекту прострілу $h/R_0=2,0$ (а) та діаграма залежності появи утягнення при зміні відносної висоти зовнішнього фланцю $\bar{S} = S/R_1, \bar{h} = h/R_0$ (б)

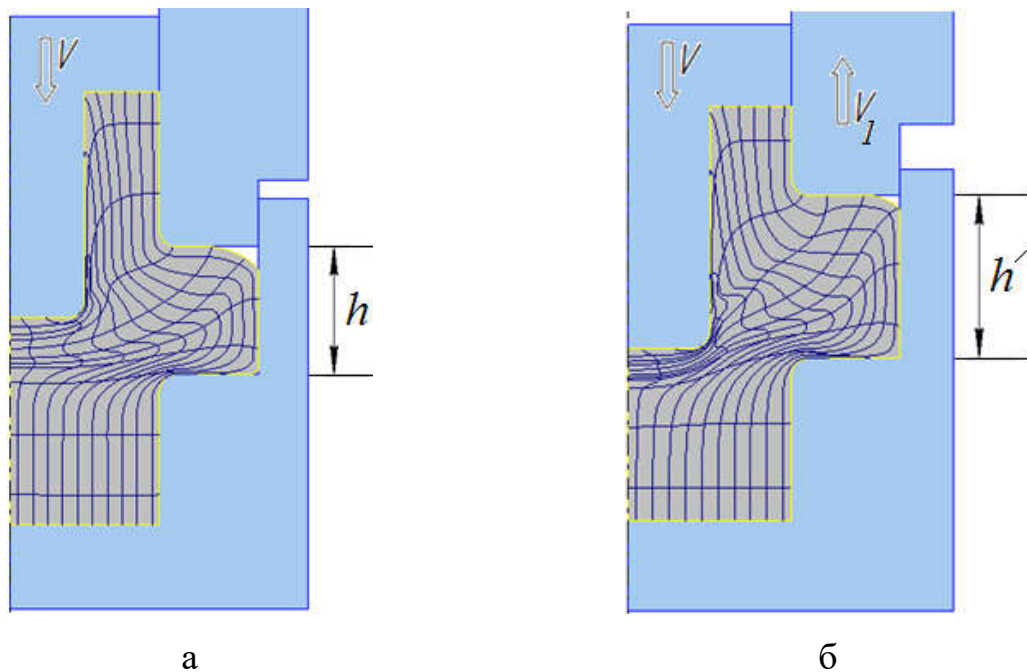
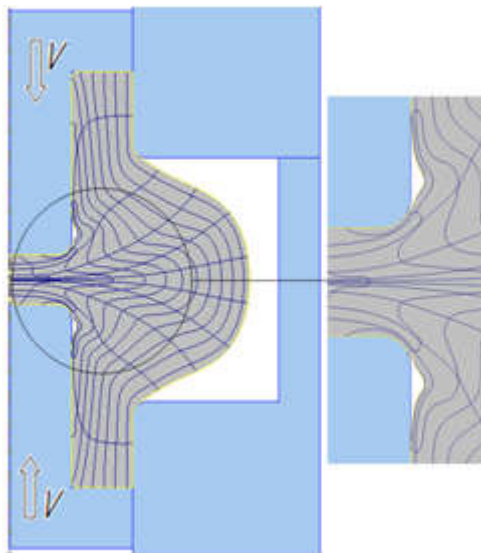


Рисунок 6.50 – Усунення дефекту прострілу за рахунок регулювання кінематики руху інструменту: а – $h/R_0=0,85$; б – $h/R_0=1,0$; $V_1/V=0,475$



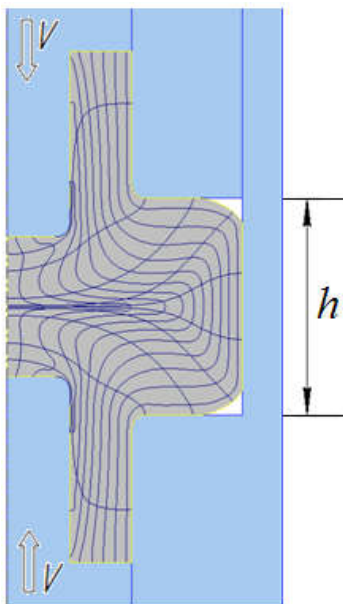
а



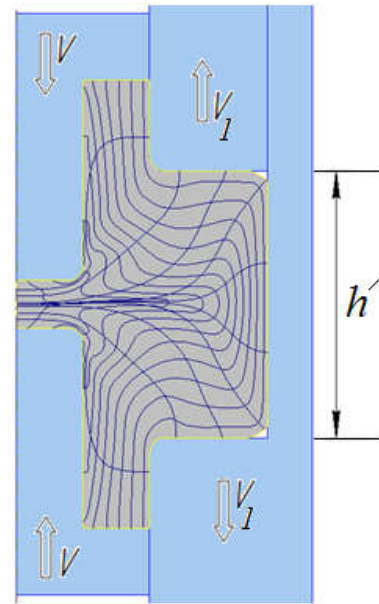
б

Рисунок 6.51 – Утворення дефекту прострілу $h/R_0=2,0$ (а) та діаграма залежності появи утягнення при зміні відносної висоти зовнішнього фланцю

$$\bar{S} = S/R_1, \bar{h} = h/R_0 \quad (б)$$



а



б

Рисунок 6.52 – Усунення дефекту прострілу за рахунок регулювання кінематики руху інструменту: $h/R_0=1,75$; $h'/R_0=2,0$; $V_1/V=0,325$

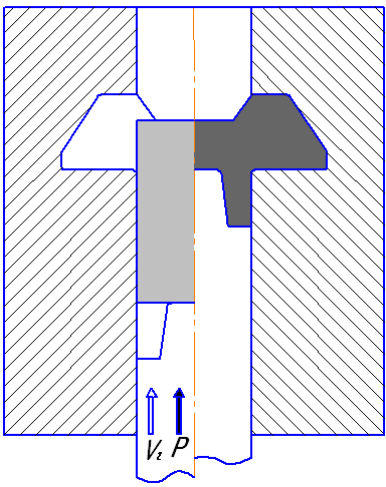
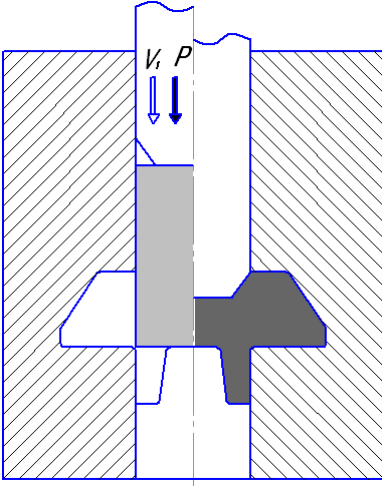
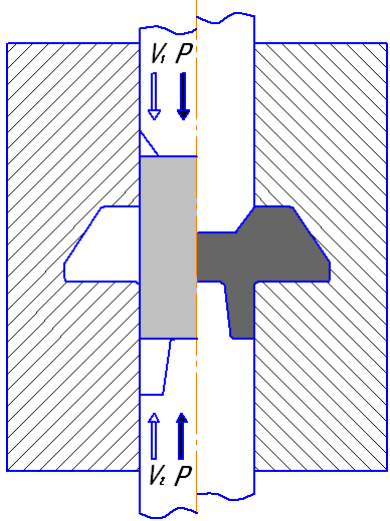
Кінематичні схеми штампування		
		
одностороння подача металу при русі пуансона вгору	одностороння подача металу при русі пуансона вниз	двостороння подача металу

Рисунок 6.53 – Схеми штампування деталі типу «шестерня»

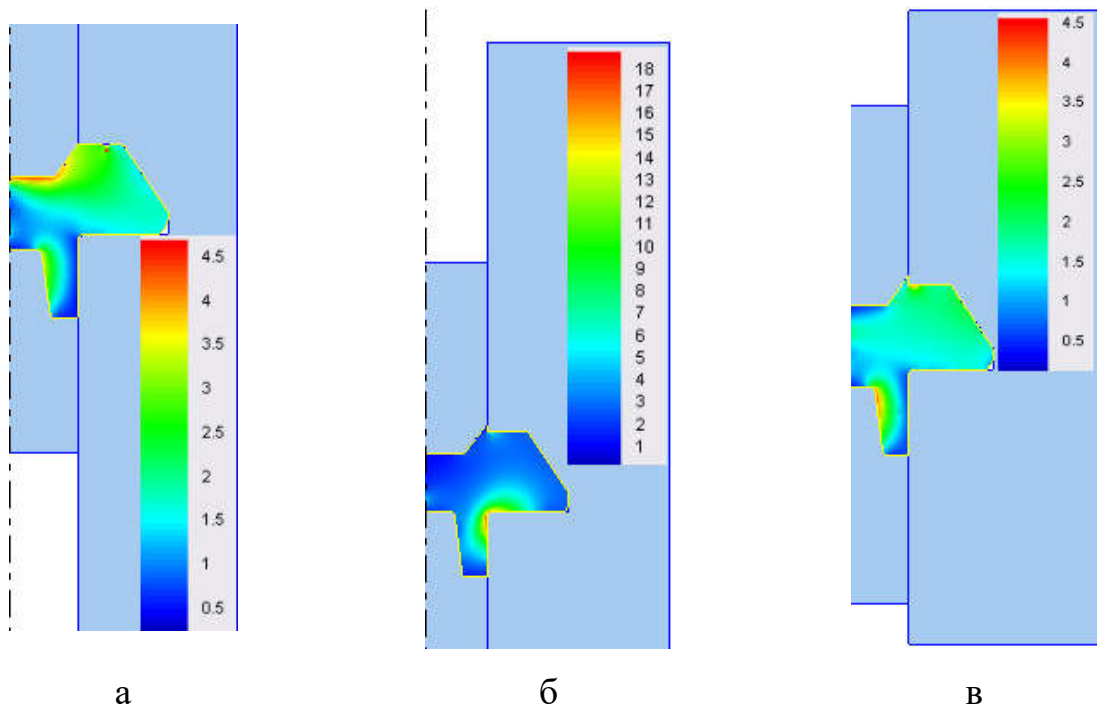


Рисунок 6.54 – Розподілу інтенсивності деформація в процесі закритого штампування при русі пуансона вгору (а), при русі пуансона вниз (б), при двосторонній подачі (в)

В процесі закритого штампування з двосторонньою подачею металу інтенсивність деформацій на початковому етапі деформування знаходиться в межах $0,8 \dots 1,6$. На наступних етапах деформування відбувається рівномірний розподіл інтенсивності деформацій в межах $1 \dots 1,5$. Дана схема деформування має сприятливий напружено-деформований стан і рекомендована до використання на практиці.

Сила деформування зростає протягом всього процесу. Мінімальні значення сили спостерігаються при схемі штампування з двосторонньою подачею металу, що вигідно відрізняє дану схему від інших схем деформування. Максимальні сили потрібні для схеми штампування при русі пуансона вгору.

Отримання складного профілю деталі супроводжується утворенням затиску (рис. 6.55). Регулювання кінематичного впливу та геометрії інструменту дозволяє усунути подібне явище.

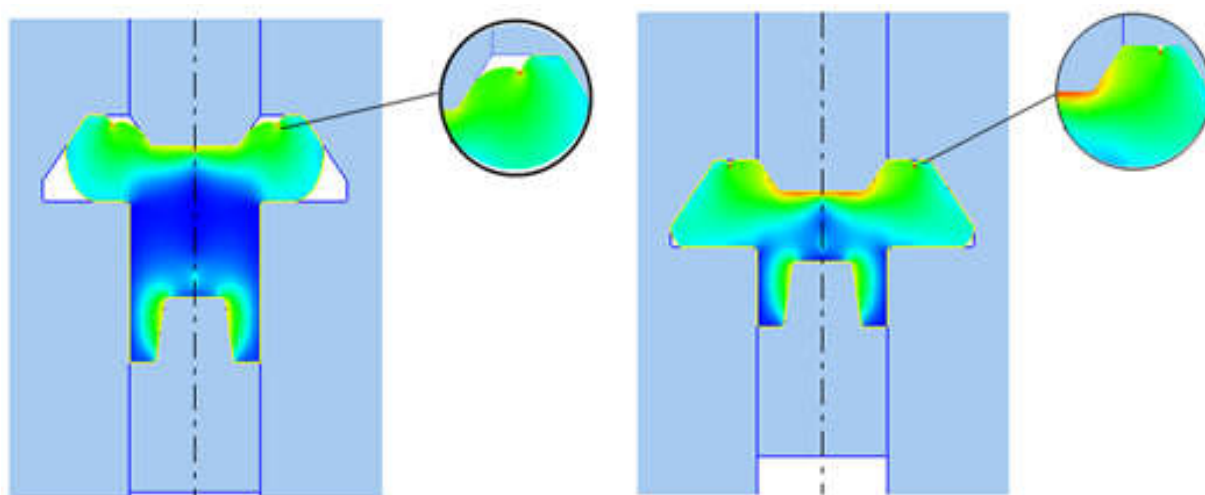
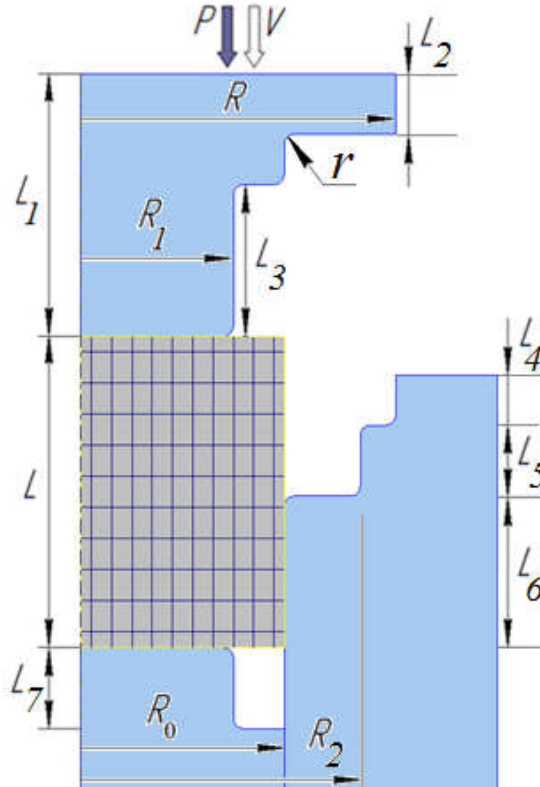
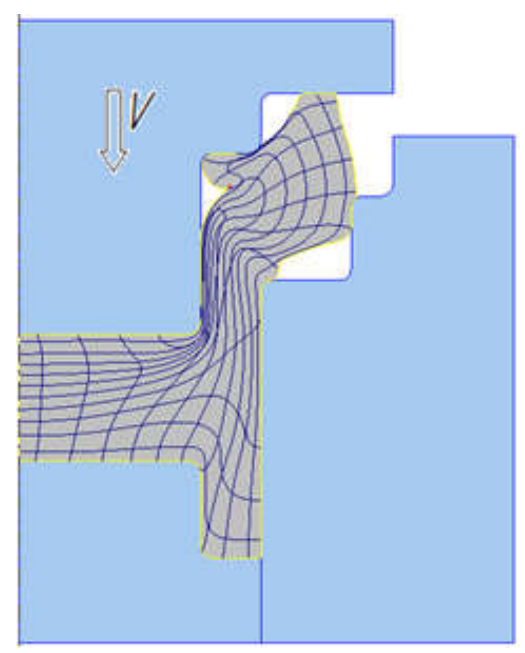
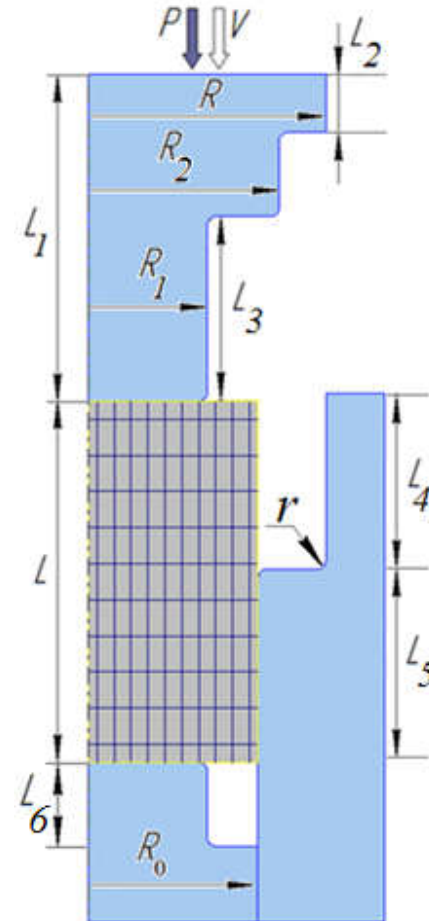
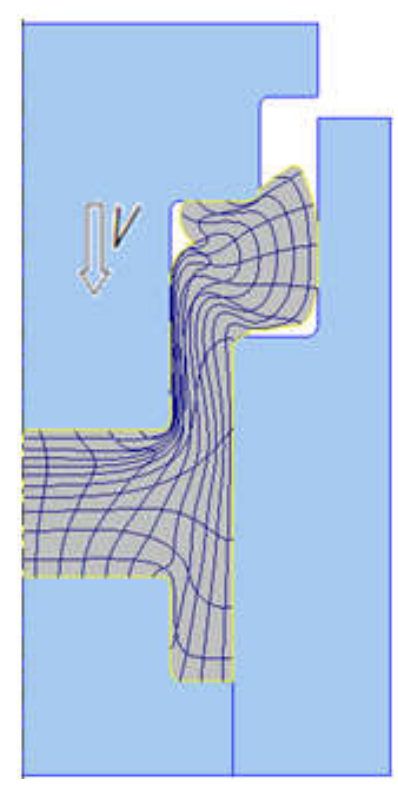


Рисунок 6.55 – Стадії утворення дефекту

Формування складнопрофільованих стаканів (табл. 6.4) супроводжується дефектоутворенням. Дефектоутворення може бути викликано нераціональними потоками матеріалу і нерозумним напруженням та розподіл температур в заготовці і оснастки. У цьому дослідженні, механізми формування дефектів і їх запобіганню у штампуванні

Таблиця 6.4 – Схема закритої штампування стакану з фланцем (а), одержуваний дефект (б) з матеріалу АМцМ і $\mu=0,08$

	а	б
1		
2		

	а	б
3	 Diagram of a stepped profile with dimensions and forces. The profile consists of several horizontal and vertical segments. The total height is L. The segments are labeled with lengths $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7$. The forces P and V are applied at the top. The reaction forces R, R_1, R_0, R_2 are indicated. The radius r is shown at the corner of the profile.	 Finite element mesh of the stepped profile, showing the distribution of the force V (indicated by a downward arrow).
4	 Diagram of a stepped profile with dimensions and forces. The profile consists of several horizontal and vertical segments. The total height is L. The segments are labeled with lengths $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$. The forces P and V are applied at the top. The reaction forces R, R_2, R_1, R_0 are indicated. The radius r is shown at the corner of the profile.	 Finite element mesh of the stepped profile, showing the distribution of the force V (indicated by a downward arrow).

осесиметричних фланцевих частин систематично вивчені за допомогою методу скінченних елементів.

Осесиметричні фланцеві компоненти широко виготовляють в промисловості ОМТ і дефект у вигляді складок є найбільш поширеним дефектом в цій категорії продуктів. Уникнення цього дефекту є актуальною проблемою.

Для моделювання обрані наступні геометричні параметри:

– для схеми 1 (табл. 6.4) : $R_0=35$ мм, $R=52,5$ мм, $R_1=25$ мм, $R=10$ мм, $r=2$ мм, $L=66$ мм, $L_1=45$ мм, $L_2=30$ мм, $L_3=30$ мм, $L_4=18$ мм;

– для схеми 2: $R_0=20$ мм, $R=30$ мм, $R_1=15$ мм, $R_2=22,5$ мм, $R_3=26$ мм, $r=2$ мм, $L=21,1$ мм, $L_1=22$ мм, $L_2=5$ мм, $L_3=11$ мм, $L_4=8$ мм, $L_5=6$ мм, $L_6=10$ мм;

– для схеми 3: $R_0=20$ мм, $R=31$ мм, $R_1=15$ мм, $R_2=27,5$ мм, $r=2$ мм, $L=30,8$ мм, $L_1=26$ мм, $L_2=6$ мм, $L_3=15$ мм, $L_4=5$ мм, $L_5=7$ мм, $L_6=15$ мм, $L_7=8$ мм;

– для схеми 4: $R_0=20$ мм, $R=28$ мм, $R_1=14$ мм, $R_2=22,5$ мм, $r=2$ мм, $L=43$ мм, $L_1=39$ мм, $L_2=76$ мм, $L_3=22$ мм, $L_4=21$ мм, $L_5=23$ мм, $L_6=10$ мм.

Розглянемо моделювання схеми №1 (див. табл. 6.4). Максимальне викривлення форми ділильна сітка набула в зонах безпосереднього переміщення металу в порожнину матриці для утворення профілю (рис. 6.56). Аналіз характеру зміни розподілу деформацій показує, що максимальна інтенсивність деформацій при відносному ході $S/R_0=0,6$ зосереджена в центральній зоні верхнього і нижнього осередка деформацій. При відносному ході $S/R_0=1,8$ спостерігається утворення дефекту в вигляді утягнення. Мінімальні значення інтенсивності деформацій спостерігаються в зонах безпосереднього контакту поверхні заготовки з інструментом.

При утворенні більшої кількості фланців максимальні зміни осередків ділильної сітки спостерігаються в зонах течії металу в порожнину матриці. Центральна зона також зазнає істотних змін структури осередків. В процесі деформування максимальні значення інтенсивності розподілу деформацій 0,75 спостерігаються на ділянках кромки заглиблень заготовки (рис. 6.57).

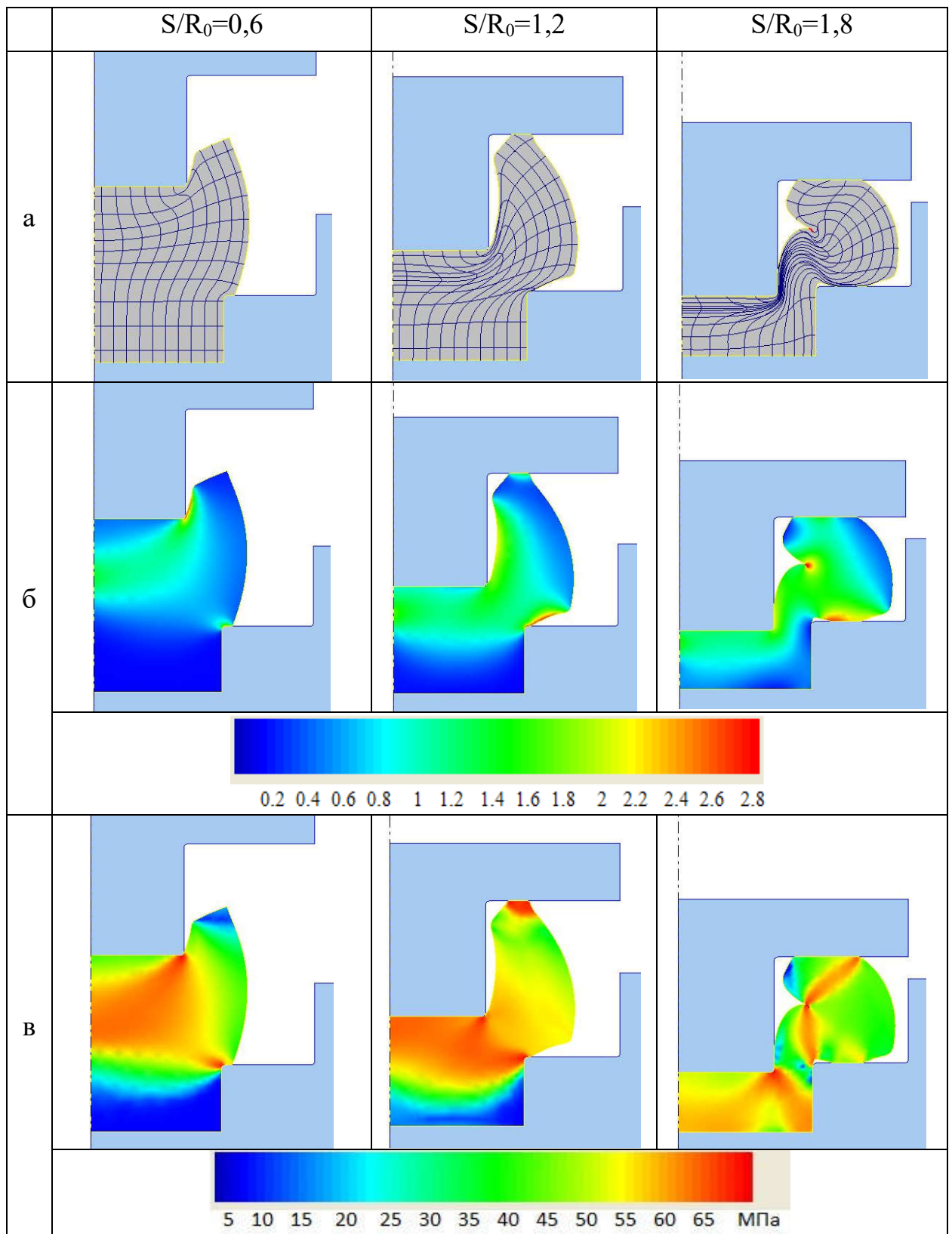


Рисунок 6.56 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при закритому штампуванні зразка №1

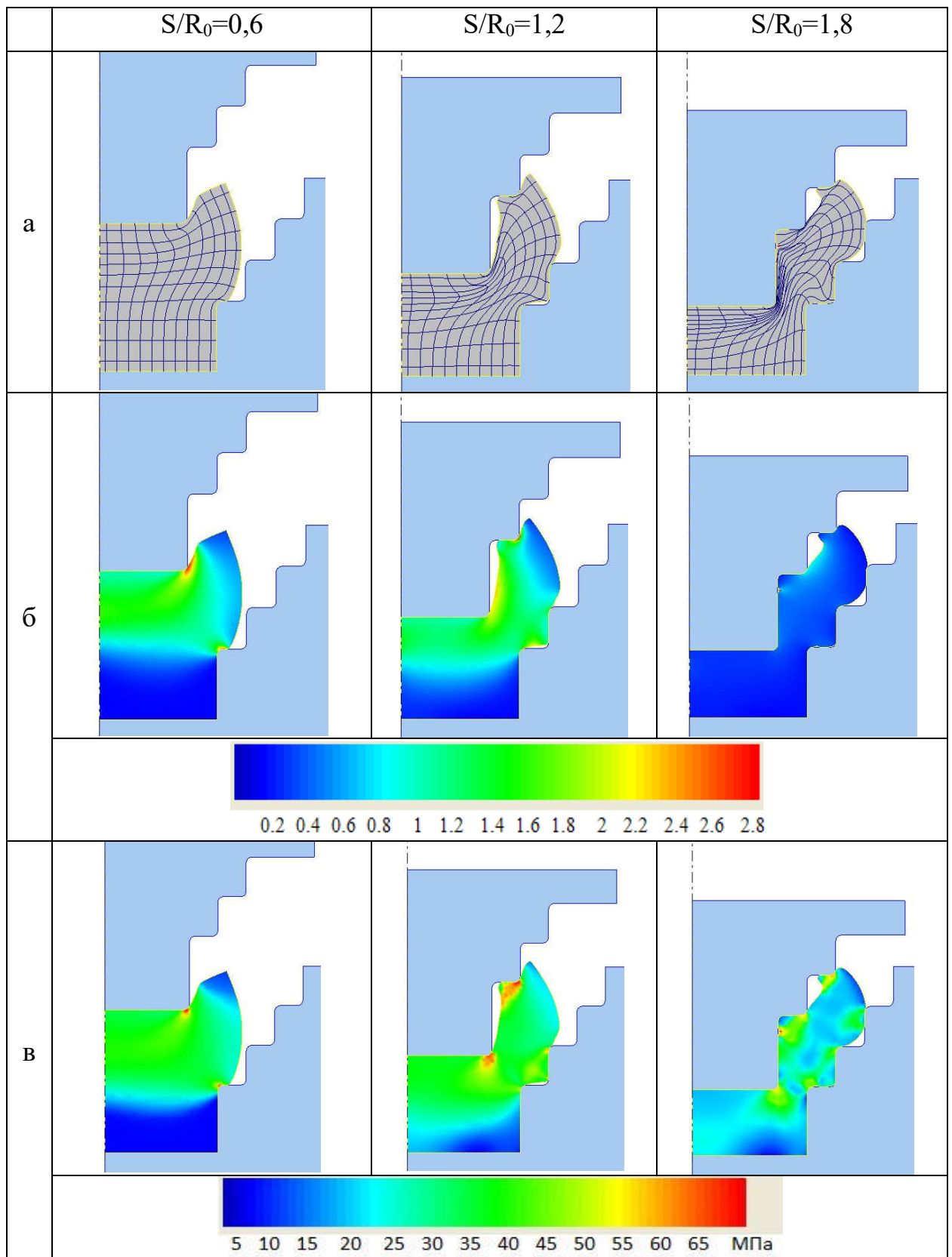


Рисунок 6.57 – Викривлення діляльної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при закритому штампуванні зразка №2

Мінімальні значення інтенсивності розподілу деформацій 0,05 спостерігаються в центральній зоні поглиблень при відносному ході 1,2. Центральна частина заготовки піддається рівномірному розподілу інтенсивності деформацій в діапазоні значень 0,4 – 0,5.

При відносному ході 1,8 інтенсивність еквівалентних напружень приймає максимальні значення практично по всьому об'єму заготовки і знаходиться в межах 60...65 МПа. При відносному ході 1,8 інтенсивність еквівалентних напружень має постійні значення в межах 55...65 МПа по всьому об'єму заготовки. У зонах поглиблень при даному ході спостерігаються мінімальні значення і становлять 25 МПа. Однак дефект так само присутній.

Моделювання для схеми №3 (рис. 6.58). Максимальні зміни осередків ділильної сітки спостерігаються в заповнення порожнин матриці. Дані викривлення мають різний характер формозміни, що є наслідком прийнятої форми заготовки. На кінцевому етапі формозміни викривлення осередків ділильної сітки щодо рухомого інструменту мають хвилеподібний характер розподілу. Максимальна інтенсивність деформацій спостерігається при відносному ході 1,8. На даному етапі заготовка відчуває рівномірний розподіл інтенсивності деформацій за винятком контактних зон. Внаслідок прийнятої форми заготовки спостерігається істотна відмінність форми осередка деформацій в контактних зонах.

Інтенсивність еквівалентних напружень набуває максимального значення $\sigma_i=65$ МПа в зонах зіткнення кромки пуансона з деформованою заготовкою при відносному ході 1,8. Мінімальні значення зберігаються при відносному ході 0,6 і 1,2 в зоні поглиблення заготовки і складають $\sigma_i=35...50$ МПа.

Моделювання схеми №4 представлено на рис. 6.59. Викривлення ділильної сітки в процесі формозміни відбувається по всьому об'єму заготовки. Аналіз деформованого стану показав, що інтенсивність розподілу деформацій відбувається рівномірно по всьому об'єму заготовки і знаходиться в межах $\varepsilon_i=0,25...0,5$. Мінімальні значення деформацій спостерігаються в центральних зонах заглиблень і складають $\varepsilon_i=0,05 - 1$.

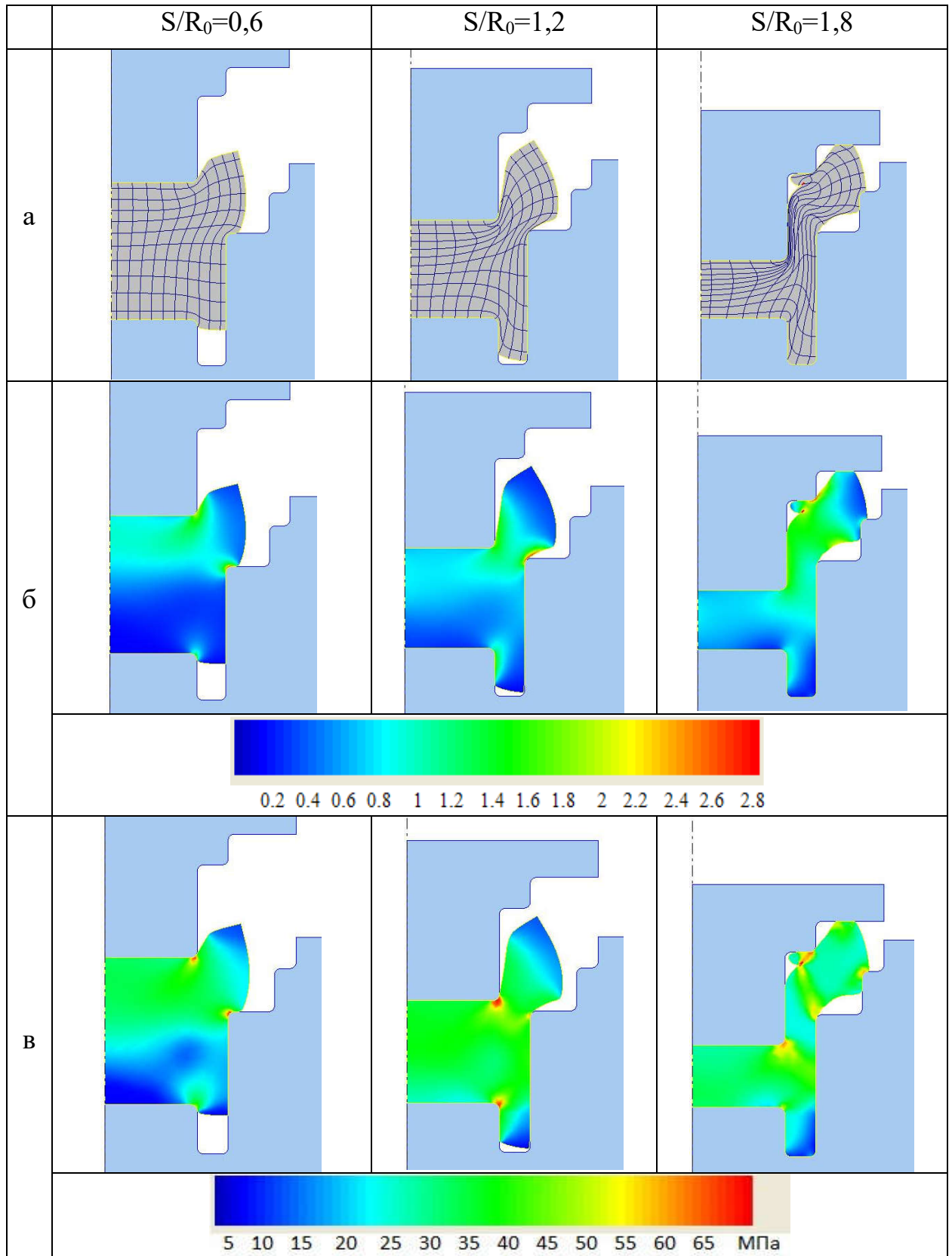


Рисунок 6.58 – Викривлення діляльної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування зразка №2

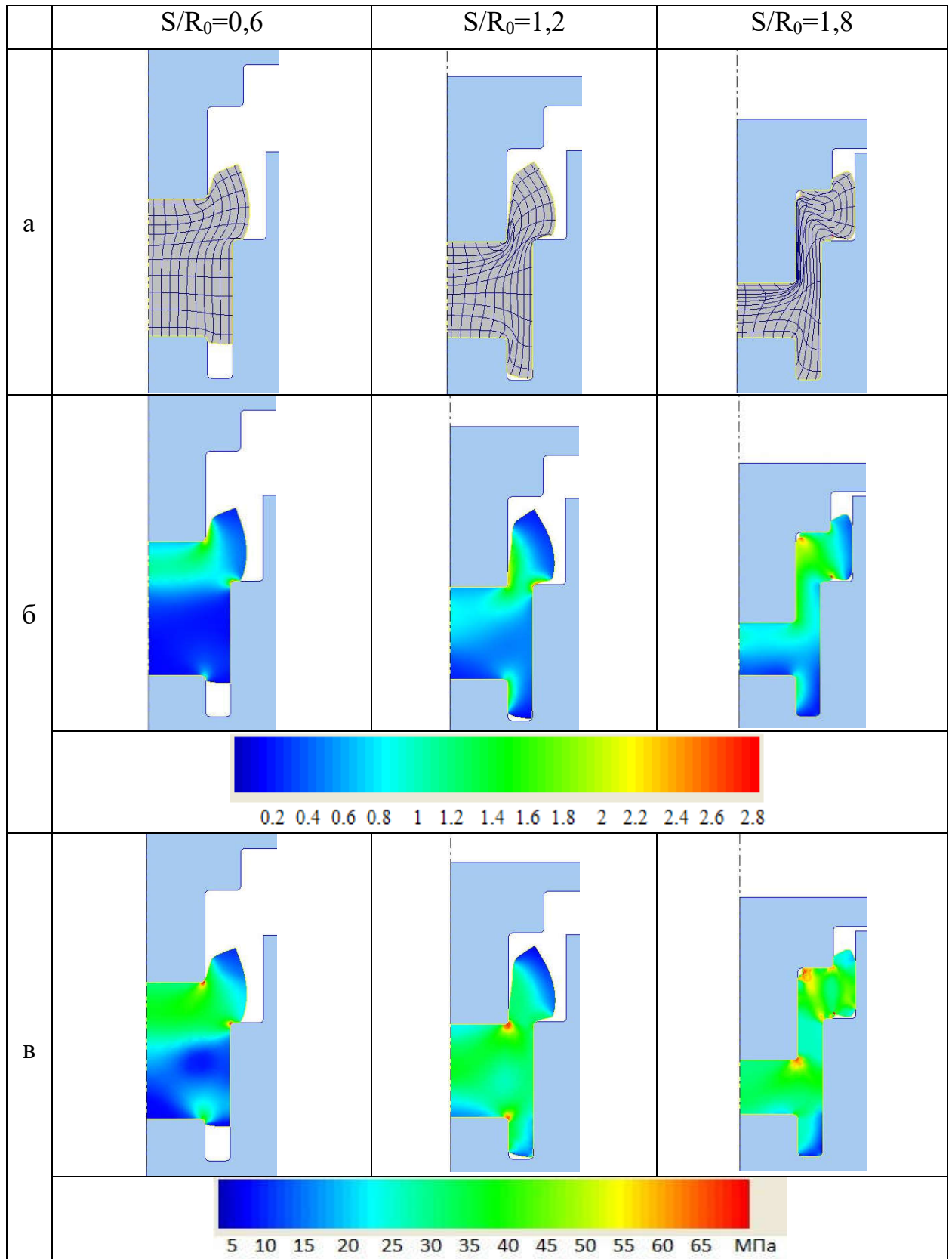


Рисунок 6.59 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування зразка №5

Аналіз напруженого стану показав, що центральна зона відчуває максимальні значення еквівалентних напружень в межах $\sigma_i=62\dots64$ МПа.

Отримання відносно високих фланців супроводжується утворенням затиску при формуванні внутрішньої поверхні фланцю доцентровим видавлюванням. В свою чергу формування складнопрофільованих виробів (табл. 6.4, б) на етапі формування перехідних елементів також показує можливість дефектоутворення.

Результати досліджень показали, що прикладення кінематичного впливу до нижньої півматриці дозволяє уникнути формування затиску та рекомендувати швидкість руху матриці при яких буде спостерігатися бездефектне формоутворення деталі (рис. 6.60, 6.61).

6.7 Експериментальне дослідження процесів комбінованого видавлювання

Для перевірки отриманих теоретичних досліджень силового режиму та формоутворення проведено ряд експериментів для процесів комбінованого та суміщеного видавлювання.

Фізичне моделювання процесу суміщеного доцентрового та радіального видавлювання було проведено з використанням матеріалу свинець С1 та алюмінієвого сплаву АД33м в універсальному переналагоджуваному штампі (див. розділ 2). Варіювання товщини фланцю h провалилося в межах 0..20 мм, зовнішній діаметр заготовки в межах 45...36 мм, висота заготовки в межах 50...65 мм. При розрахунку коефіцієнт тертя прийнятий $\mu=0,1$. Розміри деталі прийняті рівними розмірам інструменту: $2R_0=45$ мм; $2R=28$ мм.

В ході експериментальних досліджень реєстрували сили видавлювання (табл. 6.5). При вивченні картин поетапної зміни ділильної сітки (рис. 6.62) видно, що метал, що знаходиться під пуансоном і над протипуансоном, практично не деформується. При радіальному видавлюванні матеріалу, в кругову порожнину постійної висоти, товщина

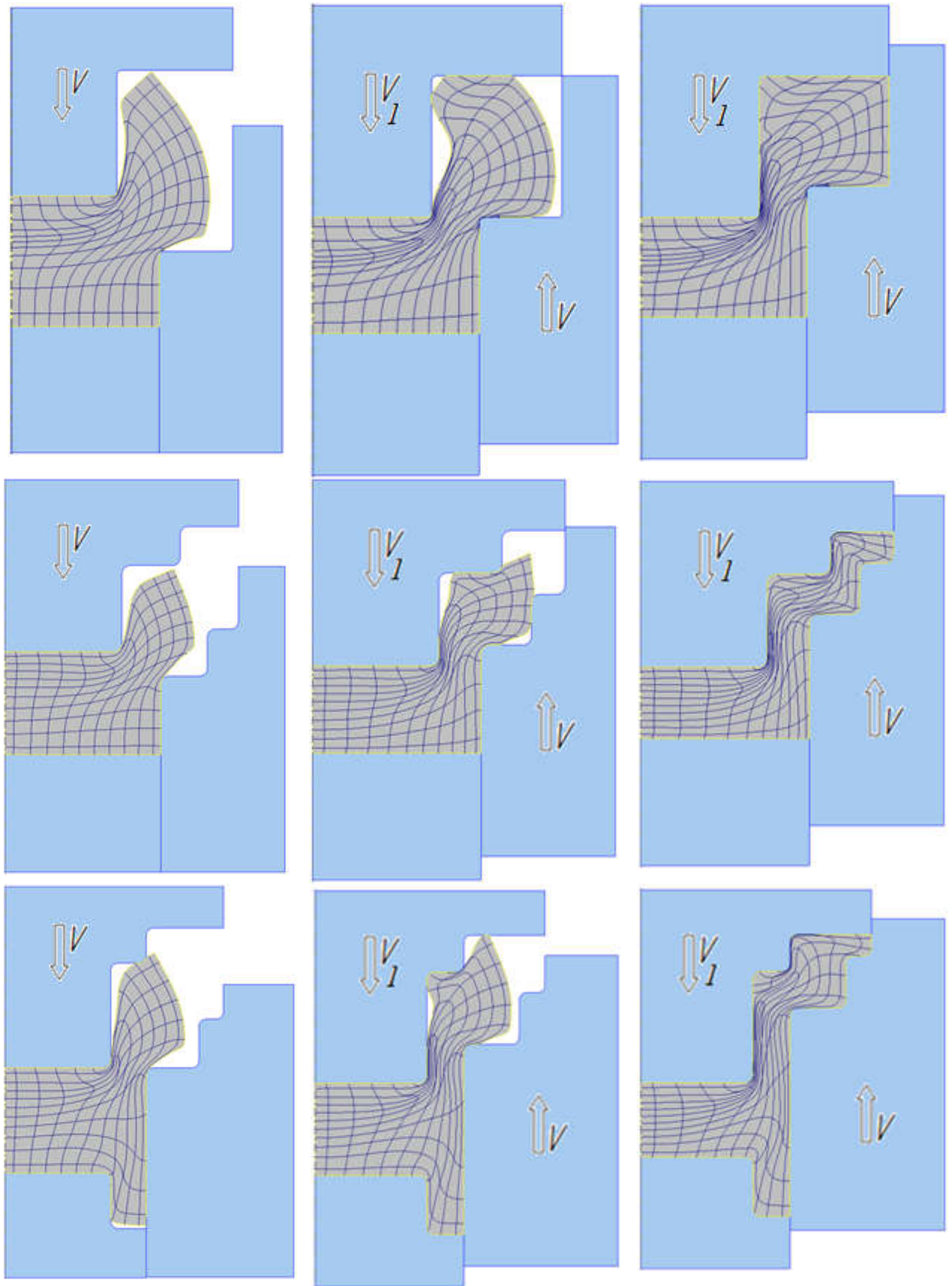


Рисунок 6.60 – Схеми кінематичного регулювання руху інструменту при отриманні складнопрофільованих деталей, лист 1

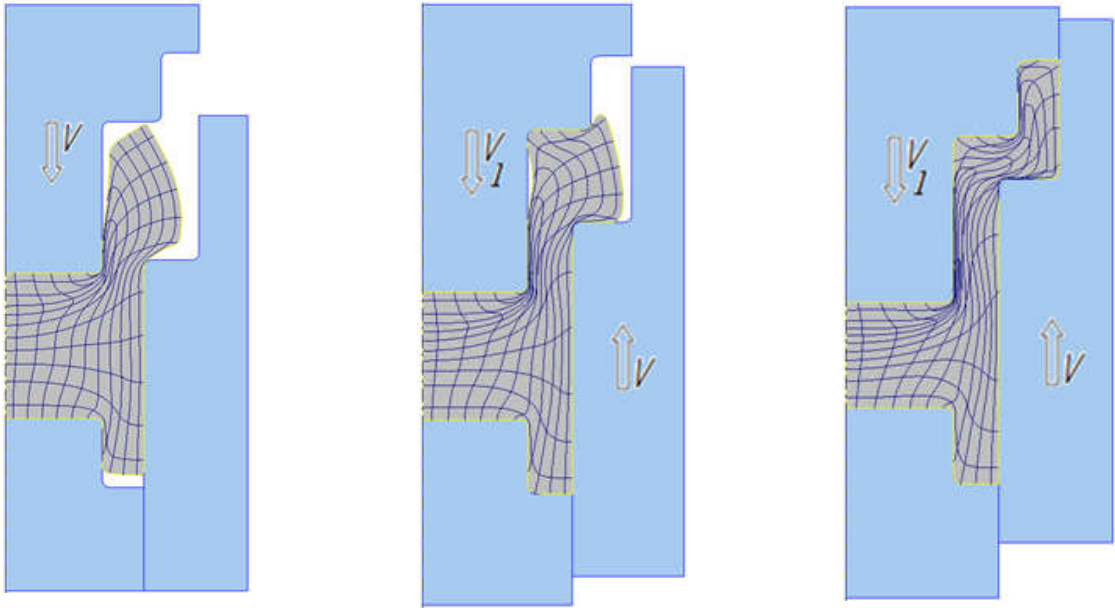


Рисунок 6.60 – Схеми кінематичного регулювання руху інструменту при отриманні складнопрофільованих деталей, лист 2

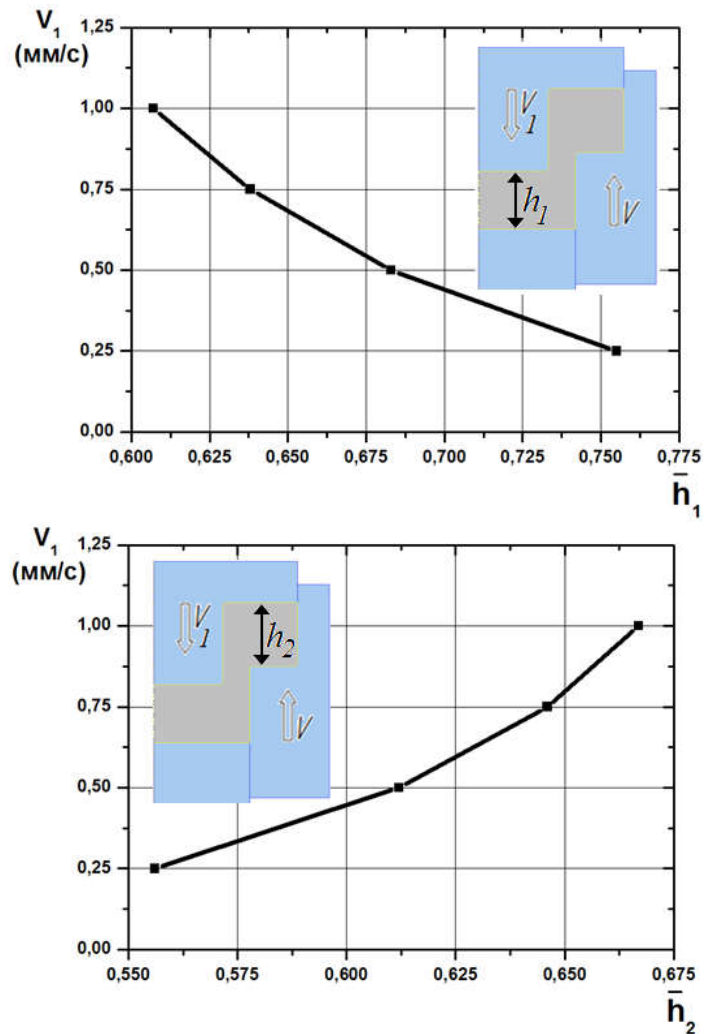


Рисунок 6.61 – Графіки залежності швидкості руху інструменту від геометричних параметрів деталі для формування різних елементів складнопрофільованої деталі, лист 1

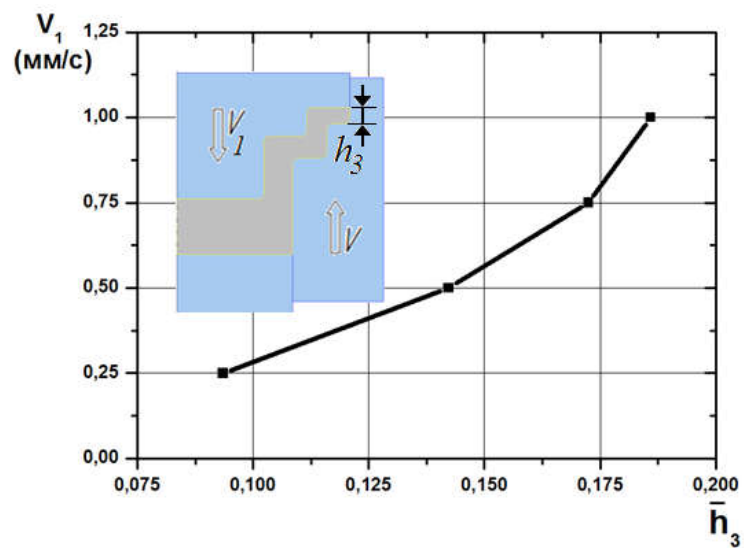
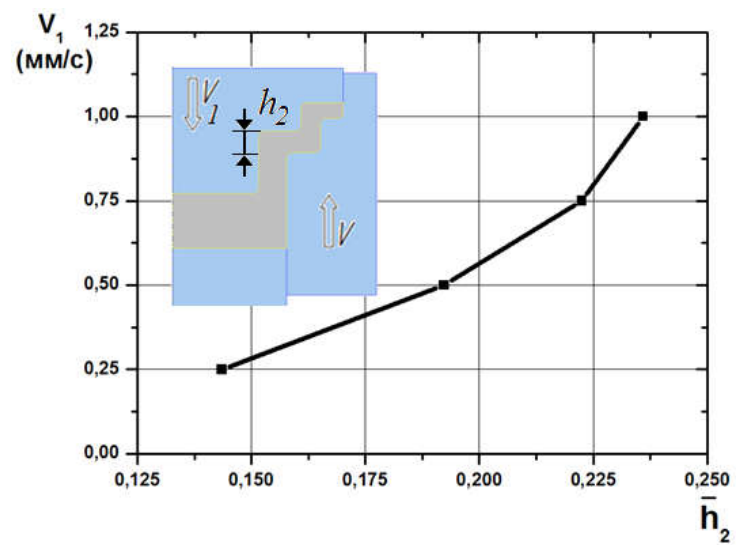
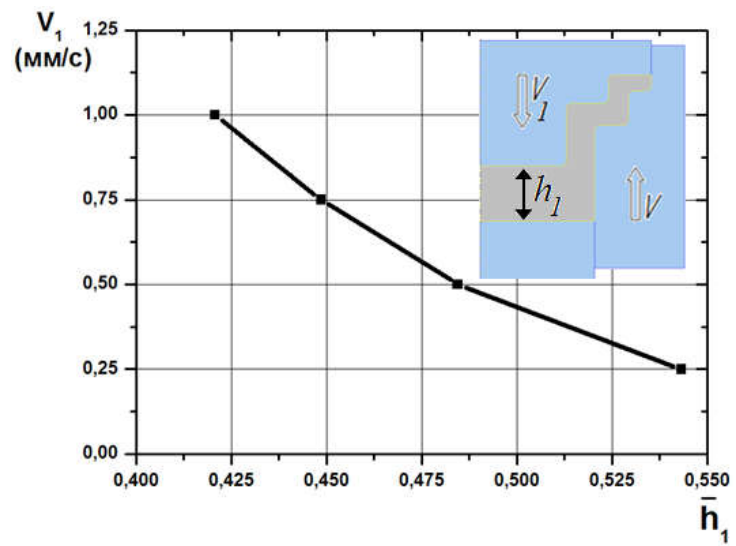


Рисунок 6.61 – Графіки залежності швидкості руху інструменту від геометричних параметрів деталі для формування різних елементів складнопрофільованої деталі, лист 2

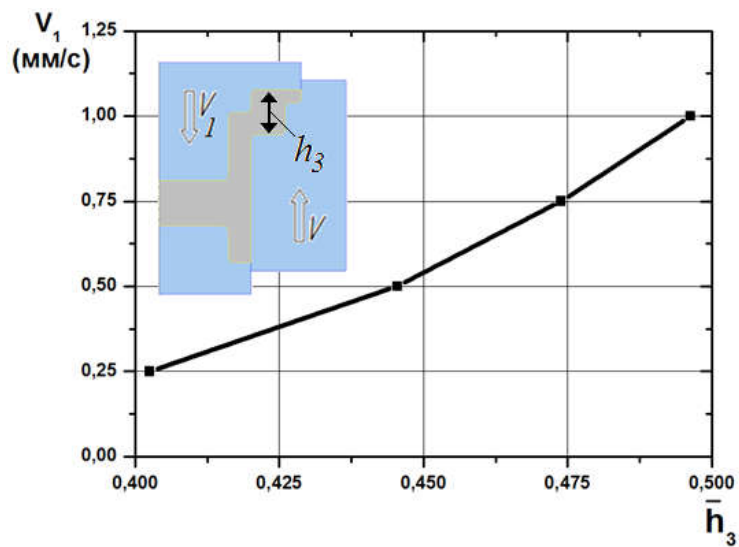
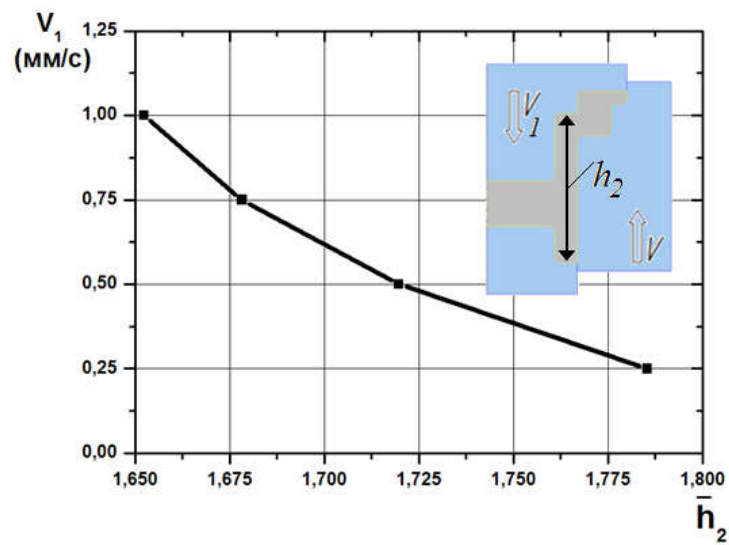
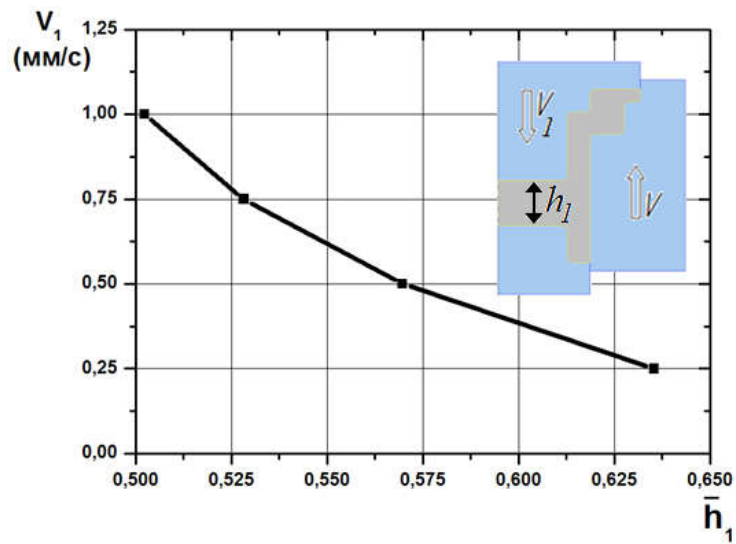


Рисунок 6.61 – Графіки залежності швидкості руху інструменту від геометричних параметрів деталі для формування різних елементів складнопрофільованої деталі, лист 3

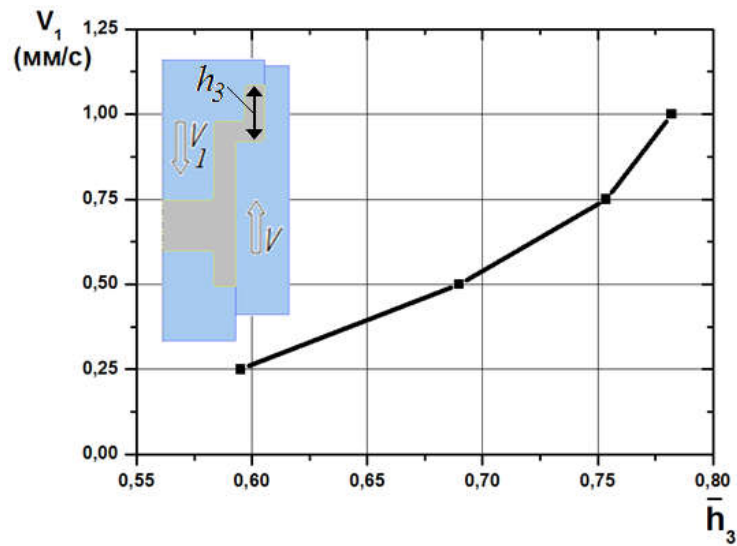
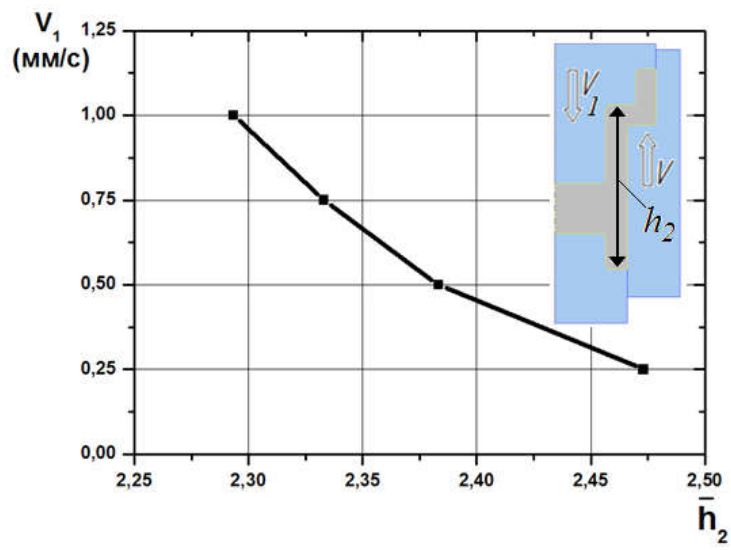
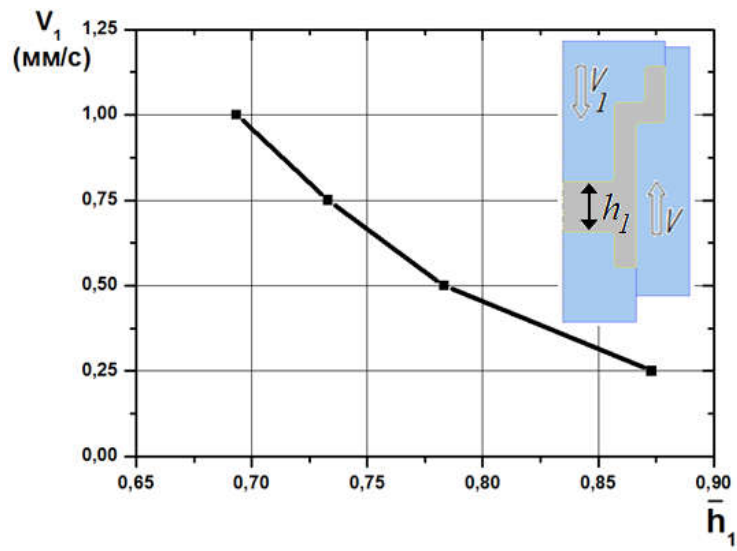


Рисунок 6.61 – Графіки залежності швидкості руху інструменту від геометричних параметрів деталі для формування різних елементів складнопрофільованої деталі, лист 4

видавлюємого фланця в міру наближення до осі залишається незмінною і тільки на бічній поверхні фланця утворюється бочкоподібність внаслідок тертя об оправку. Значний вплив на характер течії роблять радіуси заокруглення перехідної кромки від внутрішньої стінки заготовки до приймальної порожнини оправлення. При збільшенні радіуса інтенсивність течії металу у фланець зростає.

За результатами обробки параметрів перекручених осередків в зоні розвороту металу під фланець, в зоні осередку деформації, і точок, розташованих на умовній кривій, що з'єднує перехідну кромку внутрішньої стінки заготовки і приймальню порожнину оправлення, встановлено, що найбільш небезпечними з точки зору використання ресурсу пластичності є зони, прилеглі до перехідних кромок деформуючого інструменту. Тому конфігурація і геометричні параметри перехідних кромок створюють значний вплив на дефектоутворення при радіальному видавлюванні. Великим значенням радіусів заокруглення відповідає менша концентрація деформацій у перехідних кромок.

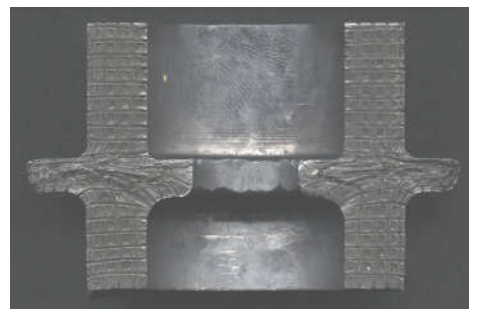
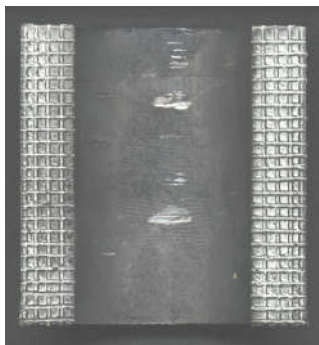
Для аналізу деформацій в осередку деформування проведено розрахунок методом ділильних сіток.

Проаналізувавши схеми (табл. 6.6), робимо висновки, що максимальне значення деформації знаходиться в зоні кромок фланців, причому більша деформація в відцентровому напрямку, так як в цій зоні діють напруження розтягу. Мінімальне значення деформації знаходиться в жорстких зонах під пуансоном і над протипуансоном, де метал практично не деформується. Також при меншому радіусі заокруглення біля кромок фланців деформація більше, так як це ускладнює протягом металу. Розподілу напружень також показує, що найбільші напруження знаходяться на периферії кромок фланців, менші в жорстких зонах.

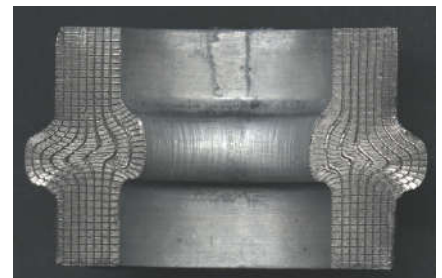
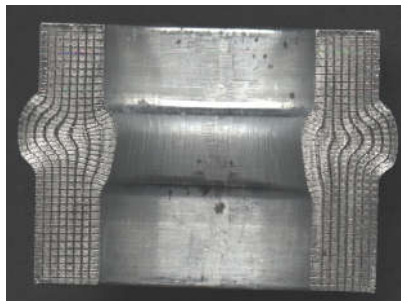
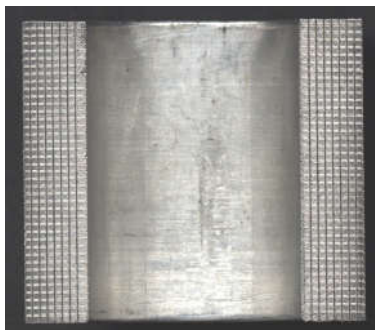
Аналіз схеми видавлювання порожнистих деталей зі змінною товщиною стінки показав, що в процесі деформування можна виділити дві характерні стадії протікання процесу: 1) поздовжньо-поперечне видавлювання фланця; 2) зворотне видавлювання стінки стакану.

Таблиця 6.5 – Результати експериментального дослідження процесу суміщеного видавлювання

Свинець С1			
№	Висота заготовки, мм	Хід, мм	Сила, Н
1	37	4,5	60
2	38	1	35
		3	53
3	38,15	2	41
		3,1	45
		5,1	55
Сплав АД33м			
1	40	1,1	296
2	38,9	2	385
3	38	3	420
4	37	4,5	472
5	35,5	5,3	490
6	34,7	6,3	522



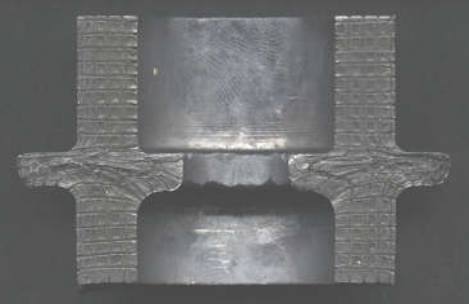
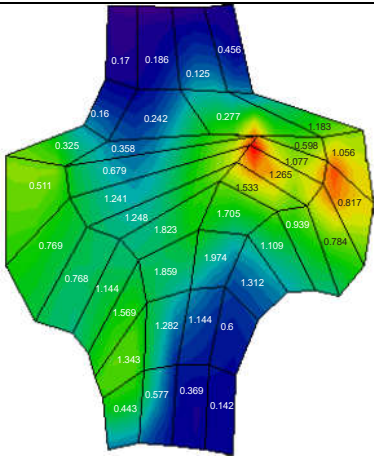
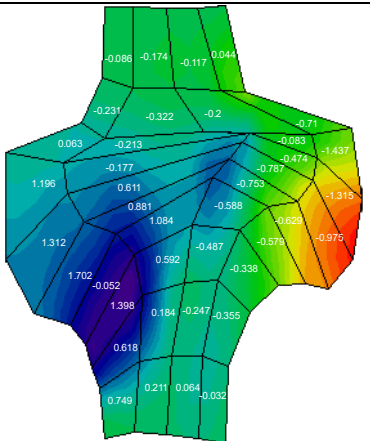
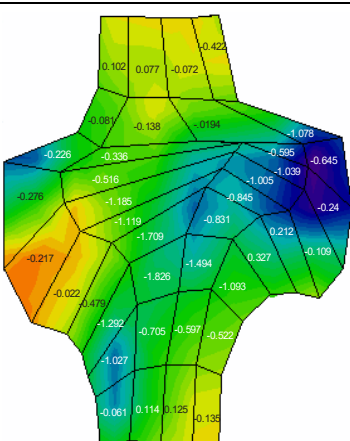
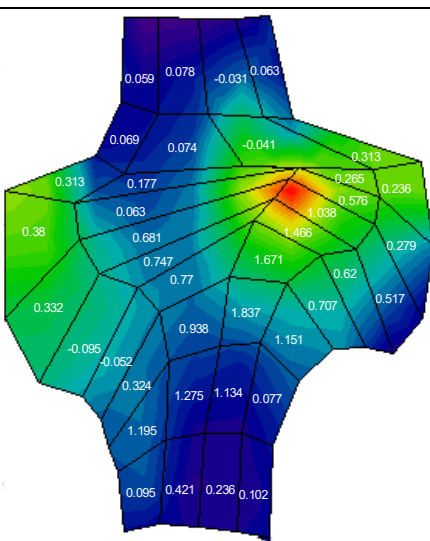
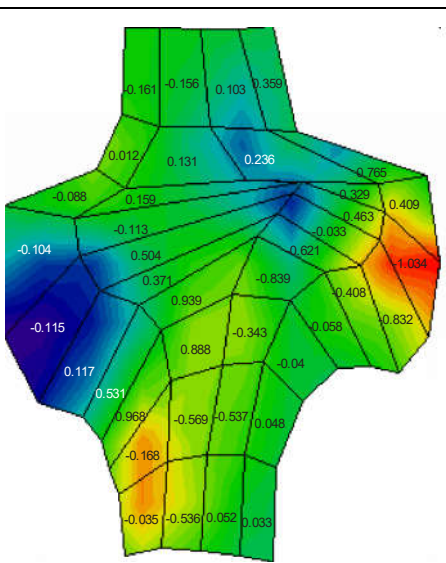
а



б

Рисунок 6.62 – Картини поетапної зміни ділильної сітки на зразках зі свинцю С1 (а) і сплаву АД33м (б)

Таблиця 6.6 – Розподіл компонент деформацій та інтенсивності деформацій для зразка зі свинцю С1

Деталь	ε_i
	
τ_{rz}	ε_z
	
ε_r	ε_θ
	

Таким чином, характерною особливістю для такого роду процесів є несталий режим деформування. Ці процеси необхідно розглядати на кожній окремо взятій стадії. У нашому випадку це стадії поздовжньо-поперечного (зворотно-радіального) і прямого (зворотного) видавлювання.

Аналіз експериментальних даних дозволив підтвердити результати теоретичного аналізу: найбільшій інтенсивності деформацій піддається ділянка, яка обмежена висотою поперечної порожнини і діаметром порожнини матриці (стінка стакану); елементи, що примикають до стінки матриці, зазнають стиснення в радіальному напрямку, тобто витягуються вгору; елементи, які розташовані на периферії фланця найменш викривленні.

Дані висновки також якісно підтверджує картина переміщення металу, яка отримана травленням на макроструктуру зразків з АД31 та викривлення ділильної сітки з Свинцю С1(рис. 6.63).

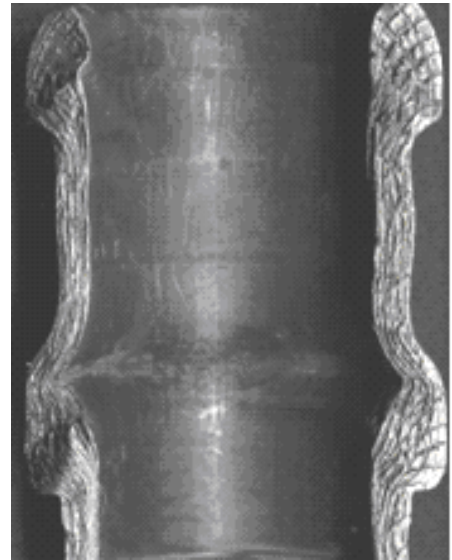
Експериментальні дослідження дозволили підтвердити картину формозмінення при одночасному переміщенні металу в кількох напрямках, співвідношення швидкостей переміщення, напрямок переважної течії, які прогнозовані за допомогою скінчено-елементної математичної моделі.

При реалізації процесу поздовжньо-поперечного видавлювання на картину переміщення металу впливає низка керуючих факторів. Конструкційним керуючим фактором, що визначає форму одержуваного виробу, є протяжність калібруючих пасків, величина і геометрія фасок на деформуючому інструменті. На рис. 6.64 зображені деталі з високим фланцем, отримані за допомогою поздовжньо-поперечного видавлювання.

Одним з найважливіших показників, які характеризують процес холодного об'ємного штампування і, зокрема, процес поздовжньо-поперечного видавлювання – є сила видавлювання. Цей показник є визначальним при конструюванні деформуючого інструмента і виборі обладнання, на якому буде здійснюватися процес видавлювання.



а



б

Рисунок 6.63– Картина плину металу, макроструктура; матеріал АД31 (а) та викривлення ділильної сітки, Свинець С1 (б)



Рисунок 6.64 –Деталі з високими фланцями, отримані поздовжньо-поперечним видавлюванням в рухомих матрицях

При холодному об'ємному штампуванні для всіх матеріалів, в тій чи іншій мірі, спостерігається ефект зміцнення, який призводить до суттєвого розкидання значень напруження плинності (σ_s) в осередку деформації.

На рис. 6.65 представлено графік залежності сили деформування від зазору (z) для матеріалу С1, з цього графіка бачимо, що при збільшенні зазору в діапазоні від 0...8 мм (100%), сила деформування зменшується від 40 кН до 30 кН (25%) на першій стадії; від 70 кН до 50 кН (29%) на другій стадії. Різниця у відсотковому значенні між першою та другою стадією складає 45%. Відхилення на початковій стадії і на заключній стадії процесу експериментального значення сили видавлювання від теоретичного не перевищує 5...8%.

На рис. 6.66 представлено графік залежності сили деформування від зазору (z) для матеріалу АД1, з цього графіка бачимо, що при збільшенні зазору в діапазоні 0...8 мм (100%), сила деформування зменшується від 250 кН до 180 кН (28%) на першій стадії; від 340 кН до 330 кН (3%) на другій стадії. Треба зазначити, що сила деформування на другій стадії більше ніж на першій стадії за рахунок того, що на I стадії матриця рухається. Різниця у відсотковому значенні між першою та другою стадією складає 45%.

За певних умов, на виробництві, при здійсненні процесів холодного об'ємного штампування, можна спостерігати явище дефектоутворення. На онові процесу поздовжньо-поперечного видавлювання в рухомих матрицях деталей типу стакан з декількома кільцевими фланцями було виявлено можливість виникнення чотирьох різновидів дефекту (рис. 6.67):

- Розрив фланця, вектор розвитку якого спрямований в радіальному напрямку до осі деталі, яка видавлюється;
- Невиконання форми і розмірів готового виробу;
- Не перпендикулярність фланця осі виробу;
- Утягнення на внутрішній стінці деталі в області фланців.

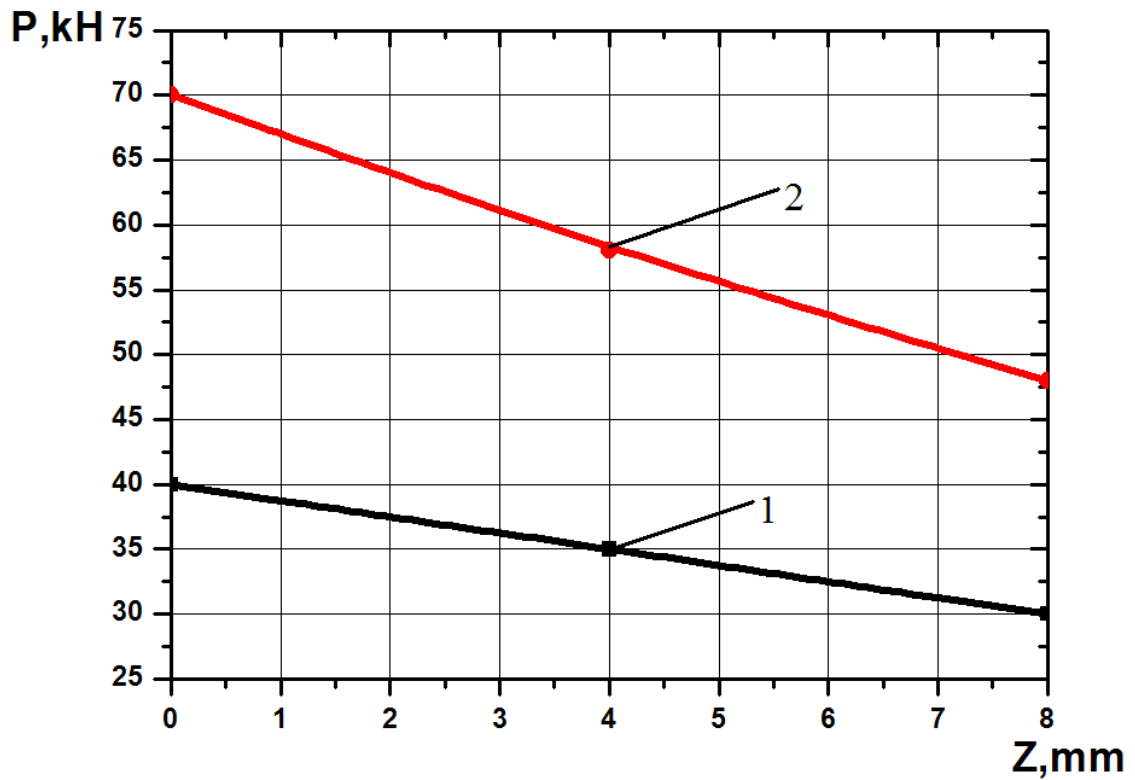


Рисунок 6.65 – Графік залежності сили деформування від зазору (z) для матеріалу С1: 1 – на I стадії, 2 – на II стадії

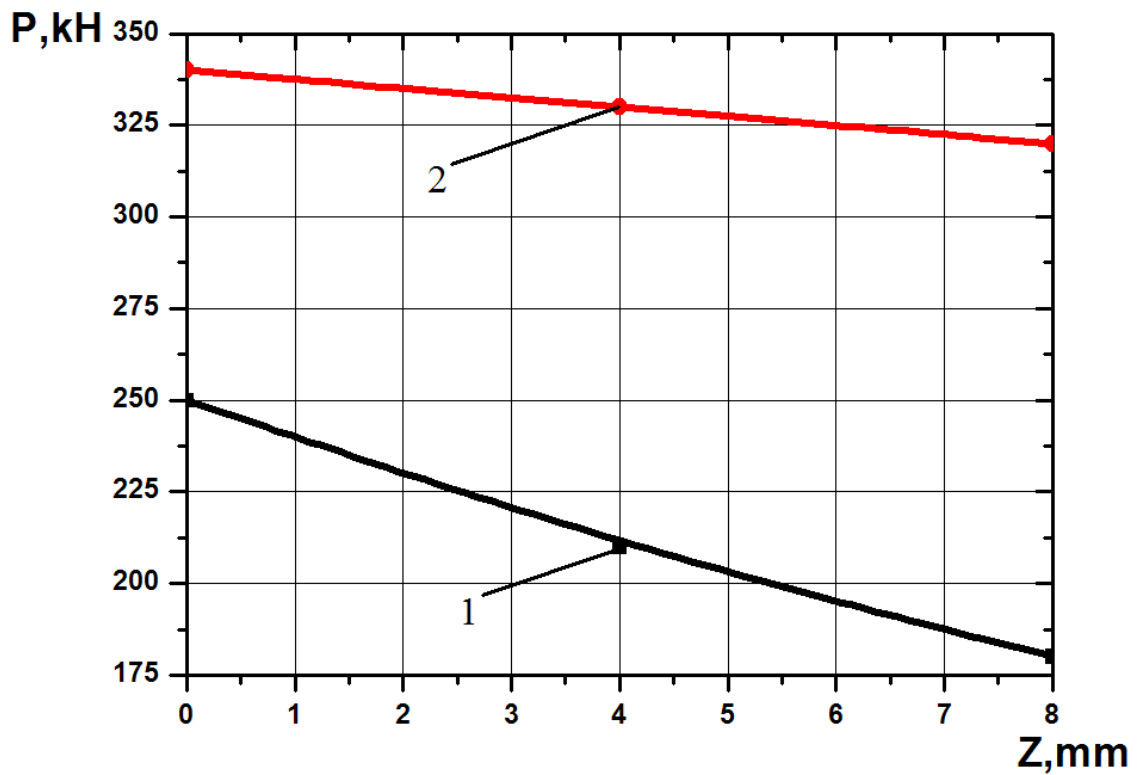


Рисунок 6.66 – Графік залежності сили деформування від зазору (z) для матеріалу АД1: 1 – на I стадії, 2 – на II стадії



Рисунок 6.67 – Види дефектів при видавлюванні в рухомих матрицях: утягнення на стінці в області фланця (а); розрив фланця (б); не перпендикулярність фланця осі виробу (в); невиконання форми (г)

Виникнення дефекту у вигляді розриву фланця спостерігається для малопластичних матеріалів або при малих значеннях товщини фланця (навіть для матеріалів С1 і АД1). Видавлювання деталей з фланцями відрізняється досить несприятливою схемою напруженого стану, оскільки в зоні формуючого фланця переважають окружні напруження, що розтягують, а на бічній периферійній поверхні фланця напружений стан близький до лінійного розтягування. Виникненню розриву фланця також може сприяти наявність дефектів поверхні, що грають роль концентраторів напруження.

Процес утворення дефекту у вигляді утягнення пояснюється невідповідністю співвідношення стінки виробу і товщини фланця. Причиною виникнення неперпендикулярності фланця осі виробу може бути нерівномірне контактне тертя (нерівномірність нанесення змащення) або початковий перекис деформуючого інструмента відносно один одного.

Останній вид дефектів зустрічається при необмеженому вільному плині металу в радіальному напрямку, або при досить великих значеннях товщини видавлююмого фланця.

Умови протікання процесів обробки тиском (поздовжньо-поперечного видавлювання) без руйнування або утворення різного роду дефектів, можна визначити, використовуючи існуючі методики оцінки деформованості або технологічної пластичності матеріалу. Однією з таких широко використовуваних методик, є оцінка ступеня використання ресурсу пластичності за критерієм В. А. Огороднікова.

Суттєвому покращенню напружено-деформованого стану матеріалу в процесі поздовжньо-поперечного видавлювання сприяє проведення процедури проміжної термообробки.

Встановлено, що можливості процесів комбінованого видавлювання в запобіганні відхилень форми штампованих деталей ширше, ніж у процесів з простими схемами видавлювання. Велика ступінь свободи плину дозволяє домогтися чіткого оформлення геометричних елементів деталей (наприклад, кромek фланця). При поздовжньо-поперечному видавлюванні наявність другого ступеня вільності плину металу дозволяє без досягнення критичних значень навантаження домогтися досить чіткого оформлення необхідного фланця. Ця особливість поздовжньо-поперечного видавлювання свідчить про його значні технологічні можливості.

У комбінованого видавлювання є ще одна безперечна перевага, окрім зниження навантажень на деформуючий інструмент – це відсутність недоліку, який притаманний традиційному послідовному 2...3 перехідному штампуванню, а саме невисока точність розмірів і невисокий ступінь шорсткості, завдяки тому, що комбіноване видавлювання здійснюється в одному штампі.

Висновки:

1. Для процесу суміщеного радіального видавлювання деталей з фланцем встановлено особливості силового режиму з застосуванням енергетичного методу балансу потужностей та методу верхньої оцінки. Моделювання силового режиму дозволило оцінити оптимальне значення положення осередку деформування i , що слугує параметром оптимізації процесу. Мінімальне значення приведенного тиску досягається при $i=0,25$.

2. На основі методу скінченних елементів оцінено напружено-деформований стан заготовки в процесі суміщеного радіального та доцентрового видавлювання. Результати моделювання з залученням планування експерименту дозволило отримати аналітичні залежності у вигляді регресійних рівнянь з трьома змінними для оцінки енергосилових параметрів видавлювання, розкриття півматриць та опрацювання, а також умов формоутворення заготовки. На основі аналізу напружено-деформованого стану заготовки визначено значення вичерпання ресурсу пластичності. Встановлено, що при досягненні логарифмічного ступеня деформації $\epsilon=0,70..0,85$ настає вичерпання ресурсу пластичності у фланцевій зоні деталі, що формується, радіальним видавлюванням.

3. Встановлені умови дефектоутворення та рекомендації для їх усунення у вигляді діаграм. Набір математичних моделей дозволив встановити, що для бездефектного деформування за схемою суміщеного видавлювання слід дотримуватися співвідношень висоти фланцю до товщини стінки $h/t \leq 1,6$.

4. При формуванні різнотовщинних фланців дефект у порожнини деталі спостерігається на внутрішній частині стінок. На основі проведеного моделювання надано рекомендації по дефектоутворенню у вигляді діаграми, що дає можливість прогнозувати появу дефекту з урахуванням геометричних параметрів деталі та схеми деформування. Для усунення дефектів типу прострілів запропоновано спосіб регулювання руху півматриці на заключній стадії видавлювання.

5. Застосування маловивченого процесу закритого радіально-прямого видавлювання дозволяє отримати пустотілі вироби з поперечними розмірами, що перевищують розміри заготовки, а також складнопрофільовані стакани зі змінною і постійною товщиною стінки вздовж висоти. Для усунення дефектоутворення у вигляді утягнення отримано діаграму залежності появи дефекту від відносного ходу пуансона і відносної висоти фланця. Для формування фланця правильної форми запропоновані схеми кінематичного впливу на заготовки, дія яких підтверджена моделюванням.

6. На основі методу скінченних елементів проаналізовано формозміну заготовки в процесі комбінованого видавлювання пустотілих деталей з перемінною товщиною стінки. Для отримання деталей з різною товщиною стінки розробляються різні схеми кінематичного впливу на заготовку. Особливістю такого процесу є утворення дефекту у вигляді прострілу на внутрішній поверхні деталі. Основними геометричними параметрами, що впливають на формоутворення деталі є значення зазору між торцем пуансону та торцем матриці та зазору між внутрішньою поверхнею матриці та пуансоном. Розрахунок методом скінченних елементів проводився при трьох різних положеннях зазору між торцем пуансону та розширеною ділянкою матриці. Варіювання параметрами дозволяє отримати деталі різної конфігурації, що розширює номенклатуру виробів.

7. При ТОШ пустотілих деталей для усунення утягнення біля дна стакану рекомендовано виконувати горизонтальні або вертикальні технологічні бурти висотами X_1 та Y_1 відповідно. За результатами аналізу методом скінченних елементів побудовані діаграми з визначення геометричних параметрів для бездефектного формоутворення для процесів комбінованого та суміщеного видавлювання складнопрофільованих виробів. Усунення утягнення за рахунок горизонтального бурта відбувається при співвідношеннях розміру горизонтальної порожнини до товщини стінки $X_1/t = 0,2$ та розміру вертикальної порожнини до товщини дна $Y_1/L_1 \leq 2,5$; за рахунок вертикального бурта – при $Y_2/L_1 = 0,5$, $X_2/t \geq 1,0$.

8. Розширення номенклатури отримуваних виробів можливе за рахунок виготовлення деталей з внутрішнім та зовнішнім фланцями та штамповок з декількома буртами та фланцями за схемами суміщеного та комбінованого видавлювання. Отримання відносно товстих фланців супроводжується утворенням зажиму при формуванні внутрішнього фланцю доцентровим видавлюванням. В свою чергу, формування складнопрофільованих виробів (рис. 26) на етапі формування перехідних елементів також показує можливість дефектоутворення. Результати досліджень показали, що кінематичний вплив нижньої матриці на заготовку з відносною швидкістю V_1/V дозволяє уникнути формування зажиму та рекомендувати швидкості руху матриці, при яких буде спостерігатися бездефектне формоутворення деталі.

Результати досліджень відображені в опублікованих роботах [252-274].

7 УДОСКОНАЛЕННЯ, РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

7.1 Послідовність проектування технологічного процесу точного об'ємного штампування

У галузях машинобудування, що відрізняються значними річними програмами виготовлення деталей, істотним розширенням сфери застосування процесів точного об'ємного штампування є його використання в умовах дрібносерійного і серійного виробництва.

Згідно з основними напрямками технологічної уніфікації (рис. 7.1) [275], головним чином, типова технологія застосовується, в умовах великосерійного і масового виробництва, групова в умовах багато–дрібносерійного і серійного виробництва.

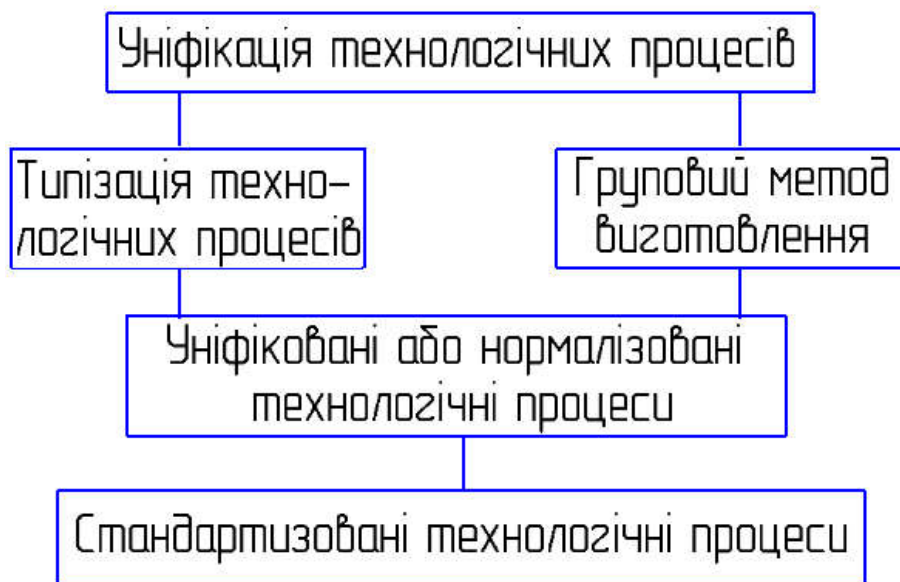


Рисунок 7.1 – Напрямки технологічної уніфікації

Сучасні методики проектування технологічних процесів засновані на системному підході до вирішення поставлених завдань і на концепції

групового методу організації виробництва деталей. При цьому глобальною метою проектування технології є розробка найбільш ефективного (переважного) процесу.

Формулювання цілей дає можливість вибору пов'язаних показників для кількісного зіставлення варіантів і встановлення системи технологічних обмежень. До обмежень для технологічних процесів видавлювання можна віднести показники якості (точність розмірів, конструктивних елементів деталей і ін.), Характеристики матеріалів, енергоємність, продуктивність і ін.

Можливість видавлювання деталей оцінюється в першому наближенні за допомогою сукупностей обмежень, що містять спрощені співвідношення для визначення: граничних ступенів формозміни, граничних геометричних параметрів і навантажень, витрати запасу пластичності, інших параметрів.

Пропонована методика проектування технологічних процесів передбачає шість основних етапів проектування технологій.

Перший етап проектування ТП – конструкторсько–технологічна класифікація деталей. До складу вихідної інформації, необхідної для цієї класифікації, входять креслення деталей і відомості про програми випуску, базові процеси і складі технологічного обладнання. На цьому етапі необхідно: визначити з урахуванням специфіки підприємства найбільш значущі критерії класифікації; згрупувати деталі в окремі групи, що володіють наявністю класифікаційних ознак: оцінити можливості виготовлення кожної деталі видавлюванням; видалити ті деталі, які неможливо виготовити штампуванням. Найбільший габаритний розмір деталей, мінімальна товщина характерних елементів деталі (стінки, фланця або відростка) і річна програма випуску деталей найбільшою мірою визначають можливість штампування, яке використовується обладнання і показники ефективності освоєння нової технології. Керуючись цими ознаками необхідно віднести деталь, що розроблюється, до однієї з підгруп. Можливість виготовлення деталей різними технологічними способами штампування оцінюється в першому наближенні за допомогою баз

обмежень, що містять спрощені розрахункові співвідношення або рекомендації для встановлення значень ознак, якими обмежено впровадження технологічних процесів видавлювання.

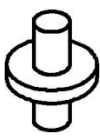
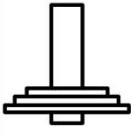
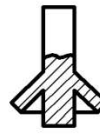
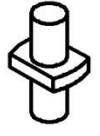
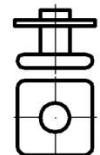
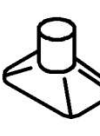
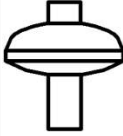
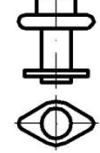
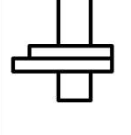
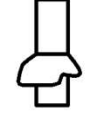
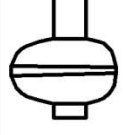
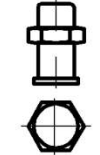
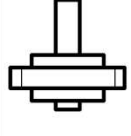
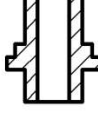
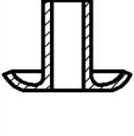
Рішення поставлених завдань дозволяє виділити основні типи деталей, які можна перевести на штампування видавлюванням. Подальше проектування процесів проводиться не для кожної деталі окремо, а для деталей – характерних представників групи.

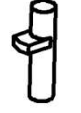
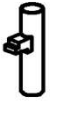
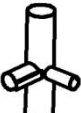
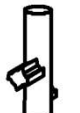
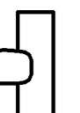
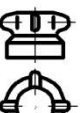
Аналіз цілей і пов'язаних з ними завдань на першому етапі проектування доцільно вести з використанням конструкторсько–технологічної класифікації деталей, що підлягають переведенню на виготовлення видавлюванням.

Відомі класифікатори деталей, отриманих видавлюванням, не враховують складні форми, які можна забезпечити при поперечному видавлюванні. Тим часом, така класифікація складнопрофільованих деталей необхідна при обґрунтуванні вибору технологічного варіанту і прискоренні проектних робіт. Класифікація (табл. 7.1) розроблена на основі аналізу форм, розмірів і технологічних ознак і з урахуванням попередніх робіт в цій області. Пропонуються два класи деталей, одержуваних поперечним видавлюванням: А – фланці (осесиметричні) і В – відростки (неосесиметричні). Далі здійснюється послідовне розділення деталей на два (1 і 2) підкласи (по виду вихідної заготовки), три (1,2,3) типу (по положенню формованої поверхні) і по чотири (1–4) види в залежності від контуру фланця (в плані) або контуру перерізу (або проекції) відростку. Крім цих ознак для класифікації використано розподіл безлічі деталей на 6 груп (в залежності від характеристики утвореної поверхні): 1 – прямолінійні (без ухилу); 2 – конічні (з нахилом); 3 – ступінчасті; 4 – вигнуті; 5 – похилі; 6 – криволінійні поверхні.

Кожна група поділяється на дві підгрупи (а і б), у тому числі перша – а позначає положення фланця (відростка) в одній площині, а друга – б – розташування фланців і відростків в декількох площинах (на різному рівні).

Таблиця 7.1 – Класифікація деталей зі складним профілем

А			Характеристика поверхні						
Заготовка	Поверхня	Контур	Без ухилу		2	3	4	5	6
			1						
			а	б	а	а	а	а	а
Суцільна	Зовнішня	1 коло							
		2 прямокут.							
		3 довільн.							
		4 профіл.							
Порожниста		1 (2-4)							
	Внутр.	1 (2-4)							
	Обидві	1 (2-4)							

А			Характеристика поверхні						
Заготовка	Поверхня	Контур	1		2	3	4	5	6
			а	б	а	а	а	а	а
Суцільна	Зовнішня	1 коло							
		2прямокут.							
		3довігн.							
		4 ребро							
Порожниста	Обидві	1...4							
		Внутр.							
		1...4							

Послідовний запис позначень (номерів) перерахованих ознак є кодом деталі, що дозволяє ідентифікувати її в уже згадуваній безлічі. Наприклад, код A1.1.2. позначає суцільну деталь із зовнішнім фланцем конічної форми, розташованим в одній площині.

При необхідності розширення характеристики і опису особливостей конфігурації деталі можуть бути закодовані ознаки: профілювання підстав і торців фланців (відростків), кількість відростків, асиметрія поздовжніх або поперечних перерізів деталей. Для кодування стрижневої частини деталі можуть бути використані відомі системи і формули .

Можливість видавлювання деталей оцінюється в першому наближенні за допомогою банків обмежень, що містять спрощені співвідношення для визначення: граничних ступенів формозміни, граничних геометричних параметрів і навантажень, витрати запасу пластичності та інших параметрів.

Завданнями другого етапу є розробка максимально повного набору варіантів альтернативних технологічних процесів при цьому попередньо проаналізувавши їх і виключивши свідомо неефективні варіанти. В результаті виконання другого етапу повинні бути розроблені набори варіантів послідовних технологічних переходів видавлювання, відповідні ескізи оснащення і склад обладнання.

У разі необхідності аналізу складних схем формоутворення з неоднозначною кінематикою течії металу використовуються розрахункові програми, засновані на енергетичному підході і аналізі кінематично можливих полів пластичної течії.

Розвиток наукового підходу до вирішення завдань обробки металів тиском і узагальнення накопиченого практичного досвіду пов'язаного з вибором альтернативних технологічних процесів є передумовами створення ефективних технічних рішень, спрямованих на інтенсифікацію штампувального виробництва.

Третій етап – визначення системи оцінки ефективності альтернативних процесів. Вихідною інформацією для цього етапу є узагальнена система

показників ефективності технологій і сукупність методів прийняття рішень. Для оцінки ефективності процесів видавлювання система містить п'ять узагальнених критеріїв: завершеність формоутворення деталей, тиск деформування, технічний рівень процесу, економічна і організаційна ефективність.

Четвертий етап проектування – вибір найбільш ефективного варіанту технологічного процесу – реалізується з використанням пропонованих критеріїв оцінки. Остаточне рішення щодо вибору прийнятного варіанту залишається за технологом за умови отримання кількісної оцінки всіх альтернатив

П'ятий етап – розробка технологічного процесу і оснащення. В якості вихідної інформації використовують класифікатори штамів і змінних інструментів, в тому числі з роз'ємними матрицями, а також нормативну і методичну документацію.

Шостим заключним етапом розробки технологічного процесу холодного об'ємного штампування видавлюванням, є розрахунок економічної ефективності від впровадження нового процесу видавлювання замість базового варіанту.

На всьому протязі процесу проектування технологічного процесу холодного об'ємного штампування видавлюванням, необхідно контролювати взаємозв'язок виконуваних етапів і при необхідності проводити коригування попередніх етапів для отримання більш доцільного технологічного ланцюжка.

Поряд з розвитком методів вирішення певних технічних завдань велика увага приділяється проблемам методології проектування. Це пов'язано з тим, що ускладнення технологічних процесів і перетворення їх в складні технічні системи заходить у суперечність з традиційними принципами проектування, коли порівнянню піддаються кілька альтернативних варіантів технологічних процесів, обраних технологом. В цьому випадку якість прийнятого технічного рішення повністю ставиться в залежність від знань, досвіду і

інтуїції проектувальника. Нераціональні рішення, а часом і помилки, допущені на етапі проектування, виявляються після апробації процесу, коли вже витрачені значні кошти на його реалізацію. В умовах сучасного виробництва при підвищенні вимог, що пред'являються до технологічних процесів і термінів їх реалізації, традиційні методи проектування стають неефективними. Вирішити проблему можливо на основі автоматизації проектування технологічних процесів.

Використання і створення систем автоматизованого проектування. Проектування технологічних процесів розглядається як складний специфічний вид творчої діяльності розробника, заснований використанні накопиченого досвіду і набутих навичок, на глибоких наукових знаннях і творчому пошуку. У процесі цієї діяльності вихідна інформація, що включає марку металу, креслення деталі, серійність деталей, технічні вимоги і т.д., перетворюється в вихідну інформацію: креслення поковки, технологічну карту, креслення штампів та ін.

Найбільшого поширення при автоматизації проектування технології отримали системи автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП), що включають комплекс засобів автоматизації проектування: технічні засоби, математичне і програмне забезпечення. Система САПР ТП забезпечується наявністю комплексу взаємопов'язаних моделей, що визначають технологічний процес в цілому, а також комплексом системних інтерфейсів, які здійснюють зазначений взаємозв'язок[276-284].

Подальше вдосконалення методів автоматизованого проектування пов'язано з розширенням використання системного підходу при вирішенні технологічних завдань. Системний підхід дозволяє досліджувати різні за складністю технологічні процеси з єдиною системною точки зору. Для прийняття рішення на основі системного аналізу передбачено проведення декомпозиції складної проблеми на більш прості компоненти.

Основне завдання системного аналізу полягає в тому, щоб допомогти досліднику розробити єдиний критерій оцінки прийнятного варіанту

вирішення на основі аналізу складних несумірних факторів, що характеризують технологічну систему, і пов'язаних з ними різних варіантів рішення [285]. Прийняті рішення розглядаються як вибір найкращого рішення з безлічі допустимих альтернативних рішень або деяке упорядкування цієї безлічі. Типова схема прийняття рішення представлена на рис. 7.2 [286]. Знаходження найкращого рішення на безлічі цілей, зване завданням багатоцільової оптимізації, пов'язане з рішенням багатокритеріальної задачі.

Однак, знання системного підходу і володіння методами системного аналізу недостатньо для ведення практичної системотехнічної діяльності. Необхідне знання предметної області, вміння виділити в різноманітті приватних завдань проектування основні протиріччя і знайти оптимальний спосіб їх вирішення в конкретних умовах.

Специфіка процесу об'ємного штампування зумовила необхідність розробки і застосування САПР ТП в цій області металообробки і, перш за все, для автоматизованого проектування технологічних процесів гарячого об'ємного штампування [287-290]. У числі перших – роботи Р. А. Вайсбурд, присвячені вирішенню проблеми автоматизації проектування з позицій теорії оптимального управління. Усталені правила проектування, наявні науково обґрунтовані класифікатори поковок, методичні рекомендації, керівні технічні матеріали (РТМ) і відповідні стандарти сприяли чіткій формалізації задач і етапів проектування технологічних процесів гарячого об'ємного штампування, а також визначення правил прийняття рішень. У зв'язку з цим, при вирішенні оптимізаційних задач при автоматизованому проектуванні в САПР ТП набули поширення відомі методи дослідження операцій [291, 292].

Новим поштовхом у розвитку методів автоматизованого проектування технологічних процесів об'ємного штампування сприяло створення статистичних моделей цих процесів [291]. Оцінка ймовірності тих чи інших подій на основі їх статистичних моделей дозволяє оптимізувати прийняття рішення в умовах ризику.

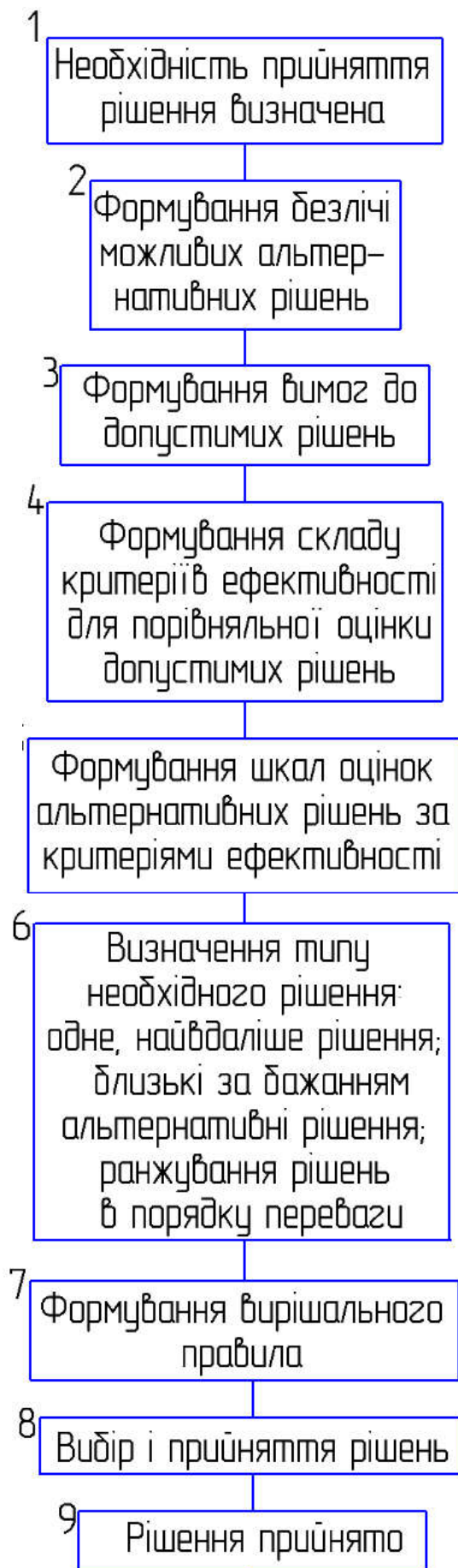


Рисунок 7.2 – Алгоритм прийняття рішень

Ще більш складним стає ухвалення рішення в умовах невизначеності, коли важко отримати не тільки достовірну, але і вірогідну оцінку якості рішення. Така ситуація виникає, коли критеріїв якості прийнятого технологічного рішення багато і реальне рішення завжди буде компромісом, невідомим заздалегідь.

В силу специфіки виробничих умов різних підприємств і нескінченного розмаїття форм виготовлених деталей, виникла необхідність в розробці САПР ТП, здатних навчатися і адаптуватися в умовах, що змінюються, виробництва [292].

До числа основних складностей, що стоять на шляху розробників САПР ТП ТОШ, слід віднести недосконалість методологічної бази і самих процесів проектування технологічних процесів; відсутність об'єктивних критеріїв оцінки технологічних процесів і пов'язана з цим мала достовірність прийнятих технічних рішень.

Аналіз робіт з автоматизації проектування в багатьох випадках виявляє недосконалість методології самого проектування і призводить до необхідності одночасного вирішення завдань щодо вдосконалення процесів проектування. Погляди різних авторів на концепції вдосконалення та розвитку методології проектування в одному повністю подібні: в основі проектування повинен лежати системний підхід.

Іншим перспективним напрямком удосконалення методів моделювання складних систем і автоматизації прийняття рішень є створення і використання інтелектуальних систем.

Особливості створення систем штучного інтелекту. Провідна роль широкого впровадження обчислювальної техніки в виробництві, наукових дослідженнях та управлінні відводиться комп'ютерним системам з елементами штучного інтелекту. Системи штучного інтелекту, будучи людино-машинними системами, припускають можливість, як автономної роботи, так і в діалозі з людиною. При цьому, чим більше розвинена людино-машинна частина системи, тим більш досконалою вважається система

штучного інтелекту. Область штучного інтелекту є одним з найважливіших напрямків кібернетики, що включає ряд самостійних проблем: теорію ігор; розпізнавання образів; доведення теорем і логічний висновок; робототехніку; експертні системи і прийняття рішень; сприйняття природних мов; адаптивне програмування; інженерія знань та ін. На рис. 7.3 представлені основні напрямки досліджень в області штучного інтелекту [293].

Е. Хант [294] виділяє два чітко визначених класу наукових проблем: розпізнавання образів і рішення задач, які лежать в основі досліджень з штучного інтелекту. Ці та інші проблеми є конкретним його додатком. Велика увага фахівців зі штучного інтелекту привертає створення систем спілкування людини з комп'ютером на природній мові. До теперішнього часу в світі створено чимало таких систем (понад 60), які в більшості випадків мають експериментальний характер [295, 296, 297].

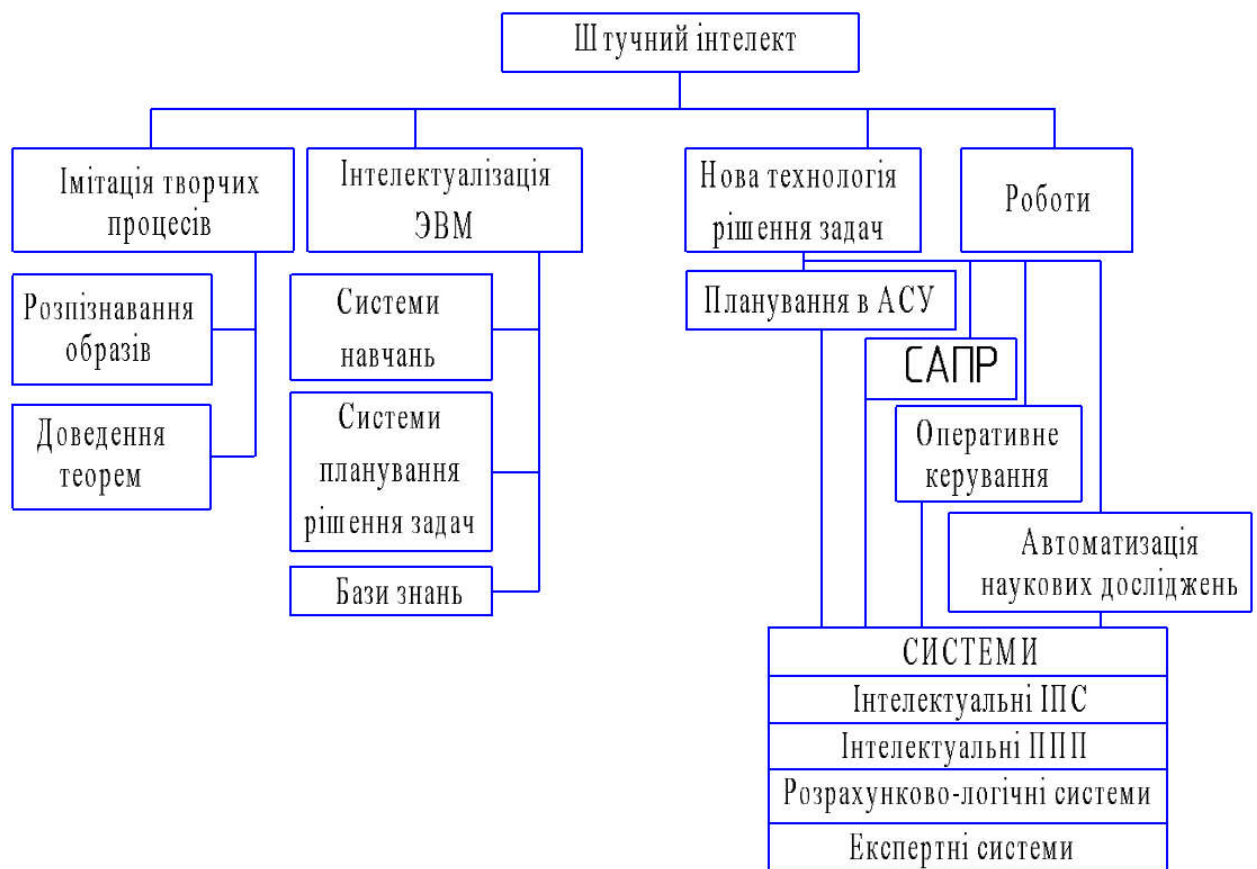


Рисунок 7.3 – Напрями досліджень в області штучного інтелекту

Принципи побудови систем розпізнавання образів. Одним з фундаментальних напрямків досліджень в області штучного інтелекту є проблема розпізнавання образів [298]. Без вирішення завдань розпізнавання і класифікації неможливо створення інтелектуальних систем, які дозволяють підняти на новий рівень автоматизацію виробничих процесів.

Різноманітність завдань розпізнавання образів можна охарактеризувати трьома параметрами: способом, яким пред'являється навчальна безліч; типом правила класифікації, яке повинен побудувати класифікатор, і видом опису об'єктів, що класифікуються.

Теорії розпізнавання образів і її практичного застосування присвячено багато робіт, в деяких з них формулюються методологічні основи і дається гносеологічний аналіз сучасного стану теорії розпізнавання образів [299].

Відомим і широко використовуваним типом систем, заснованих на знаннях, є експертні системи [300]. Експертна система характеризується як обчислювальна система, в яку включені знання фахівців з конкретної предметної області. Сукупність накопичених знань в області технологічної підготовки процесів ТОШ дозволяє успішно завершити роботи по створенню експертної системи. Розглянемо загальні принципи побудови подібних систем.

В межах даної області система здатна приймати експертні рішення. Експертні системи мають наступні особливості, що відрізняють їх від традиційних програм [301]:

- рішення володіють ясністю, високою якістю і вимагають мінімальних ресурсів;
- рішення є результатом застосування символічних міркувань, які базуються на евристиках (стосовно до штучного інтелекту евристики є правила, керуючись якими інтелектуальна система рухається до поставленої мети);
- системи здатні пояснювати свої дії і знання;
- системи здатні набувати від експерта нові знання і змінювати свою

поведінку відповідно до них;

- вирішувані задачі є складними і практично значущими;
- системи мають природно мовний інтерфейс.

Процес придбання знань трудомісткий і вирішується інженером по знаннях на основі аналізу діяльності експерта, розв'язуючого реальні завдання. Можливість накопичення знань, які, як правило, концентруються навколо найбільш важливих об'єктів предметної області, визначає адаптивні властивості експертної системи.

Такими об'єктами при розробці технології ТОШ є виготовлені деталі. У базу знань включають параметри їх геометричної форми, розміри, механічні характеристики матеріалу, технологію виготовлення даних деталей, штамповане оснащення, мастильні матеріали, обладнання, що застосовується і т.д.

У більшості сучасних автоматизованих системах ознаки, що характеризують об'єкти і явища предметної області, відображаються в базу даних (інформаційне забезпечення), а теоретичні конструкції (моделі), узагальнюючі різні закономірності і залежності між ознаками, реалізуються у вигляді процедур обробки даних (програмного забезпечення), що дозволяють за значеннями одних ознак обчислити значення інших.

Для вирішення складних проблем потрібні інтегровані експертно теоретичні системи [302]. Оскільки експертні та теоретичні системи відповідають вихідному і кінцевому станам процесу формалізації знань, в результаті їх інтеграції з'являється можливість організувати моделювання всього процесу на ЕОМ.

Суттєва перевага машинних методів проектування полягає в можливості проводити на ЕОМ експерименти на математичних моделях об'єктів проектування, відмовившись або значно скоротивши дороге фізичне моделювання. При цьому виділяють декілька етапів моделювання. На етапі аналізу об'єкта моделювання формується можливо більш повний опис об'єкта (технологічного процесу, інструменту), виділяються складові елементи,

встановлюються зв'язки між ними, виявляються істотні для дослідження характеристики. Структура моделі залежить від завдань дослідження.

Наступним етапом моделювання є синтез моделі. Тут відповідно до завдань дослідження здійснюється відтворення або імітація об'єкта на ЕОМ за допомогою програмного комплексу, який включає в себе закономірності та інші вихідні дані, отримані на етапі аналізу. Зазначений комплекс побудований за модульним принципом і орієнтований на поступове уточнення характеристик технологічного процесу та можливе їх коригування відповідно до прийнятої системи обмежень.

Сформульовані і вирішені завдання дослідження дозволили розробити цілісну схему вирішення проблеми вдосконалення конструкторсько-технологічної підготовки процесів об'ємного штампування на основі застосування принципів штучного інтелекту. Рівні ієрархії моделювання технологічних процесів ТОШ представлені на рис. 7.4.

На першому рівні ієрархії (див. рис. 7.4) проводиться обробка образів деталей (класифікація і групування) з метою вибору маршрутної технології об'ємного штампування [303].

Після попереднього визначення кількості переходів управління передається на другий рівень ієрархії, тобто програмами генерування форм вихідних заготовок і напівфабрикатів після кожного переходу. Генеративний підхід дозволяє розробити альтернативні варіанти технології, що відрізняються як за складом застосовуваних операцій, так і за кількістю переходів штампування.

Згідно з принципами пріоритетності, визначається можливість виготовлення деталі методами ХОШ. Якщо обрана система обмежень не дозволяє використовувати для формозміни деталі процес холодної деформації, аналізується можливість виготовлення деталі НГОШ. При цьому через блок зміни параметрів коригується як число, так і послідовність переходів штампування. Крім того, існує можливість комбінованого використання ХОШ і НГОШ, коли частина переходів виконується в

холодному стані, а остаточна формозміна проводиться з попереднім нагріванням, минаючи допоміжні операції відпалу заготовок, їх фосфатуванням і омилюванням. Таке моделювання дозволяє на етапі аналізу враховувати якомога більшу кількість альтернатив і розробляти гнучкі процеси об'ємного штампування.

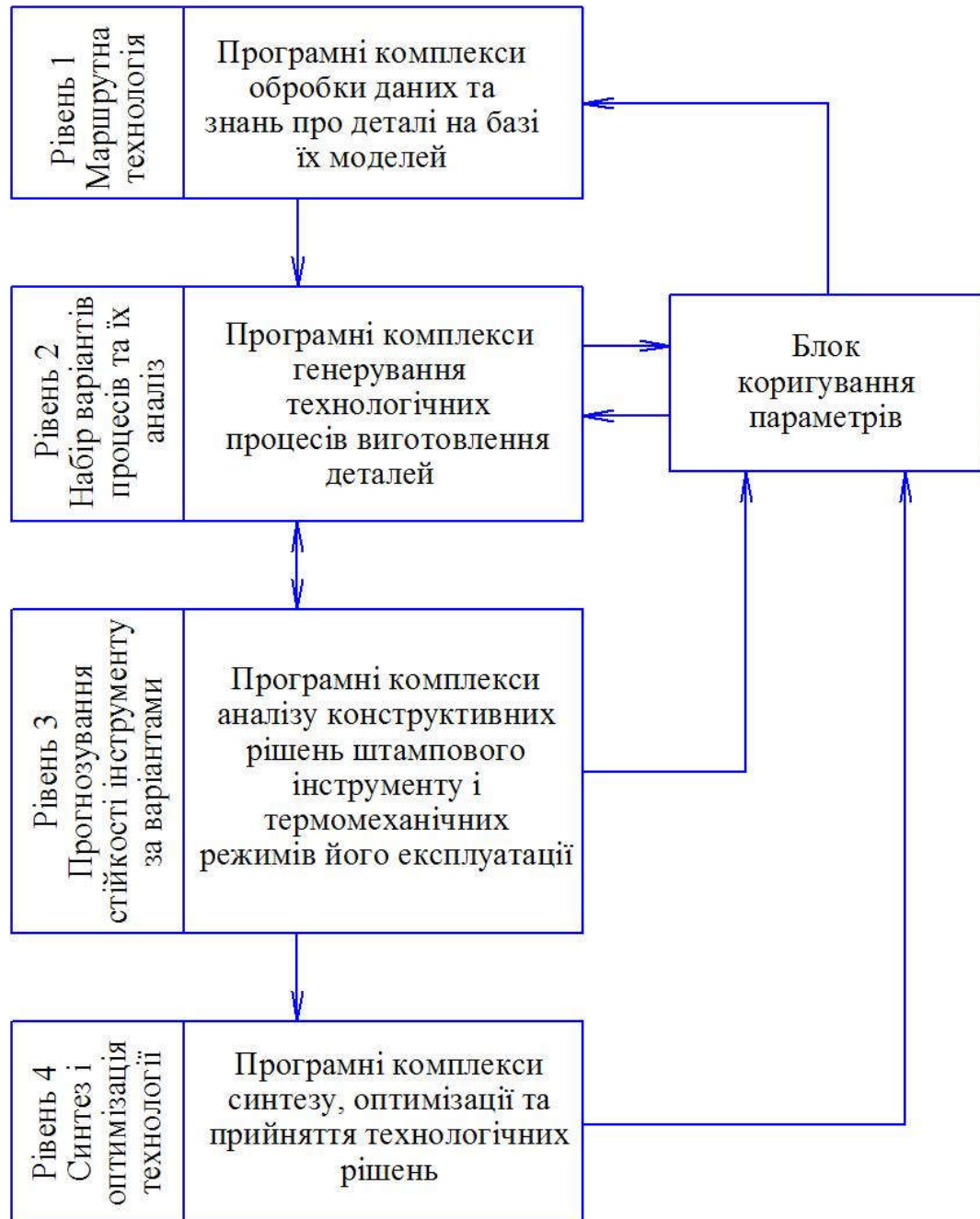


Рисунок 7.4 – Рівні ієрархії технологічного процесу об'ємного штампування

На наступному рівні ієрархії знаходяться моделі і засновані на них програмні комплекси, що дозволяють за допомогою моделювання температурно-силових умов роботи інструмента прогнозувати його стійкість. Якщо стійкість інструменту виявляється незадовільною, то необхідно вносити зміни в технологічний процес, наприклад, збільшити кількість переходів ХОШ або відмовитися від холодної схеми обробки тиском, використовуючи попередній нагрів заготовки до температури НГОШ. Застосувавши принцип дроблення деформацій або помітно знизивши технологічну силу (на 30...40%) за рахунок нагріву заготовки, вдається забезпечити прийнятну стійкість робочих деталей штампу [304].

Більш детальне моделювання і аналіз напружено-деформованого стану інструменту і теплових явищ, що проходять в ньому, дозволяє виробити рекомендації щодо оптимізації температурно-силових режимів роботи інструменту і тим самим забезпечити підвищення його стійкості і можливість конструювання інструменту з урахуванням пружних деформацій.

Одним з останніх етапів моделювання є оцінка машинних результатів, полягає у встановленні адекватності моделі і реального технологічного процесу. При цьому істотно не абсолютна якість машинних результатів, а ступінь подібності з об'єктом дослідження. Успішний результат порівняння досліджуваного об'єкта з моделлю свідчить про достатній рівень вивченості об'єкта, про правильність принципів, покладених в основу моделювання, і про те, що алгоритм моделювання не містить помилок.

На основі отриманих проміжних і остаточних результатів вибирається стратегія прийняття технічних рішень на етапах технологічної підготовки виробництва. Послідовна реалізація рішень дозволяє синтезувати раціональні технологічні процеси, оптимізувати конструкції застосовуваних штамсів, управляти температурно-силовими режимами процесів деформування і точністю одержуваних поковок [304].

7.2 Розробка штампового оснащення з регулюванням кінематики формозмінення

Для реалізації розглянутих в попередніх розділах процесів необхідне створення штампового оснащення, що буде включати елементи автоматизації, механізації, механізмів зажиму роз'ємних матриць та інші більш складні елементи.

Отримання деталі типу «Стрижень з фланцем» раціонально здійснювати в закритих штампах для радіального видавлювання (рис. 7.5).

Штамп для закритого радіального видавлювання складається з верхньої 1 і нижньої 2 плит, з'єднаних між собою направляючою парою колонка – втулка 3, 4. До верхньої плити 1 кріпиться за допомогою гвинтів 28 контейнер 15. У матрицеутримувачі 9 знаходиться державка 8 і верхня півматриця 5. Пуансон 7 і механізм замикання півматриці виконаний в нижній півматриці 6, у вигляді пружних ригелів 27. Замикання півматриць здійснюється за рахунок взаємодії ригелів 27 з зовнішнім буртом верхньої півматриці 5. Розкриття півматриць відбувається за рахунок утаплювання ригелів 27 в нижній півматриці 6 під дією пружин 26 після підчеканки фланця виробу. Верхня півматриця 5 опирається на прокалену прокладку 12 і утримується разом з державкою всередині матрицеутримувача 9 гайкою 10 і контр-гайкою 11. Також до верхньої плити прикріплені клини 14 гвинтами 31. Всередині контейнера відцентрована нижня півматриця 6. Її обмеження переміщення вгору забезпечено за допомогою кришки 21. А в нижньому положенні данна півматриця спирається на підставку 16. Підйом півматриці в верхнє положення забезпечується за допомогою пружин 22. Всередині нижньої півматриці 6 відцентрований пуансон 7, який спирається на прокалену прокладку 17 і має можливість переміщатися вгору за допомогою штовхача 19. Центральні отвори у верхній плиті 1 і нижній плиті 2 закриті кришками 13 і 20 за допомогою гвинтів 29 і 31.

Штамп працює наступним чином. У верхньому положенні повзуна

преса на торець пуансона 7 в площину нижньої півматриці 6 встановлюється чергова заготовка. При опусканні преса верхня плита 1 з верхньою півматрицею 5 рухаються вниз. Верхня півматриця 5 своїм зовнішнім конічним буртом впливає на ригелі 27, занурюючи їх у порожнину півматриці, долаючи опір пружини 24. Після того, як верхня півматриця 5 пройшла своїм зовнішнім буртом повз ригелі 27, підп'ятники 23, за рахунок пружин 24, долаючи опір пружин 26, повертають ригелі 27 в початковий стан, тим самим замикаючи півматриці 5 і 6 між собою.

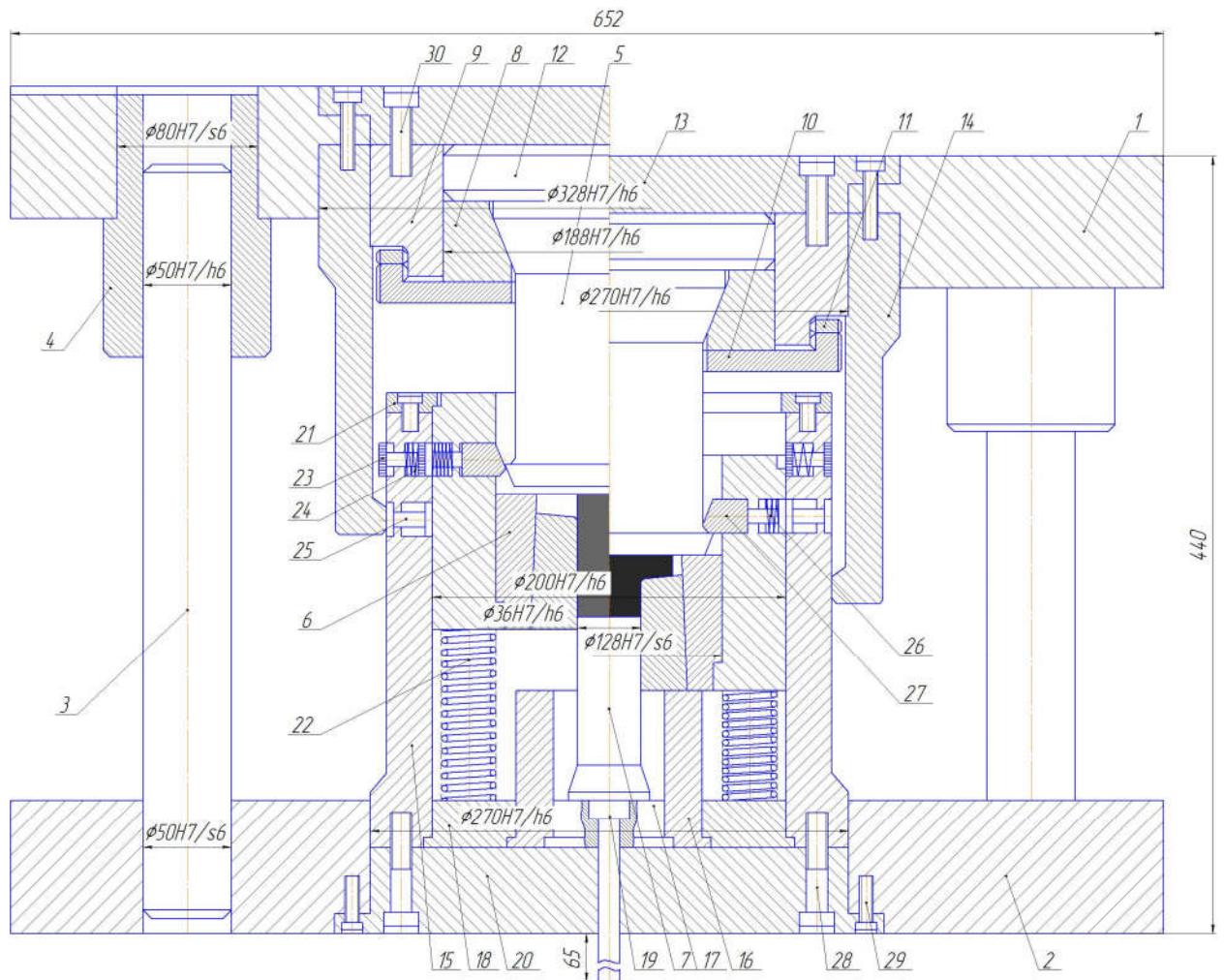


Рисунок 7.5 – Штмп для радіального видавлювання

При подальшому опусканні повзуна преса півматриці спільно в закритому стані опускаються, при цьому метал заготовки впливом пуансона 7 видавлюється в радіальну порожнину між півматрицями 5 і 6, причому впливаючий метал прагне розсунути півматриці, чому заважають

ригелі 27, що впираються в борт верхньої півматриці 5. У кінцевій стадії деформування нижня півматриця 6 спирається на опору 16 і відбувається підчekanення фланця виробу. Ригелі 27 звільняються від сил розпору півматриць і мають можливість втопитися в порожнину нижньої півматриці 6 за рахунок ростискання пружини 24. При піднятті повзуна преса нижня півматриця 6 залишається в нижньому положенні, а верхня півматриця 5 безперешкодно піднімається, причому після того, як зовнішній борт верхньої півматриці 5 виходить із зачеплення, клини 14, закріплені до верхньої плити 1, впливають на штовхачі 25, які втаплюють ригелі 27 в порожнину півматриці, виводячи його з зачеплення з порожниною контейнера 15, завдяки чому нижня півматриця 6 має можливість під дією пружин 22 повернутися у вихідне верхнє положення. Після цього відштампована деталь пуансоном 7 за допомогою поршня 19 видаляється з порожнини нижньої півматриці 6, після чого штамп готовий до нового циклу роботи.

Поєднання операції скрізного прошивання та калібрування після радіального видалювання дозволяє розробити штамп з елементами механізації – револьверна подача.

На нижній нерухомій плиті 16 (рис 7.6, 7.7) штампа розміщена матриця 4 для калібрування, контрпуансони 12 і 41. Матриця 1 для скрізної прошивки для забезпечення можливості завантаження в неї заготовок знизу розміщена в проміжній плиті 10, яка підпружинена до нижньої плити 16 і має можливість переміщатися по вертикалі уздовж контрпуансона 12 та колонок 17. Контрпуансон 12 оснащений охоплючим його рухомим підпружиненим знизу до матриці 1 лотком 11, який виступає над робочим торцем контрпуансона 8 при розкритому штампі і забезпечує захоплення, виконане у вигляді пружних один відносно одного губок.

На осі 49 між верхньою 5 і нижньою 16 плитами, над матрицями 1 і 4, розташований підпружинений знизу до бурта осі 49 і зверху до верхньої плити 5 штампа револьверний диск 20. Диск має можливість переміщатися вздовж шпонок, жорстко закріплених на осі 49.



Для розміщення заготовок, напівфабрикатів, деталей, і перенесення їх з однієї позиції на іншу в пазах револьверного диска 20 рівномірно по окружності встановленого гнізда, забезпечені захватними органами. На позиції наскрізної прошивки над револьверним диском розміщений знімач 8, що переміщається по направляючих гвинтах 6, закріпленими в рухомий плиті 10 і підпружиненим до неї.

На нижній плиті 16 штампа встановлений пневмоциліндр 2, призначений для періодичного повороту револьверного диска 20 через храпове колесо 43, що закріплене на одній осі 49 з револьверним диском 20. Між позиціями калібрування і наскрізної прошивки розташована позиція передачі напівфабрикату з диска через патрубок 13 з допомогою поршня 22 на нижню площину подачі.

Штамп оснащений вузлом завантаження матриці 1 знизу з боку контрпуансона 12. Цей вузол розміщений між позиціями передачі напівфабрикатів та наскрізної прошивки. Завдяки періодичному зачепленню з храповим колесом вузол має можливість подавати напівфабрикати в лоток 11 на позицію наскрізної прошивки. Вузол завантаження (рис. 7.8) виконаний в найпростішому варіанті, у вигляді встановленого на осі 49 поворотного ложементу 3. Для виведення ложементу 3 із зачеплення з храповим колесом 43 в кінці ходу подачі служить штир 55, закріплений в проміжній плиті 10.

Штамп працює наступним чином.

У верхньому положенні повзуна преса заготовка з вібробункера за допомогою механізму завантаження переміщується в гніздо револьверного диска 20. Поворот револьверного диска 20, закріпленого на осі 49, здійснюється за допомогою храпового колеса 43 від штока пневмоциліндра 2. Фіксування храпового колеса 43, а отже, і револьверного диска 20 виробляється підпружиненою собачкою.

При ході повзуна преса вниз заготовка проштовхується з револьверного диска 20 пуансоном 36 в матрицю 4, де відбувається калібрування. При ході повзуна вгору напівфабрикат переміщується в гніздо

диску 20 контрпуансоном 41. На наступній позиції здійснюється контроль виконання операції фасонування.

Повернення диску 20 на черговий кут, напівфабрикат переміщують на наступну позицію – позицію передачі. При ході повзуна преса вниз виштовхувач 22 через патрубок 13 передає напівфабрикат на ложемент 3, забезпечений захопленням завдяки пружині в початковому положенні. Після повернення повзуна в верхнє положення відбувається черговий поворот диску 20. Важіль ложементу 61 знаходиться в зачепленні з храповим колесом 43 (рис. 7.9), внаслідок чого ложемент 3 повертається синхронно з храповим колесом 43. При цьому напівфабрикат переміщується на позицію наскрізної прошивки в лоток 11, який виступає в розкритому положенні штампу над контрпуансоном 12 так, що вікно втулки виявляється під торцем контрпуансона 12, до цього моменту в матриці 1, піднятою спільно з проміжною плитою 10 під дією пружин 97 над контрпуансоном 12 на висоту

лотка 11, вже знаходяться дві попередньо фасовані заготовки, що утримуються в порожнині силами тертя на контактних поверхнях, подані під час попередніх ходів.

На початку ходу повзуна вниз штир 55, закріплений в проміжній плиті 10 впливає на підпружинений важіль-фіксатор ложементу 3, повертаючи його навколо осі 49 і виводячи з зачеплення з храповим колесом 43. Завдяки цьому і під впливом пружини 25 ложемент 20 вертається на вихідну позицію до упору 26. При подальшому ході повзуна преса вниз матриця 1, закріплена в плиті 10 опускається на контрпуансон 12, а пуансон 29, проникаючи в верхню заготовку, прошиває її наскрізь і входить в середню заготовку так, що прошита втулка виявляється над робочим пояском пуансона 29.

Під дією пружних сил внутрішній діаметр втулки, видавлений з верхньої заготовки, стає менше діаметра робочого паска пуансона 29, що гарантує видалення його разом з пуансоном з матриці 1. При русі повзуна преса вгору отримана втулка піднімається разом з пуансоном 29, знімається з нього знімачем 8 і залишається затиснутою в гнізді револьверного диску 20. При повороті диску 20 на позицію розвантаження готова деталь проштовхується на лоток і видаляється в тару (рис. 7.10).

Для реалізації бокового видавлювання розроблено штамп (рис. 7.11), що містить верхню і нижню плити, пуансон, верхню і нижню півматриці, виштовхувач, вузол замикання півматриць, виконаний у вигляді змонтованої на нижній плиті обойми, що охоплює нижню півматрицю, а також розміщених в обоймі ексцентриків з приводом їх повороту, взаємодіючих з виконаними на боковій поверхні верхньої півматриці клиновими пазами, осі повороту яких зміщені в напрямку до нижньої плити щодо осі симетрії клинових пазів, що відрізняються тим, що, з метою зниження енергетичних витрат і підвищення темпів надійності, привід повороту ексцентриків виконаний у вигляді встановлених на верхній плиті важелів зі скосами, а верхня півматриця забезпечена приводом переміщення у вигляді взаємодіючих з нею собачок, змонтованих на верхній плиті.

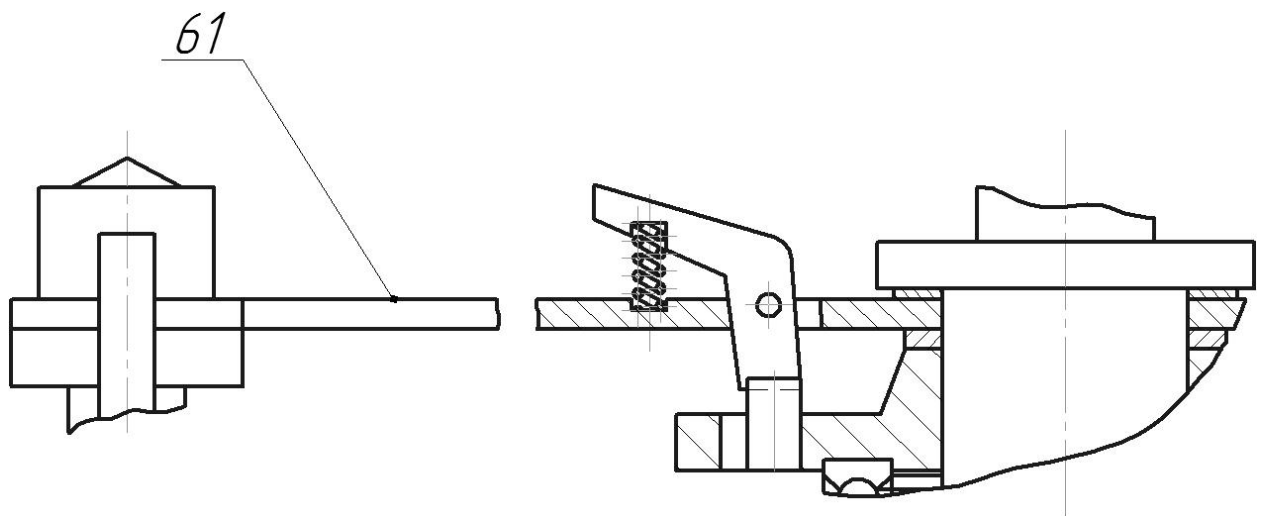
В повернуто

Рисунок 7.9 – Вид В, штампу з револьверною подачею

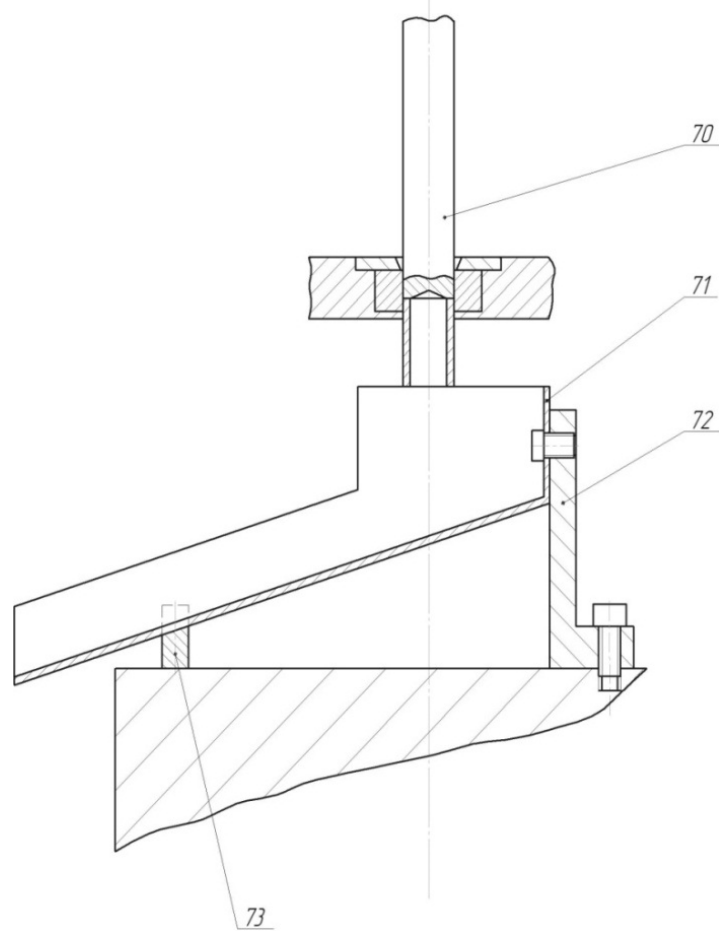
Е-Е повернуто

Рисунок 7.10 – Розріз Е-Е, штампу з револьверною подачею

496

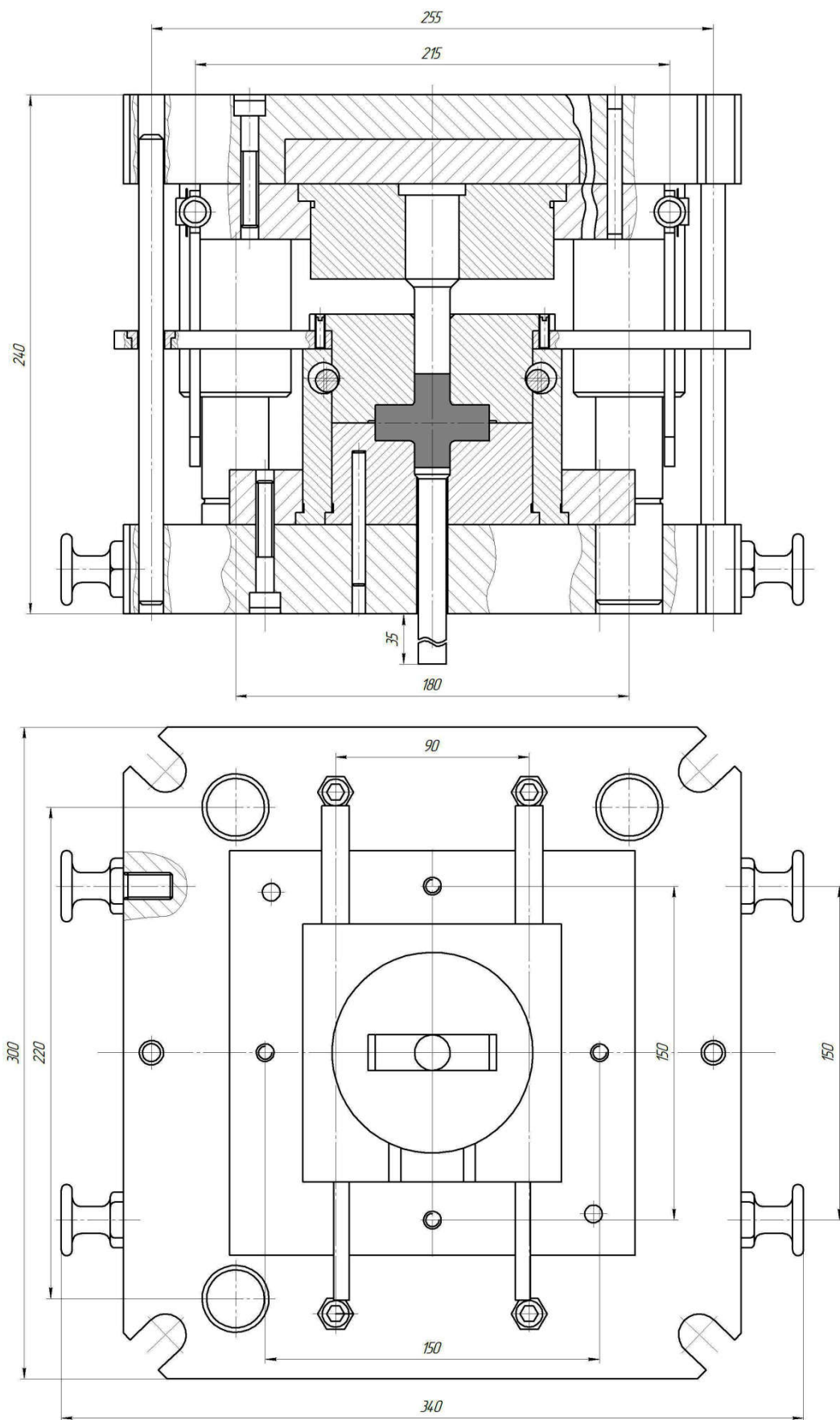


Рисунок 7.11 – Штам для бокового выдавливания деталей

Штамп працює наступним чином. Заготовку укладають в порожнину півматриці. При опусканні верхньої плити з пуансоном на ділянці холостого ходу повзуна важіль скосом тисне на поверхню ексцентриків і їх поворотом закриває півматриці. При подальшому опусканні плити відбувається деформування пуансоном заготовки. Після завершення ходу пуансона при підйомі верхньої плити штампу важіль своїм скосом взаємодіє з поверхнею ексцентриків і повертає їх, забезпечуючи розкриття матриці. При подальшому підйомі плити за допомогою собачок і планки піднімається верхня півматриця. Виштовхувачем піднімається відштампована заготовка і видаляється. Ускладнення конструкцій штампового оснащення дозволило отримувати деталі типу «хрестовин» за один технологічний перехід (рис. 7.12, 7.13).

Нагріта заготовка опускається в контейнер до упору в торець пуансону 16. При русі повзуна вниз верхня півматриця 18 стикається з нижньою 17 на певній відстані від нижньої мертвої точки, і далі вони разом опускаються з проміжною плитою 5 штамп. Внутрішні кінці важелів піднімають плитою 4 з пуансоном. В результаті зустрічного руху зімкнутих півматриць і пуансону заготовка деформується. Сила деформування, передаючись через хитні важелі протягом усього робочого ходу, притискає нижню півматрицю до верхньої через середню плиту. При зворотному ході повзуна поковка виштовхується з рівчака верхньої півматриці виштовхувачем.

З рівчака нижньої півматриці виштовхування поковки не передбачено, тому при виготовленні інструменту необхідно забезпечити гарантоване залишання поковки у верхній півматриці через менші, в порівнянні з нижньою півматрицею, штампувальні ухили аж до негативних ($0,5-1,0^\circ$). Середня плита 7 з'єднана з верхньою 2, нижньою 11 і 6 напрямними колонками 3, 8, 13. Повернення плит у вихідне положення здійснюється тарілчастими пружинами 12 і штовхачами, що приводяться в рух нижнім виштовхувачем преса.

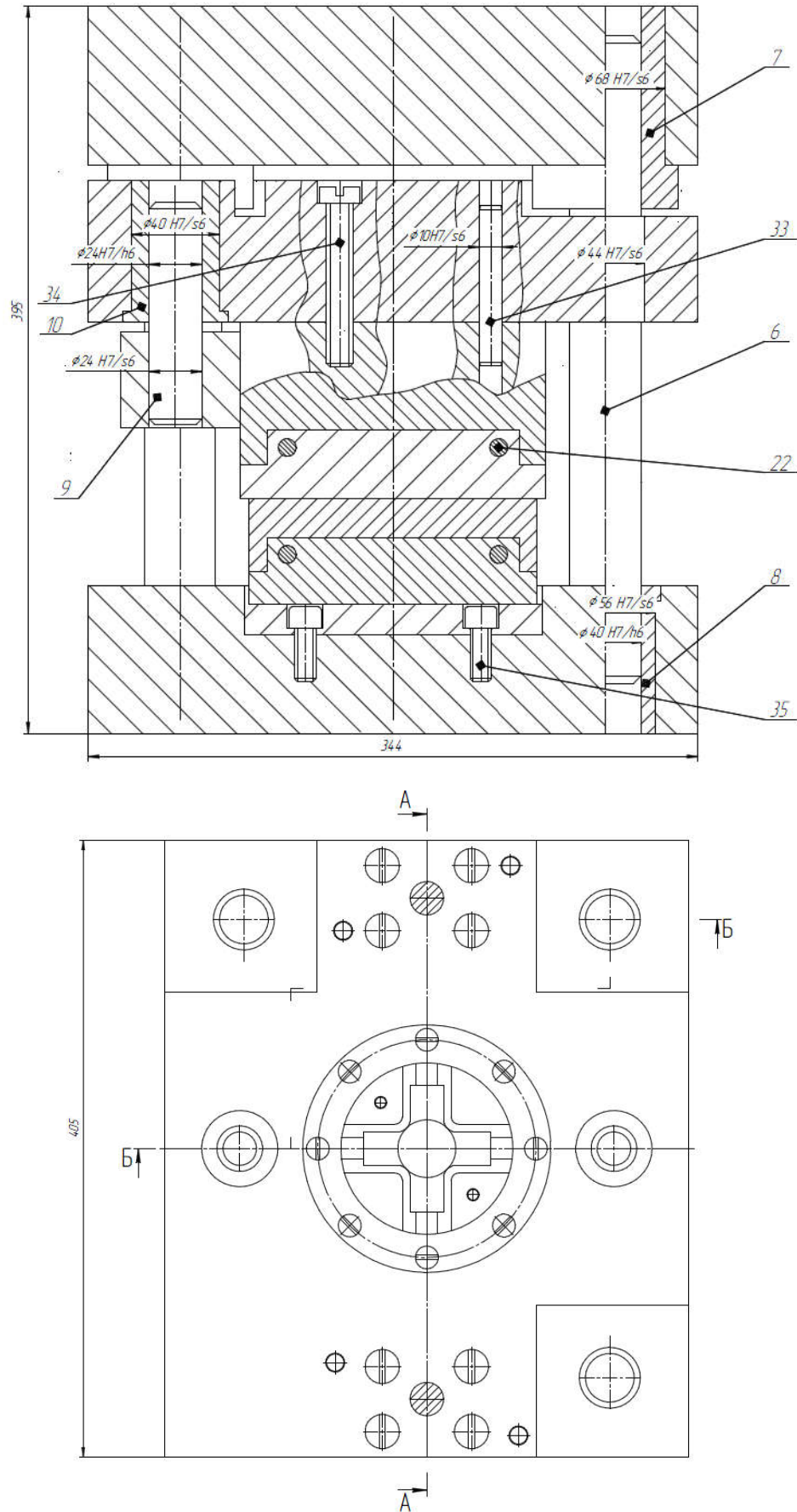


Рисунок 7.12 – Розріз Б-Б, штампу для видавлювання хрестовин

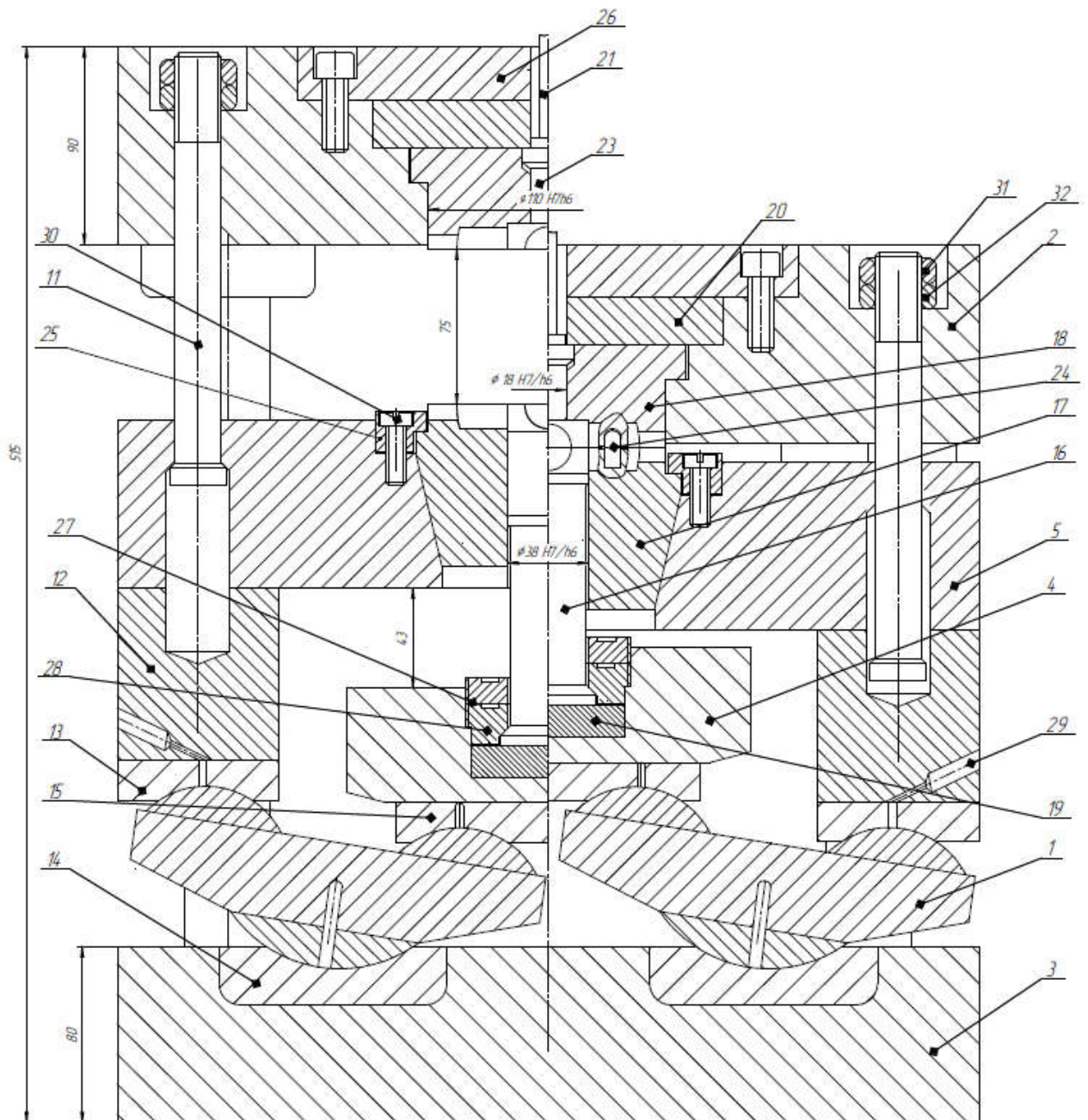
A-A (1:1) повернуто

Рисунок 7.13 – Схема штампа для видавлювання хрестовин

Оскільки для штампування в роз'ємних матрицях застосовують заготовки звичайної точності, в конструкції інструмента передбачені компенсаційні порожнини на торці кожного відростку для виходу надлишкового об'єму металу (понад номінальний). Площа прохідного перерізу компенсаційної порожнини повинна дорівнювати приблизно

половині площі поперечного перерізу відростку. Відростки на поковках, утворені в компенсаторах, видаляють на обрізних пресах або при подальшій обробці поковок на металорізальних верстатах.

На рис. 7.14 зображений фронтальний вид (поздовжній розріз) гідравлічного пресу для багатопорожнинного штампування. На рис. 7.15 – розріз механізму верхнього пресування по А-А. На рис. 7.16 – положення ступінчастої проставки при робочому ході робочого плунжера. На рис. 7.17 – розріз ступінчастої проставки і рухомої плити з закріпленням в ній верхнім прес-штемплем по Б-Б на рис. 7.15.

Гідравлічний прес містить станину рамного типу з проставками 1 станини між верхньою 2 і нижньою 3 нерухомою поперечиною, стягнутими чотирма колонами 4.

У верхній поперечині скомпоновані циліндри 5 притиску, циліндр 6 підйому і опускання рухомої поперечини 7 і механізм 8 верхнього пресування,

У нижній поперечині розташовані; механізм 9 нижнього пресування, циліндри 10 підпору–поршня і на столі закріплюються циліндри 11 бокового пресування зі штоками 12. Рухома поперечина 7 має регульовані напрямні, які кріпляться до проставки 1 станини.

На верхній площині рухомої поперечини 7 в напрямних скомпоновані проставки 13 циліндрів 5 притиску, що мають зв'язок з гідроциліндрами 14 низького тиску, там же закріплені циліндри 15 підбору поршня. В розточці рухомої поперечини 7 в напрямних переміщається прес-штемпель 16. Прес-штемпель 16 жорстко пов'язаний з рухомою плитою 17. На напрямних рухомої плити 17 скомпонована ступінчата проставка 18, яка має два крайніх положення і приводиться в дію циліндрів 19. При лівому крайньому положенні ступінчастої проставки 18 прес-штемпель 16 з рухомою плитою 17 робочий плунжер з хвостовиком, траверса 20 і колони 21, мають напрямні 22, у верхній поперечині 2 станини утворюють замкнену раму.

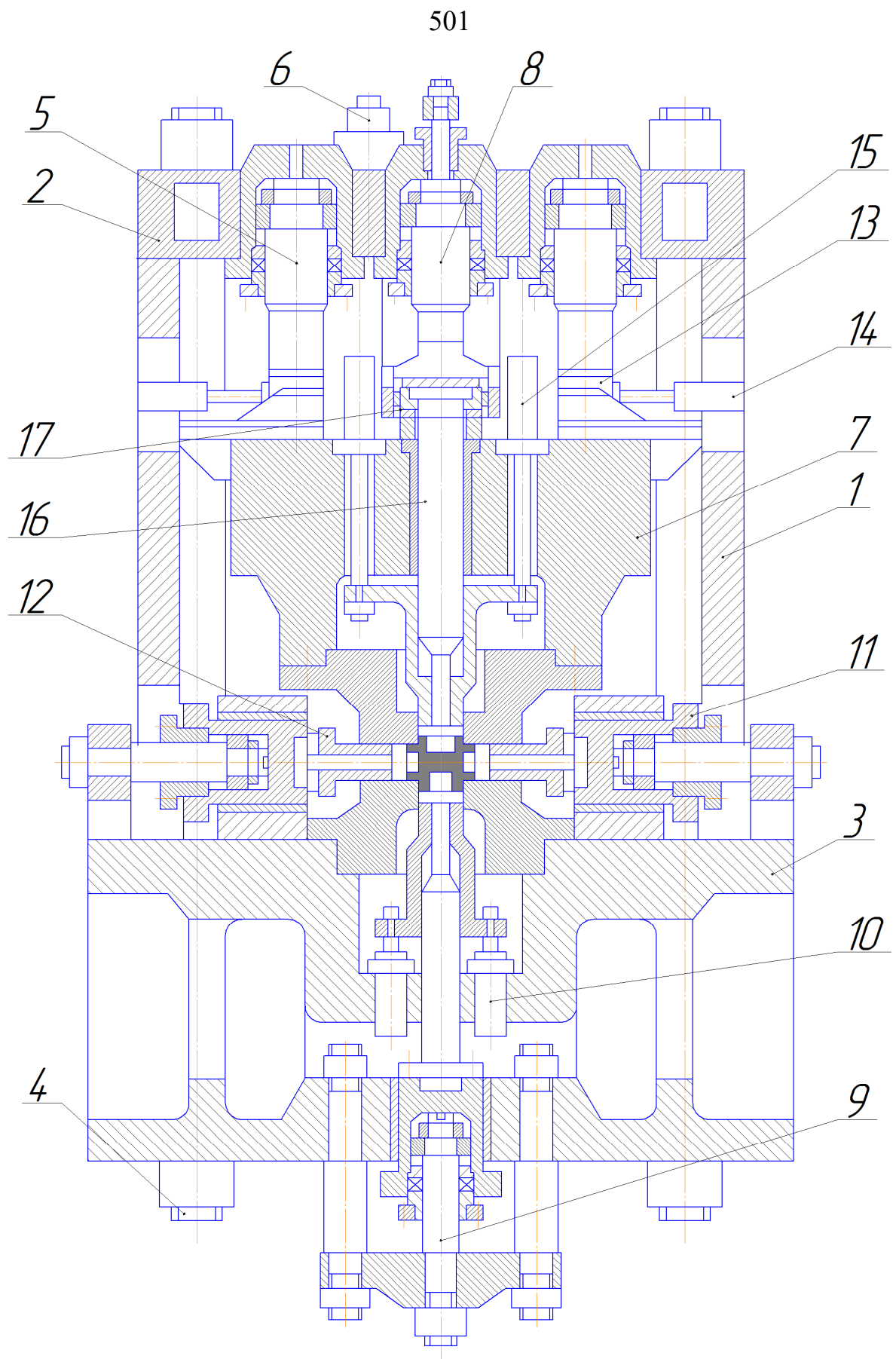


Рисунок 7.14 – Фронтальний вид (поздовжній розріз) гідравлічного преса для багатопорожнинного штампування

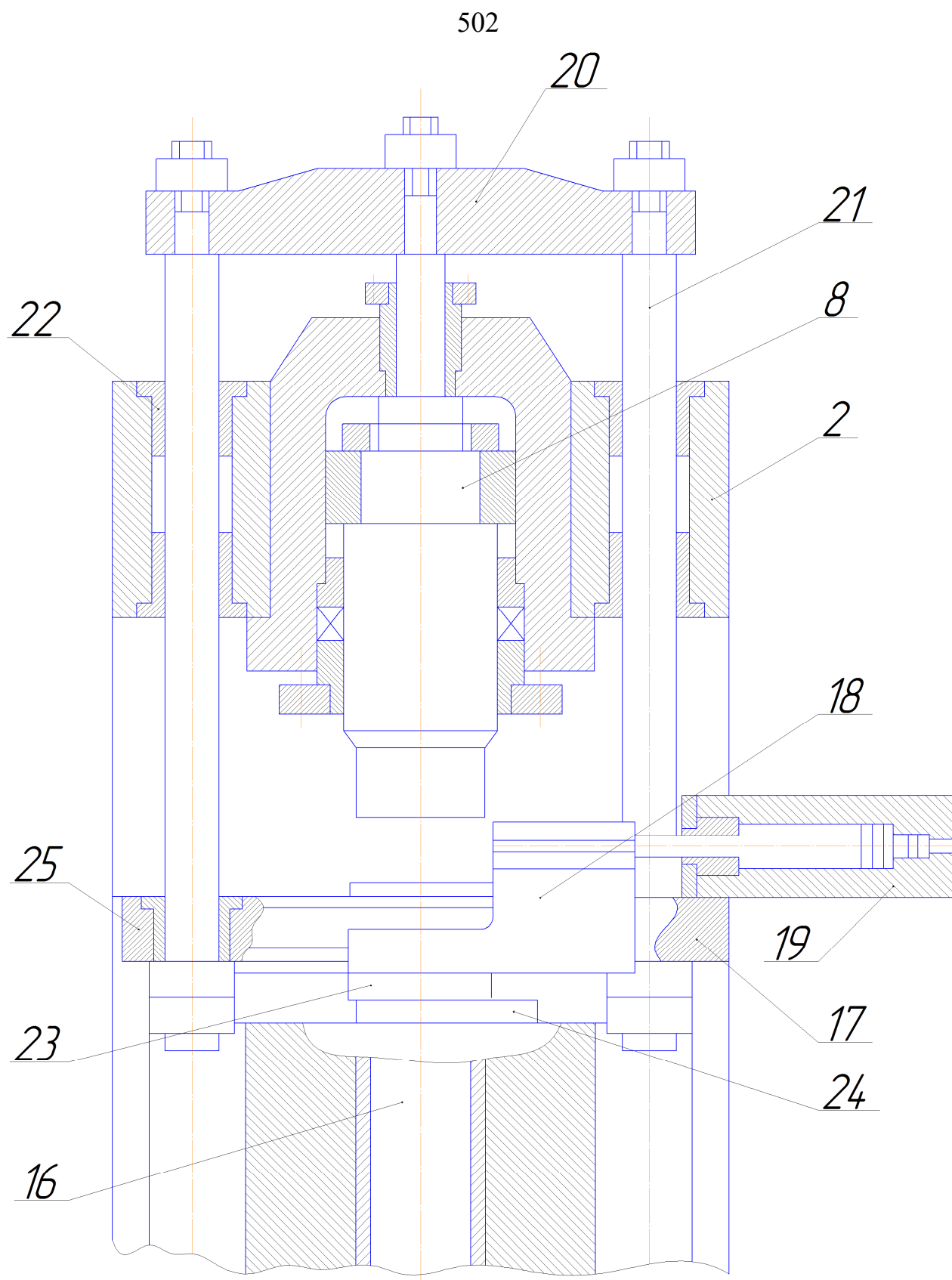


Рисунок 7.15 – Розріз механізму верхнього пресування по А-А

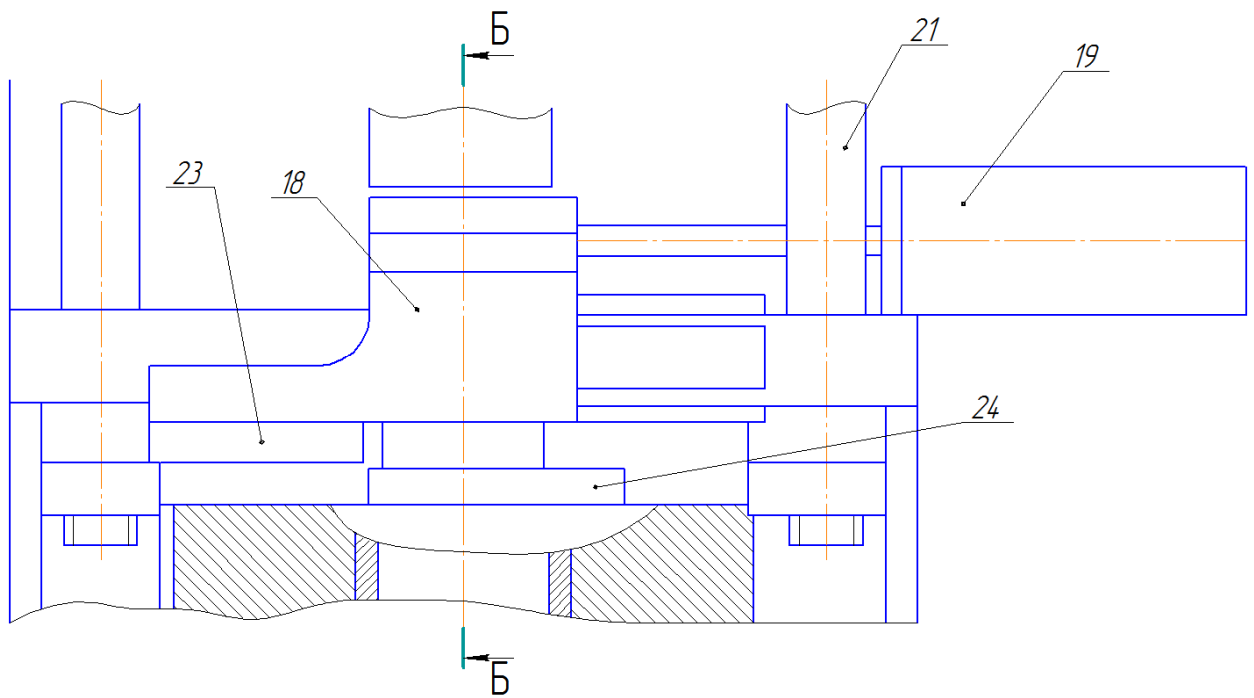


Рисунок 7.16 – Положення ступінчастої проставки при робочому ході робочого плунжера

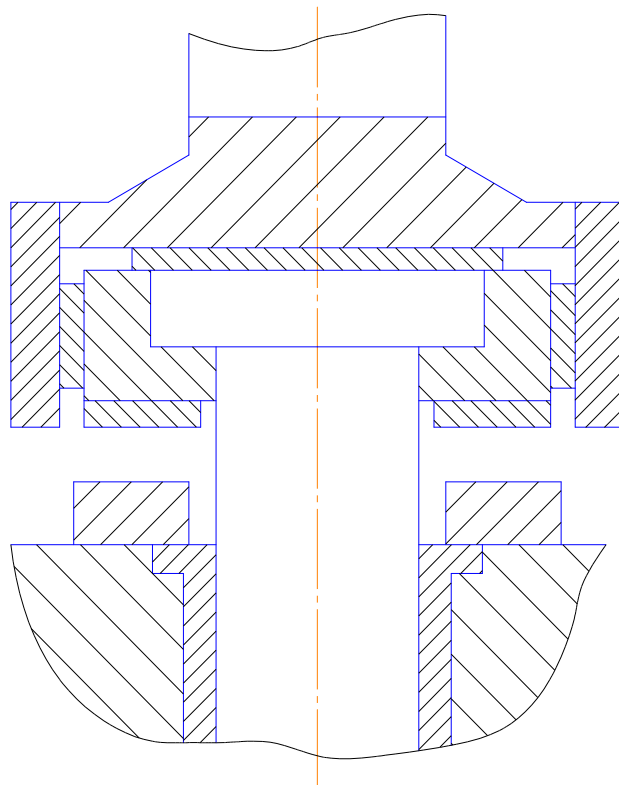


Рисунок 7.17 – Розріз ступінчастої проставки і рухомої плити з закріпленим в ній верхнім прес-штемплем по Б–Б

При крайньому правому положенні проставки 18 її нижня планка 23 спирається на обмежувальну планку 24 і рухома плита 17 з прес-штемпелем 16 знаходиться на рухомій поперечині 7. При цьому рухома плита 17 може переміщатися разом з рухомою поперечиною 7 напрямними 25 щодо колон 21. Прес-штемпель 16 жорстко пов'язаний з рухомою плитою 17. На напрямних рухомої плити 17 скомпонована ступінчата проставка 18, яка має два крайніх положення і приводить в дію циліндри 19.

Описаний прес працює наступним чином.

Після подачі заготовки в штампове простанство рухлива поперечина 7 опускається за рахунок циліндрів 6 опускання спільно з прес-штемпелем 16 і рухомою плитою 17 її направляють ступінчатою проставкою 18. При змиканні штампів рухома плита 17 спільно з прес-штемпелем 16 і ступінчастою проставкою 18 спирається на виступи колон 21. При цьому між робочим плунжером і рухомою плитою 17 утворюється простір, рівний висоті ступінчастої проставки 18. Аналогічний простір утворюється між рухомою поперечиною 7 і штоками плунжерів циліндрів 5 притиску, рівні висоті їх проставок 13, пов'язаних з гідроциліндрами 14. Проставки 13 циліндрів притиску 5 вводяться в утворений простір гідроциліндрами 14 низького тиску з мінімальним зазором.

Притиск штампів здійснюється циліндрами 5 через проставки 13 і рухому поперечину 7. При цьому хід притискних циліндрів дорівнює зазору між ними і величиною деформації станини.

Одночасно з введенням проставок 13 циліндрів притиску 5, вводиться ступінчата проставка 18. При цьому нижня планка 23 ступінчастою проставки 18 виходить з планки 24, закріпленій на рухомій поперечині 7 і обмежуючий хід прес-штемпеля 16. Зазор, що утворився між рухомою поперечиною 7 і рухомою плитою 17, дорівнює величині робочого ходу прес-штемпеля 16.

Прес-штемпель 16 з рухомою плитою 17 через проставку 18, робочий

плунжер, і його хвостовик, траверсу 20 і колони 21 утворюють замкнену раму і, при подачі робочої рідини в поршневу порожнину робочого плунжера здійснюють робочий хід. Робочий хід може відбуватися одночасно всіма, циліндрами або послідовно.

Після здійснення робочих ходів усіма механізмами пресування вони повертаються в початкове положення і потім скидається тиск робочої рідини в поршневих порожнинах циліндрів 5 притиску і виводяться проставки 13.

Одночасно виводиться ступінчаста проставка 18, при цьому вона займає таке положення, що рухома плита 17 з прес-штемпелем 16 спирається на рухому поперечину 7 через планки 23 і 24 і не пов'язана з робочим плунжером. При розмиканні штампів рухома плита 17 з прес-штемпелем 16 і розташованою на ній проставкою 18 переміщаються напрямними 25 відносно колон 21 спільно з рухомою поперечиною 7.

Закритим штампуванням можна виготовити практично готові деталі, які не потребують додаткової обробки зі зняттям стружки. На рис. 7.18 показано штамп для штампа для бокового видавлювання відростків змінного перерізу.

Штамп складається з двох основних частин – пакета і вставок. У пакет входять нижня плита 2 і верхня плита 1, до якої на напрямних колонках кріпиться контейнер 12. У контейнері 12 з допомогою гвинтів 27 кріпиться верхня матриця 9 і 7. В півматриці 7 знаходиться пуансон 5. Пуансони 5 жорстко спираються на верхню плиту. На нижній плиті 2 з опорою на прокладку 14 кріпиться за допомогою вставки 21, яка за допомогою гвинтів 25 кріпиться до нижньої плити 2. До нижньої плити за допомогою болтів 29 кріпиться опорний циліндр 18, з роликоутримувачами 19, і роликами 11. У нижній плиті кріпляться колонки 25, що обмежують хід тримача 13, до якого пальцями 22 кріпляться шість рухомих скоб 17, замикаючих сил розкриття через контейнер 12, 13 і матриці 9, 7, 8 і 10.

Штамп працює наступним чином. Заготовка поміщається в порожнину матриці 8. У верхньому вихідному положенні, знаходиться плита 1 з усім робочим інструментом. При опусканні повзуна преса, пуансон 5 залишається

рухомим до контакту з верхньою плитою 1 і утворює робочу порожнину. При подальшому опусканні плити 1, відбувається змикання контейнера 12 і 13. У момент відбувається їх закриття при русі скоб 17 і одночасно з цим відбувається процес бокового видавлювання. Відштампована деталь, виштовхується з матриці 8 за допомогою поршня. Після того як деталь відштампована і її витягли з порожнини матриці, цикл повторюється.

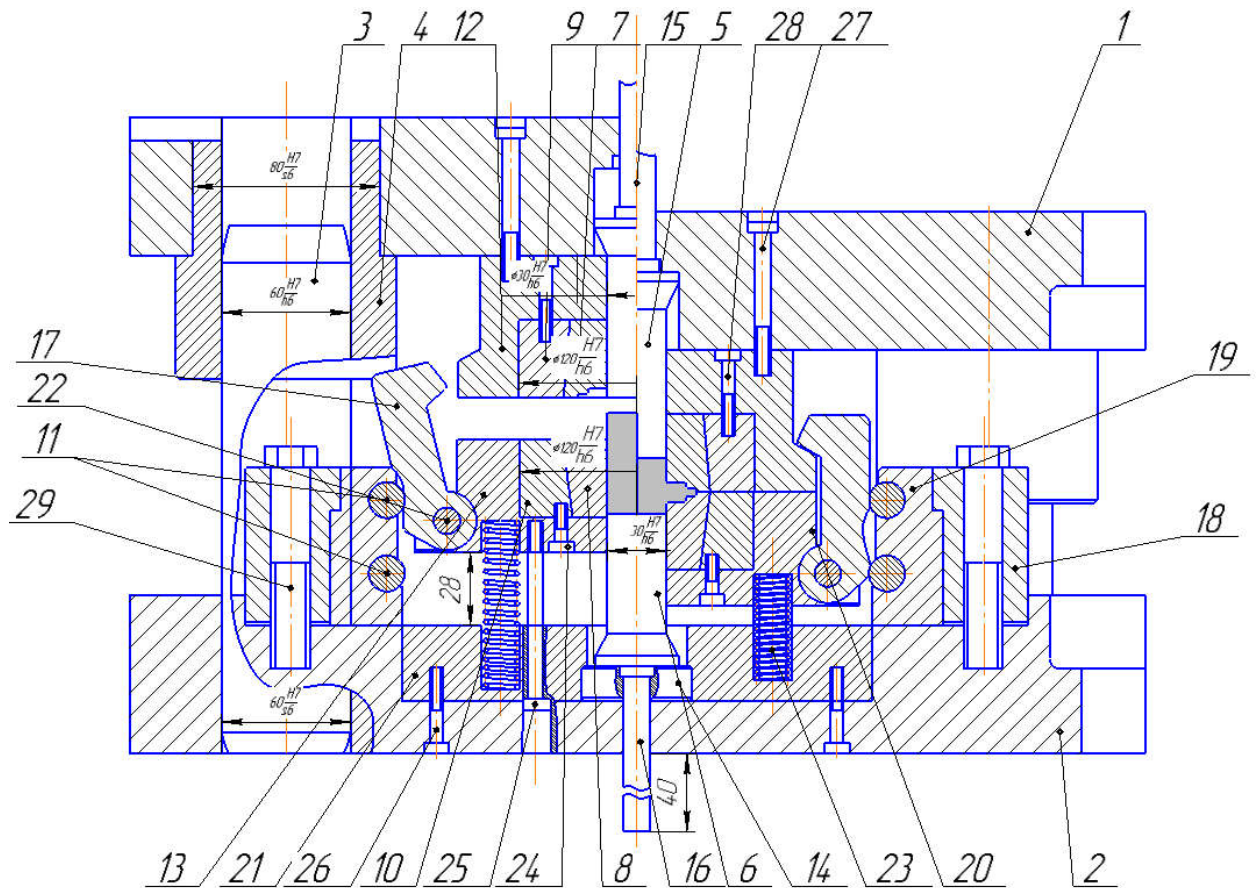


Рисунок 7.18 – Схема штампа для бокового видавлювання відростків змінного перерізу

На рис. 7.19 зображений штамп для виготовлення деталей з відростком за один перехід. Заготовка опускається в контейнер до упору в торець пуансона 5. При русі повзуна вниз верхня півматриця 1 стикається з нижньою 4 на певній відстані від нижньої мертвої точки, і далі вони разом опускаються з середньою плитою 7 штампу. Середня плита 9 через ползушки

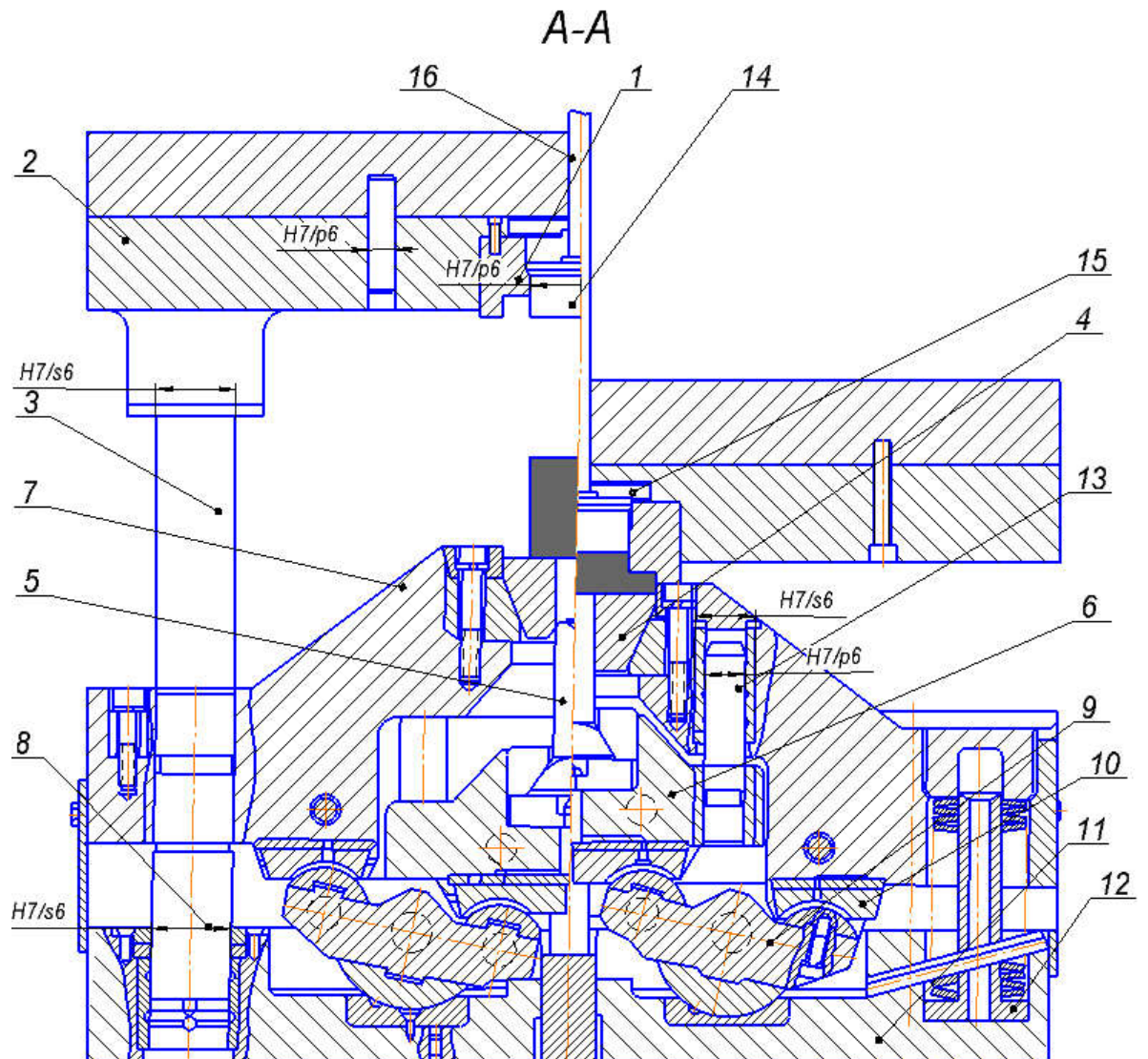


Рисунок 7.19 – – Штамп для видавлювання відростків за один технологічний перехід

10 опускає зовнішні кінці рухомих важелів. Внутрішні кінці важелів піднімають плиту 6 з пуансоном. В результаті зустрічного руху півматриць і пуансона заготовка деформується. Сили деформування, передаючись через коливаючі важелі протягом всього робочого ходу, притискають нижню півматрицю до верхньої через середню плиту. Таким чином, сила притиску залежить від співвідношення плечей рухомих важелів. При зворотному ході повзуна деталь виштовхується з півматриці виштовхувачем 16.

Теоретичні дослідження дозволили спроектувати штамп для бокового видавлювання відростків типу «перо». Штамп (рис. 7.20) складається з

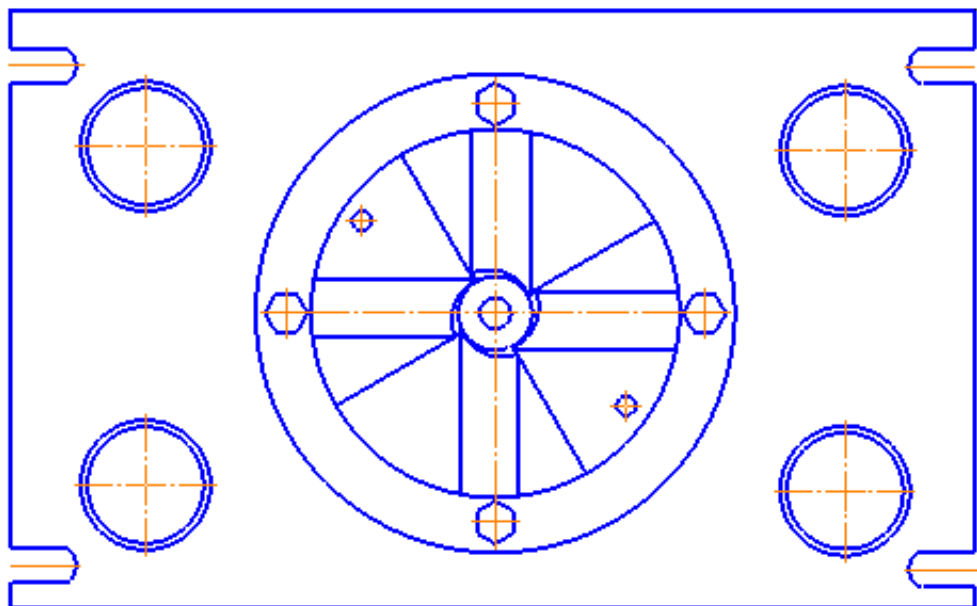
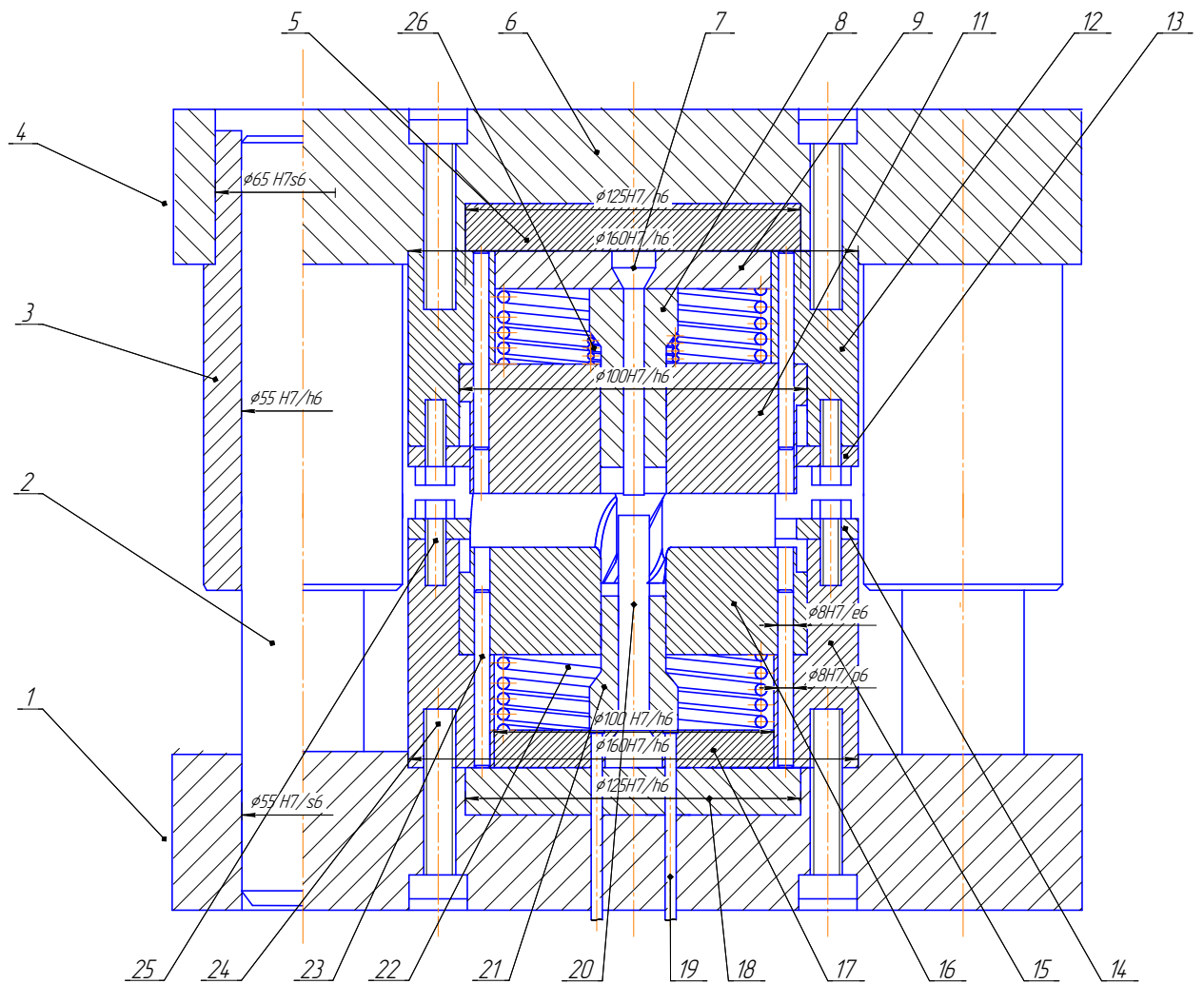


Рисунок 7.20 – Ескіз штампа для бокового видавлювання відростків типу «перо»

видавлювання відростків типу «перо».

Штамп (див. рис. 7.20) складається з нижньої 1 і верхньої 4 плит. До верхньої плити 4 прикріплений матрицетримач 12 за допомогою гвинтів 24. У матрицетримувачі 12 встановлена верхня півматриця 11. Матриця центрується за допомогою штифтів 23. У разі застрягання поковки у півматриці 11, вона буде знята з допомогою поршня 6 і пуансону 8 матрицетримувачів 16 прикріплений до нижньої плити 1 за допомогою гвинтів 23. У матрицетримувачі встановлена нижня півматриця 16, яка центрується штифтами 23 і кріпиться за допомогою кришки 14.

Для штампування порожнистих та суцільних деталей радіальним видавлюванням розроблений штамп (рис. 7.21) що складається з поворотного положення револьверного диска зі змонтованими в ньому матрицями. Поворот револьверного диска здійснюється за допомогою пневмоциліндра, яким керують за допомогою прикріпленого до рухомої плити клина. Для затиску півматриць штамп забезпечений поліуретановим буфером. Видалення відштампованої деталі на позиції розвантаження здійснюється напровал.

Для здійснення технологічного процесу отримання деталі за схемою суміщеного доцентрового та радіального видавлювання за один технологічний перехід розроблено штамп представлений на рис. 7.22.

Робота штампу полягає в наступному: в початковому положенні верхня частина штампа піднята. Заготовка встановлюється в порожнину матриці на торець протипуансона через спеціальне вікно подачі заготовок за допомогою кліщів з губками. При ході повзуна преса вниз матриця 25 підходить до заготовки, потім починається рух пуансону 21. Як тільки матриці зімкнулися, пуансон продовжує свій рух, деформуючи заготовку. Після досягнення необхідних розмірів починається зворотний хід, верхня половина штампу знову піднімається до вихідного положення. Знімання деталі з пуансона і матриці здійснюється знімачем 28. Такий рух забезпечують пружини

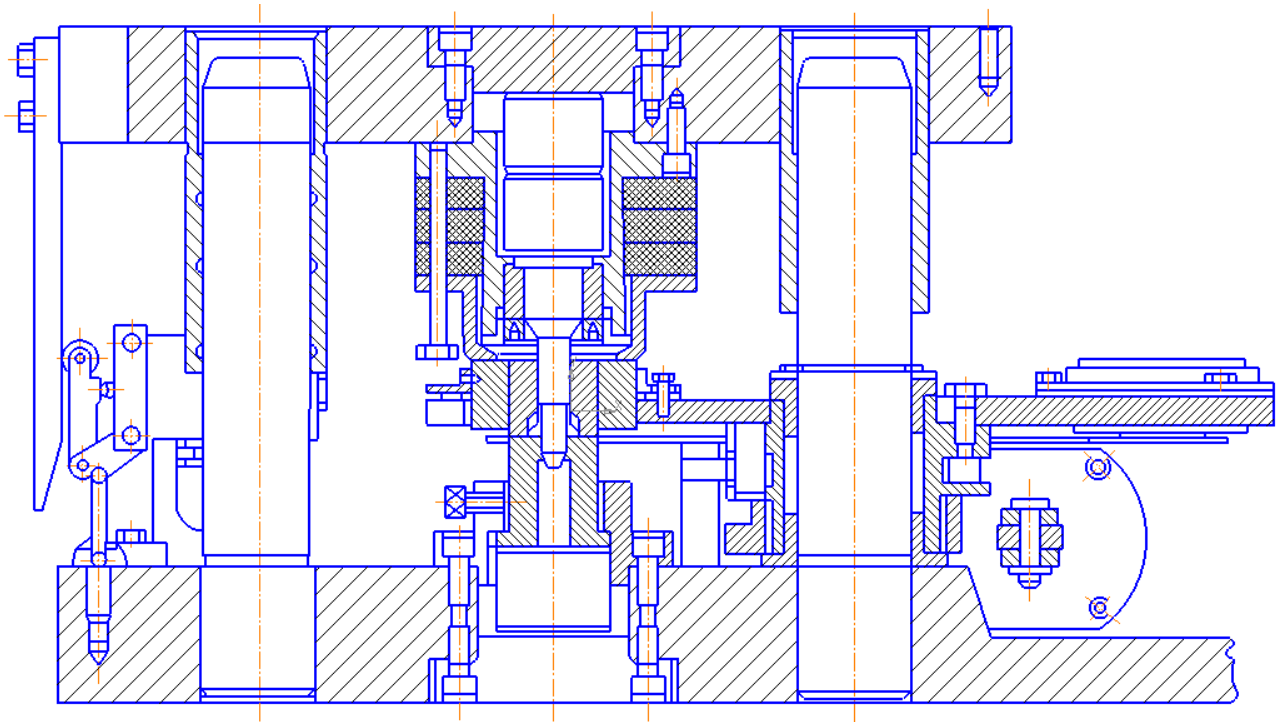


Рисунок 7.21 – Штамп з револьверною подачею для штампування порожнистих та суцільних деталей радіальним видавлюванням

стиснення. При упорі деталі в знімач пуансон продовжує переміщатися вгору, а деталь зривається.

На рис. 7.23 представлений багатопозиційний штамп для комбінованого радіально-зворотного видавлювання деталі «Стакан з фланцем».

Штамп містить прикріплені до верхньої плити 1 за допомогою оправлення 2 гайки 3, тримач 4, деформуючий пуансон 5, що спирається на прокладки 6, 8, а також два штовхача 9 за допомогою оправок 10, гайок 11 і корпусу 12. На нижній нерухомій плиті 13 встановлений матрицетримач 14 і двома нерухомо закріпленими в ній матрицями 15, який має можливість переміщатися уздовж направляючих 16 по підпружиненим пружинами 17 полозам 18 за допомогою, наприклад, пневмоциліндра 19. у двох, перпендикулярно розташованих руху матрицеутримувачах, пазах нижньої плити 13 встановлено відсікачі готових деталей, які складаються з пружних пружинами 20 виштовхуючих пластин 21, що мають можливість

Рисунок 7.22 – Штампування порожнистих втулок за схемою суміщеного доцентрового та радіального видавлювання

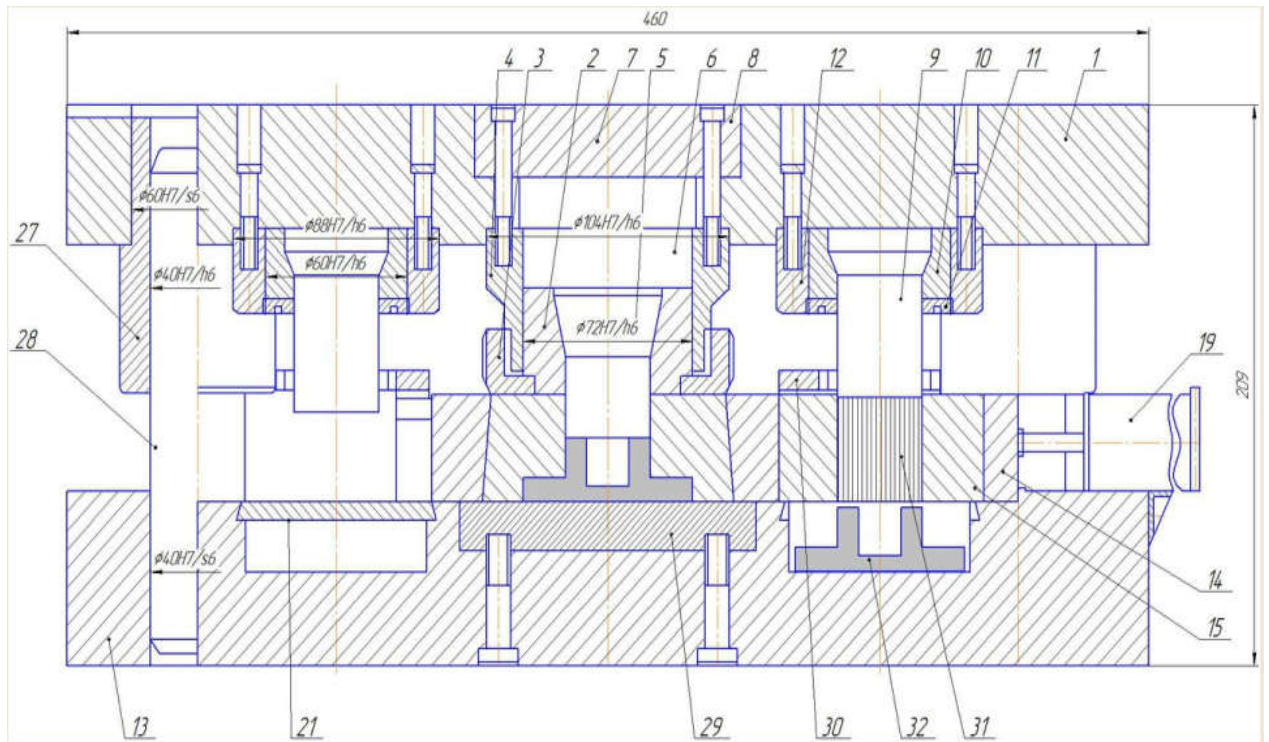


Рисунок 7.23 – Багатопозиційний штамп для комбінованого радіально-зворотного видавлювання

штоками 24, які мають можливість взаємодіяти з похилими вирізом Q в матрицеутримувачі 14 і встановлені в виштовхуючі пластини 21 в кінці робочого ходу за допомогою закріплених у верхній плиті 1 штанг 25, регульованих по висоті за допомогою контргаск 26. Верхня плита 1 пов'язана з нижньою плитою 3 за допомогою центруючих втулок 27 і колонок 28. На позиції деформування в нижній плиті 13 встановлена опорна прокладка 29, на позиціях розвантаження-видалення готових деталей над матрицями 15 встановлені завантажувальні гнізда 30 прикріплені до напрямних 16.

Штамп, працює наступним чином.

Заготовка 31 переважно холодна з допомогою автоматичного завантажувача (робота) (не показаний) і завантажувального гнізда 30, подається на позицію розвантаження, після чого верхня плита 1, разом із закріпленими на ній деформуючим пуансоном 5 і штовхачами 9 опускається і штовхачем 9 заштовхує заготовку 31 в матрицю 15, після чого верхня плита 1

піднімається у вихідне положення, автоматично включається пневмоциліндр 19 і матрицетримач 14 переміщається по полозах 18 в напрямних 16 до упорів, виконаних в нижній плиті 13 (на рис. переміщення буде відбуватися вліво). Таким чином, матриця 15 із заготовкою 31 займає позицію деформування 11 під деформуючим пуансоном 5. Верхня плита 1 опускається і деформуючим пуансоном 5 деформує заготовку 31. Метал заготовки деформуючись, займає порожнину, утворену матрицею 15, пуансоном 5 і прокладкою 29. В кінці робочого ходу оправка 2 впирається в матрицетримач 14 і виробляє підсадку фланця виробу на величину z , тим самим матрицетримач 14 звільняється від розпирних сил, що виникають при заповненні металом заготовки робочої поперечної порожнини. Під час робочого ходу на позиції розвантаження X відбувається проштовхування іншої заготовки (поданої автоматичним завантажувачем в завантажувальне гніздо 30 на позицію T) за допомогою штовхача 9 в другу матрицю 15. Після того як верхня плита 1 знову піднімається, пневмоциліндр 19 повертає матрицетримач 14 у вихідне праве становище, при цьому ліва матриця 15 із заготовкою займає позицію деформування 11, а права матриця 15 з отриманою готовою деталлю 31 – позицію розвантаження T , причому при горизонтальному русі матрицетримач 14, похилий вир з Q діє на упор 23 відсікає готові деталі і відтягує виштовхуючу пластину 21 в початкове положення, стискаючи пружину 20, Після цього верхня плита 1 знову опускається і деформуючий пуансон 5 деформує заготовку 31 в лівій матриці 15 на позиції деформування T , а штовхач 9 заштовхує з завантажувального гнізда 30 заготовку 31 в праву матрицю 15 і виштовхує цією заготовкою 31 готову деталь 32 в поперечну порожнину, виконану в нижній плиті 3 у кінцевий момент опускання верхньої плити штанга 25 впливає на підпружинений пружиною 22 упор 23 і проштовхує його до тих пір, поки він не вийде із зачеплення з матрицетримачем 14, тоді виштовхує пластину 21, під дією стислої пружини 20 починає рухатися по пазах, б'є по готовій деталі 32, зіштовхуючи її по поперечній порожнини в лоток (не

показаний), при цьому виштовхує пластина 21 перекриває порожнину нижньої плити 13, тим самим оберігаючи випадання заготовки 32 з матриці, якщо заготовка рухається в порожнині матриці з зазором. Це досягається відповідним регулюванням довжини штанги 25, завдяки чому відсікач спрацьовує в той момент, коли готова деталь тільки випала з порожнини матриці. При піднятті верхньої плити 1 в верхнє початкове положення, матрицетримач 14 пересувається вліво і весь цикл повторюється.

Таким чином, пропонований штамп може працювати в автоматичному режимі, включення пневмоциліндра відбувається за допомогою кінцевих вимикачів при знаходженні верхньої плити в верхньому вихідному положенні, завантаження заготовок в матриці відбувається або за допомогою автозавантажувачів (роботів, механізмів з грейферною подачею (двох або одного), які розподіляють заготовки на кожен хід преса на позиції.

Штамп для видавлювання деталей зі змінною товщиною стінки (рис. 7.24) складається з блоку, до якого входять верхня 1 та нижня 2 плита, проміжна плита 3, колонки 4, втулки 5, втулки 7. У пакет штампа входять стійки 20, пуансон 10, пуансонотримач 15, гайка 17.

Пуансон 10 кріпиться в пуансонотримачі 15. Заготовка встановлюється на протипуансон 13 в матрицю 11 з бандажем 12. Матриця кріпиться до проміжної плити за допомогою кілець 21. Протипуансон закріплений в пуансонотримачі 14, який прикріплений до нижньої плити за допомогою гвинтів 32. Виштовхування деталі здійснюється за допомогою з'ємника 30 і пружин 37. Для переміщення проміжної плити слугують гідроциліндри 29.

Робота штампа полягає в наступному: у вихідному положенні верхня плита штампа піднята. Заготовка встановлюється в порожнину матриці на торець протипуансона. При ході повзуна преса донизу пуансон підходить до торця заготовки і починає її деформувати, при цьому переміщається донизу разом з матрицею з однаковою швидкістю. Це стадія формування фланця. Далі пуансон продовжує свій рух, а матриця зупиняється. Це стадія

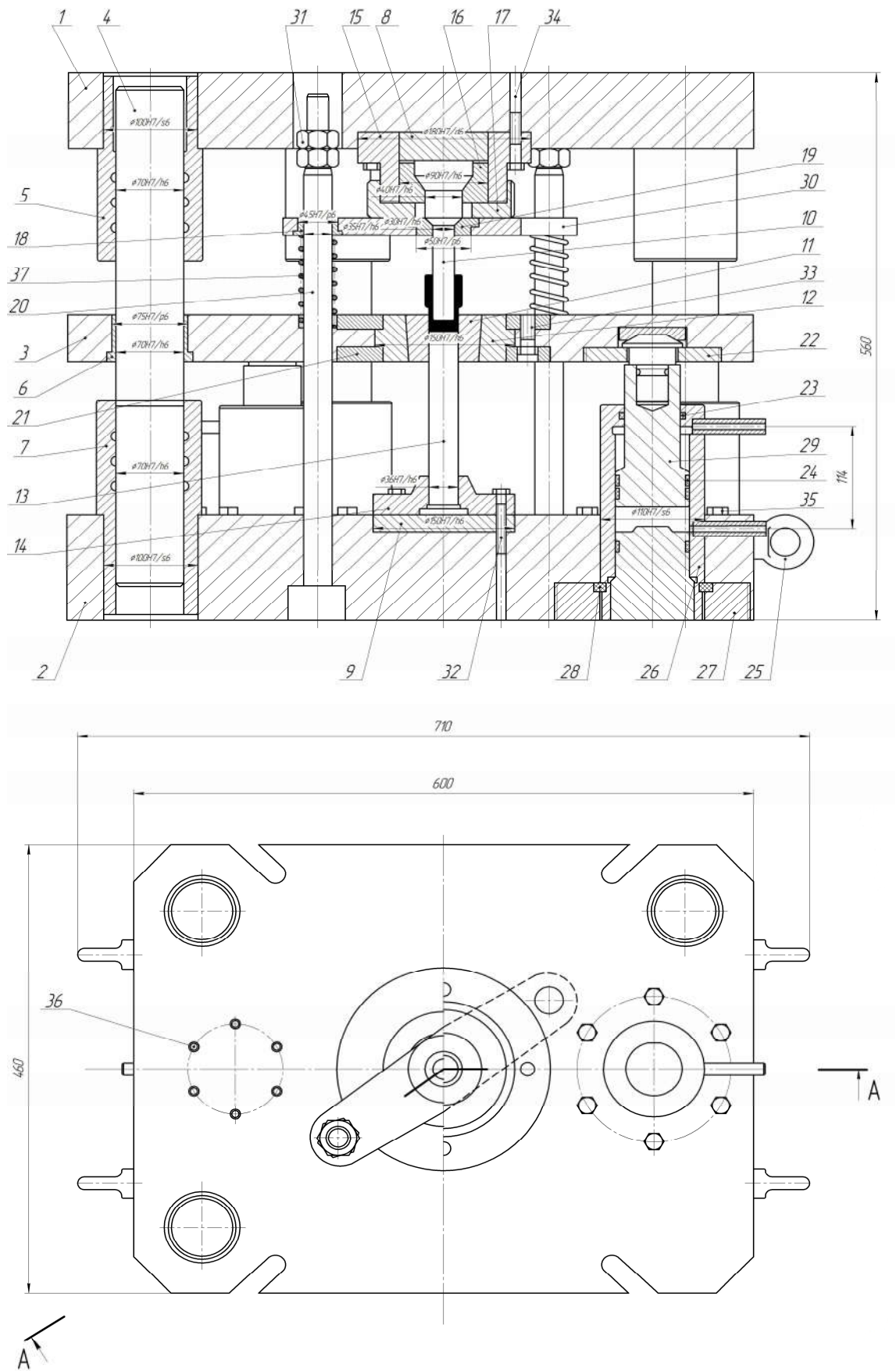


Рисунок 7.24 – Робоча схема штампа для видавлювання деталей зі змінною товщиною стінки

формування стінки стакану. Після отримання необхідних розмірів починається зворотний хід. Верхня половина штампа піднімається вгору до вихідного положення. Знімання деталі з пуансона здійснюється з'ємником, який при ході донизу опускається разом з верхньою половиною штампа, а при ході вгору піднімається до крайнього верхнього положення. Такий рух забезпечують пружини стиснення. При упорі деталі в з'ємник пуансон продовжує переміщатися вгору, а деталь скидається і потрапляє на рухому плиту. Такий рух матриці забезпечують гідроциліндри, які встановлені на нижній плиті штампа.

Штамп для деталей зі змінною товщиною в рухомих матрицях (рис. 7.25) складається з блоку, до якого входять верхня 1 і нижня 2 плити, проміжна плита 3, колонки 4, втулки 5, 7. У пакет штампа входять стійки 20, пуансон 10, пуансонотримач 15, гайка 17.

Пуансон 10 кріпиться в пуансонотримачі 15. Заготовка встановлюється на протипуансон 13 в матрицю 11 з бандажем 12. Матриця кріпиться до проміжної плити за допомогою кілець 21. Протипуансон закріплений в пуансонотримач 14, який прикріплений до нижньої плити за допомогою гвинтів 32. Виштовхування деталі відбувається за допомогою знімача 30 і пружин 37. Для переміщення проміжної плити служать гідроциліндри 29.

Робота штампа полягає в наступному: в початковому положенні верхня плита штампа піднята. Заготовка встановлюється в порожнину матриці на торець протипуансона. При ході повзуна преса вниз пуансон підходить до торця заготовки і починає її деформувати, при цьому матеріал вільно тече в радіальному напрямку. Це стадія формування фланця, вона закінчується, коли рівень торця пуансона доходить до рівня кромки матриці. Далі пуансон продовжує свій рух, а матеріал тече тільки в поздовжньому напрямку. Це стадія формування стінки склянки. Потім пуансон зупиняється, а матриця опускається на рівень формування другого фланця і процес повторюється. Потім формується третій фланець. Після отримання необхідних розмірів починається зворотний хід. Верхня половина штампів піднімається вгору до вихідного положення.

517

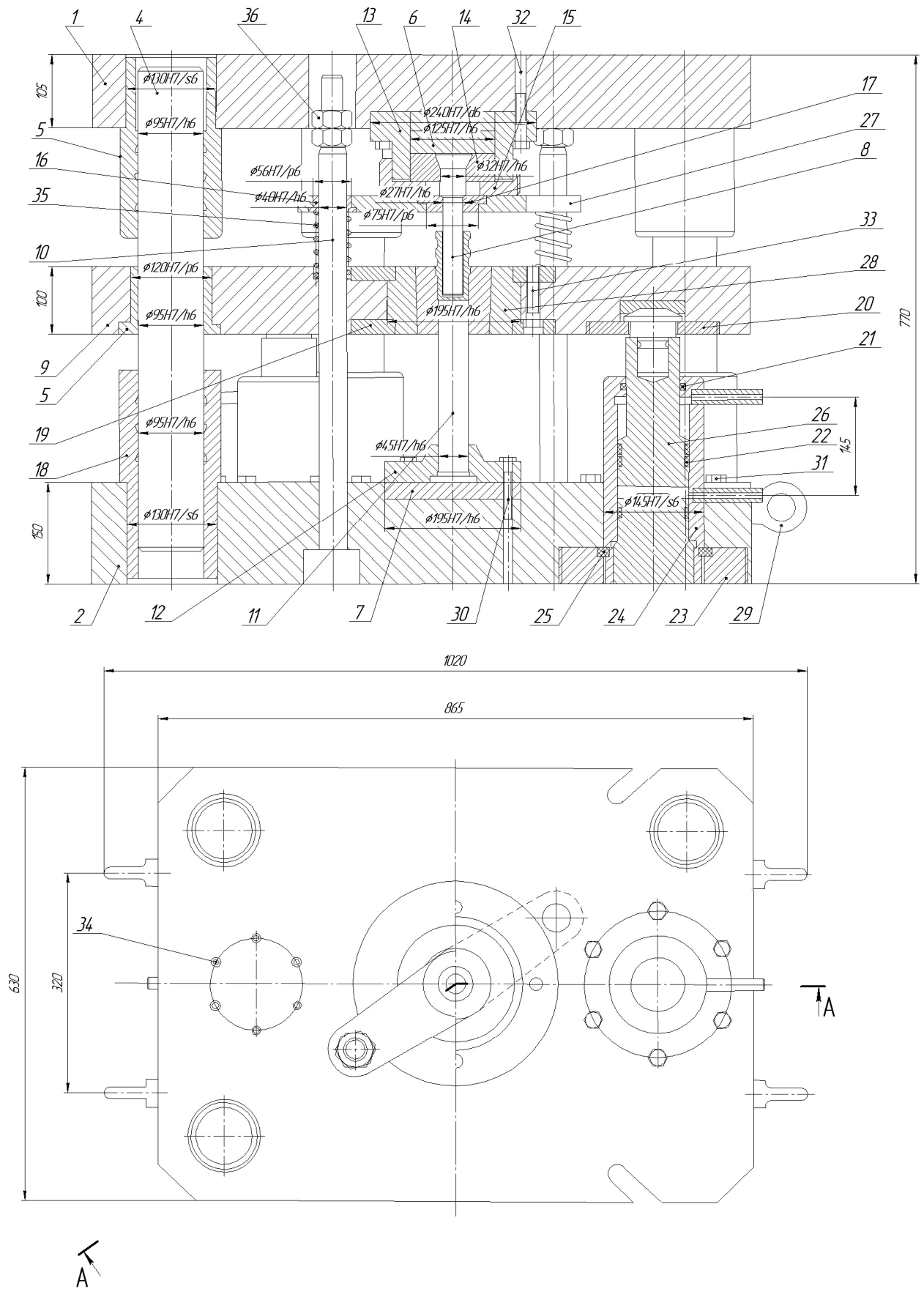


Рисунок 7.25 – Штамп для комбінованого видавлювання в рухомих матрицях

Зняття деталі з пуансона відбувається знімачем, який при ході вниз опускається разом з верхньою половиною штампа, а при ході вгору піднімається до крайнього верхнього положення. Такий рух забезпечують пружини стиснення. При упорі деталі в знімач пуансон продовжує переміщення вгору, а деталь скидається і потрапляє на рухому плиту. Такий рух матриці забезпечують гідроциліндри, які встановлені на нижній плиті штампа.

Для штампування складнопрофільованих виробів спроектовано штамп (рис. 7.26).

Штамп працює наступним чином. Розкриття матриці 1 і 3 в штампі проводиться в напрямку руху пуансона 4, укріпленого на верхній плиті 5 штампа. Стиснення матриць здійснюється важільно-клиновим механізмом, що складається з двох пар ламких важелів 7 і 8, шарнірно з'єднаних важелів 9 нижньої плити 6 і середньої плитою 10, а також двох клинів 11, укріплених в кронштейнах 12 верхньої плити штампа. Положення клинів 11 в кронштейнах може регулюватися, що дозволяє змінювати сили стиснення матриць в широких межах.

У вихідному положенні (повзун преса у верхній мертвій точці) середня плита 10 з верхньої матрицею 3 опущена вниз до зіткнення матриць. У цей момент проводиться завантаження заготовки в нижню матрицю. При русі повзуна вниз клини 11 ставлять в розпір ламких важелів 7 і 8, створюючи тим самим необхідні сили стиснення матриць. Потім починається деформування заготовки. При зворотному ході повзуна кронштейни 12 через підпружинені засувки 13 піднімають середню плиту штампа з верхньої матрицею, даючи можливість видалити відштамповані поковки за допомогою виштовхувачів 14. Для опускання середньої плити в початкове положення засувки 13 прибираються в пази.

Холодне об'ємне штампування характеризується високими питомими силами деформування, які визначають жорсткі вимоги до технологічної оснастки.

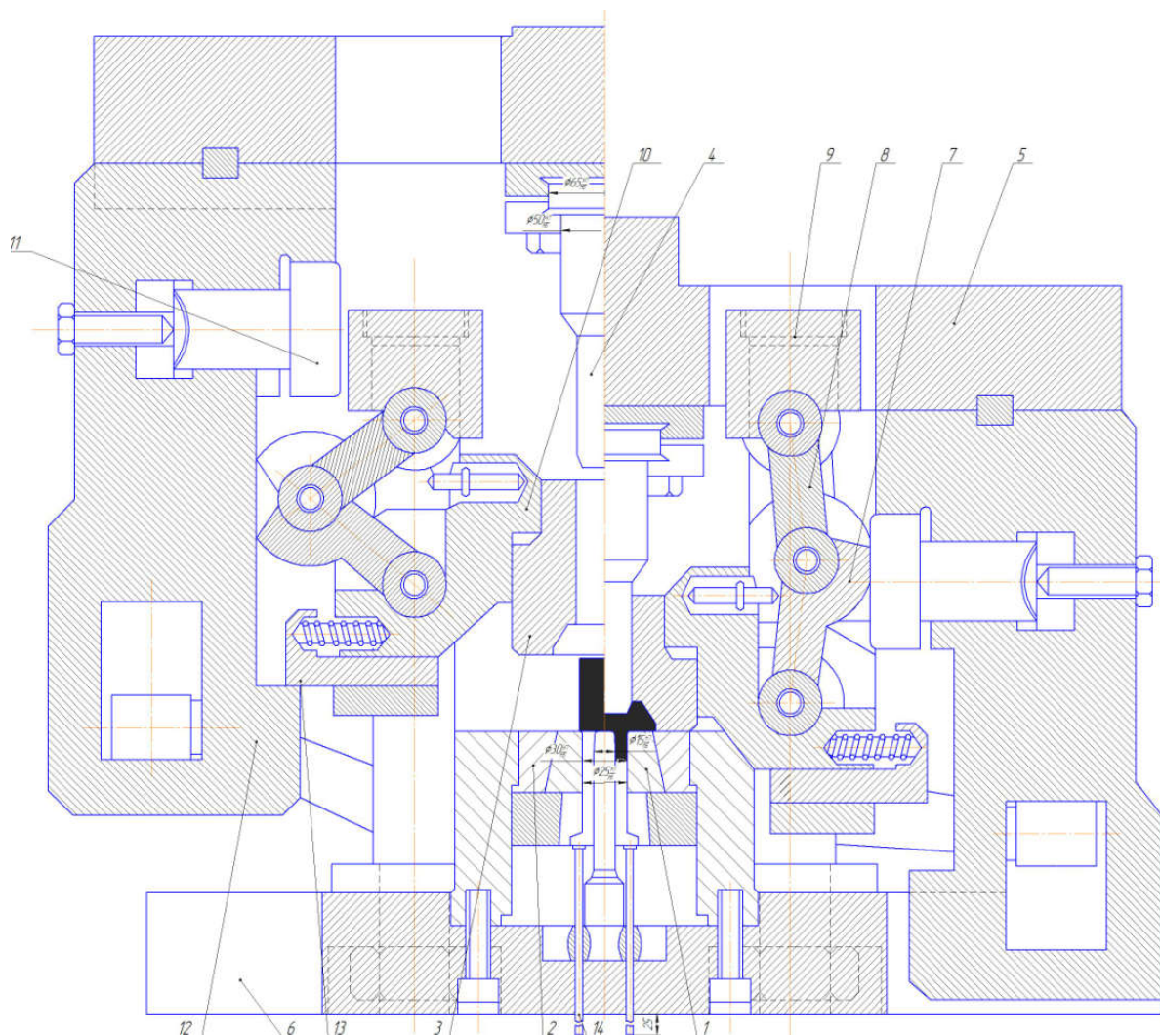


Рисунок 7.26 – Штамп для комбінованого видавлювання складнопрофільованих деталей

7.3 Удосконалення процесів об'ємного штампування та розширення їх технологічних можливостей на основі управління кінематикою формоутворення деталей

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень вдалось отримати ряд заходів, що розширюють технологічні можливості об'ємного штампування та дозволяють отримувати більш якісні вироби. Отримані результати роботи захищені патентами України.

Патент на спосіб отримання порожнистих виробів з фланцем, полягає у радіально-зворотному видавлюванні металу в порожнину, утворену

півматрицями, який відрізняється тим, що на заключній стадії процесу деформування виконується осадка утвореного фланця переміщенням верхньої півматриці.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення відомого способу отримання порожнистих виробів з фланцем та поліпшення якості деталей типу стаканів з фланцем за рахунок усунення утягнення біля дна порожнини. Поставлена задача вирішується за рахунок того, що на заключній стадії процесу деформування виконується осадка утвореного фланця переміщенням верхньої півматриці. При осадці фланця метал тече також в напрямку до центру заготовки, що сприяє заповненню утягнення. Таким чином, утягнення усувається, в результаті чого підвищується якість деталі типу стаканів з фланцем, що штампується.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням (рис. 7.27), на якому зображено:– початкова стадія процесу радіально-зворотного видавлювання деталі типу стаканів з фланцем; схема усунення утягнення а шляхом руху півматриці на заключній стадії процесу (рис. 7.28).

Отримання деталей типу стаканів з фланцем здійснюється в такий спосіб. Заготовка 1 з підготовленою поверхнею, переважно холодна, укладається в штамп, який включає деформуючий пуансон 2, верхню 3 та нижню 4 півматрицю. З початком руху пуансона 2 починається процес деформування заготовки 1 і на першому етапі в результаті комбінованого радіально-зворотного видавлювання металу в порожнину півматриць 3 і 4, утворюється деталь типу стаканів з фланцем з технологічною висотою $H=(1,2\dots1,3)h$, де h – необхідна висота фланця готового виробу. За рахунок радіальної течії металу в кругову поперечну порожнину формується фланець виробу, а зворотною течією металу формується стінка стакану. При чому на внутрішній поверхні деталі в області утворення фланця (переважно відносно високого) в результаті інтенсивної радіальної течії біля дна порожнини стакану утворюється дефект типу утягнення a (піднутрення порожнини стакану). Це відбувається при досягненні пуансоном 2 області утворення фланця.

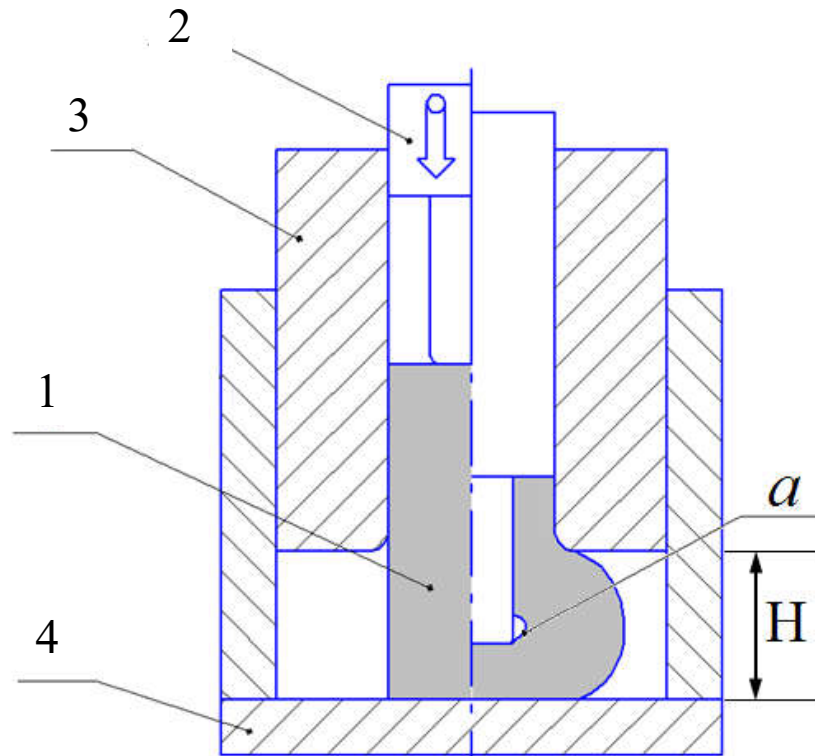


Рисунок 7.27 – Початкова стадія процесу радіально-зворотного видавлювання деталі типу стакан з фланцем

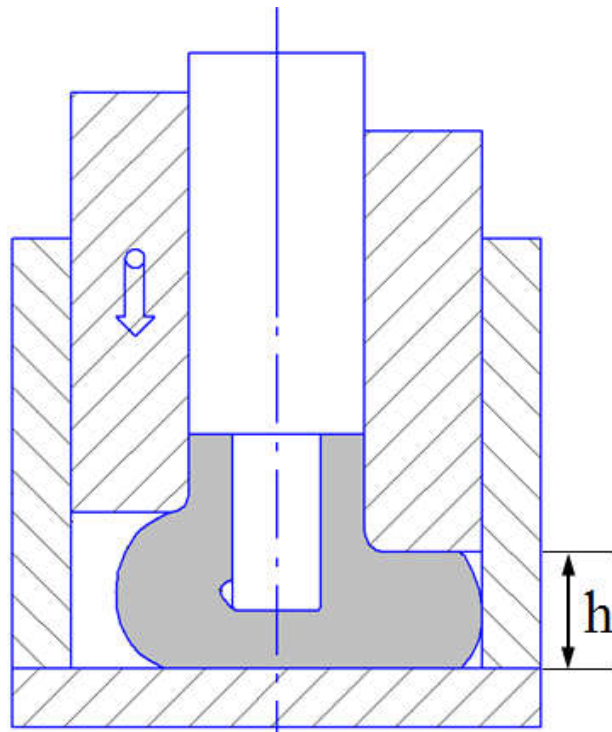


Рисунок 7.28 – Схема усунення утягнення а шляхом руху півматриці на заключній стадії процесу

На другому етапі процесу деформування, тобто на заключній стадії процесу, рух пуансона 2, як правило, припиняється, і виконується осадка утвореного фланця. Для цього переміщують вниз верхню півматрицю 3, в результаті чого технологічна висота фланця H зменшується до необхідної висоти фланця h . При осадці фланця метал тече і в напрямку до центру виробу та заповнює утягнення a , за рахунок чого цей дефект усувається.

При досягненні необхідних розмірів виробу рух інструментів припиняється, деталь виймається із штампу і цикл штампування продовжується.

Застосування пропонованого способу отримання порожнистих виробів з фланцем дозволяє отримувати деталі типу стакан з фланцем з усуненням дефектів форми типу утягнення. Це забезпечує поліпшення якості виробів і підвищення продуктивності їх виготовлення.

Спосіб виготовлення деталей з фланцем полягає у радіальному видавлюванні металу заготовки в кругову порожнину утворену двома півматрицями роз'ємної матриці, який відрізняється тим, що заготовка попередньо редукується у верхній півматриці, при цьому деформуванню підлягають одночасно дві заготовки, а виштовхування готової деталі відбувається під впливом наступної заготовки.

Поставлена задача вирішується шляхом попереднього редукування у верхній півматриці (заготовку обтискають по зовнішньому діаметру). Так як при редукуванні виникають сили, які спрямовані проти сил розкриття це дозволяє знизити сили розкриття роз'ємної матриці (двох півматриць).

При обтисненні заготовки створюється сприятлива схема напружено-деформованого стану, а саме всебічне стиснення, що підвищує якість поверхневих шарів заготовки і пластичність металу, так як «заліковує» мікротріщини та дефекти поверхневого шару заготовки та сприяє кращій обробці металу у фланці на стадії радіального видавлювання. Підвищення тим самим граничної пластичності металу відбувається за рахунок знакозмінної деформації, що з'являється на послідовних стадіях редукування

та наступного радіального видавлювання. За рахунок редукування стрижневої частина заготовки також зміцнюється, що сприяє підвищенню ступеню рівномірності та якості виробу.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями на яких зображено: рис. 7.29 – початкова та друга стадія радіального видавлювання у роз'ємній матриці суміщеного з попереднім редукуванням заготовки; рис. 7.30 – третя стадія радіального видавлювання, етап виштовхування деталі з півматриці та попереднє редукування наступної заготовки.

Спосіб здійснюється наступним чином. Попередня заготовка 1 та наступна заготовка 2, які розташовані одна над одною з підготовленою (змащенням) поверхнею, встановлюють в осьову порожнину верхньої півматриці 3 і тиснуть на заготовку 2 з її верхнього торця пуансоном 4, при цьому починається проштовхування попередньої заготовки 1 у звужену частину порожнини верхньої півматриці 3. Тим самим виконують редукування (обтиснення) заготовки 1 у верхній півматриці 3. Ступінь деформації при редукуванні рекомендується близько 20...25%. Після виконання редукування і досягнення торця заготовка 1 поверхні нижньої півматриці 5 завершується перша стадія обробки.

Розпочинається друга стадія видавлювання, на якій маємо два осередки деформації зі сталою течією металу: перший – редукування і другий – радіальне видавлювання. Під час радіального видавлювання метал, що деформується, заповнює кругову порожнину утворену в роз'ємній матриці, тобто між двома півматрицями 3 і 5, з постійним збільшенням розмірів фланця. На цій стадії в силу видавлювання металу виникає сила розкриття роз'ємної матриці, значення якого частково знижується за рахунок сил редукування які зустрічно направлені по відношенню до сил розкриття. Попередня деформація редукуванням заготовки поліпшує напружено-деформований стан (всебічне стиснення) та якість поверхневих шарів, заліковуючи дефекти металургійного походження. За рахунок цього зростає ступінь деформації радіального видавлювання та зростає відносний діаметр

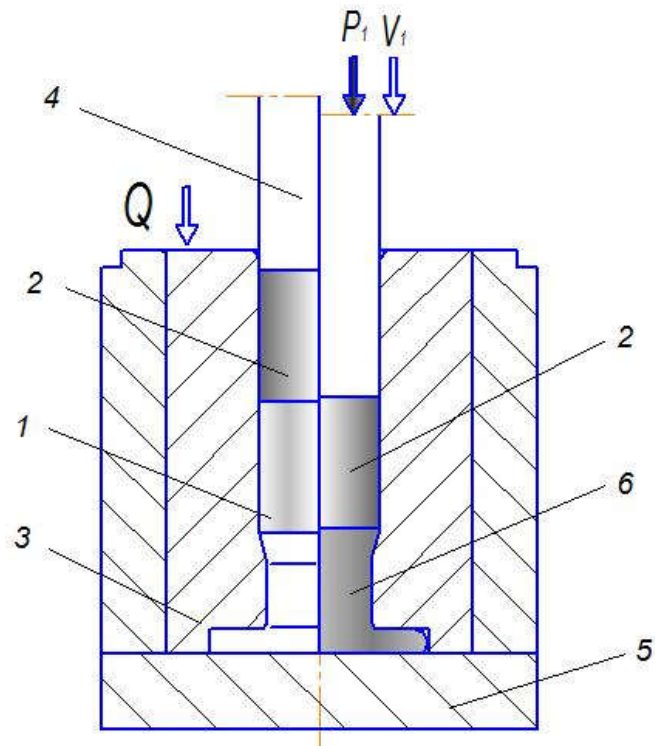


Рисунок 7.29 – Початкова та друга стадія радіального видавлювання у роз'ємній матриці суміщеного з попереднім редукуванням заготовки

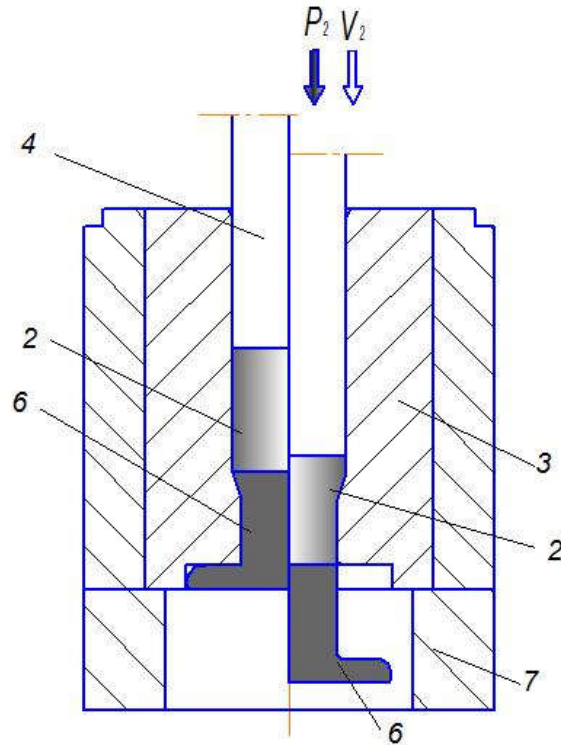


Рисунок 7.30 – Третя стадія радіального видавлювання, етап виштовхування деталі з півматриці та попереднє редукування наступної заготовки

фланця, який видавлюється. Редукування сприяє зміцненню стрижневої частини деталі 6, тим самим покращуючи якість всього виробу.

Після закінчення радіального видавлювання відбувається етап розвантаження. Нижню півматрицю 5 замінюють на кільце 7. Під натиском пуансону 4 відбувається виштовхування готової деталі 6 заготовкою 2 у порожнину кільця 7. Виштовхування готової деталі може бути здійснено і на окремій позиції під впливом іншого пуансону. Після цього закладається наступна заготовка в півматрицю і цикл штампування повторюється.

Обробка в зазначеній послідовності сприяє зменшенню сил розкриття роз'ємної матриці на силу редукування, зменшенню нерівномірності деформації і зміцненню деталі, та підвищення пластичності та ступеню деформації при видавлюванні.

Застосування способу дозволяє розширити номенклатуру виробів за рахунок підвищення ступеню радіального видавлювання, якість деталей та спрощення конструкції штампа шляхом зменшення потрібних сил запирання роз'ємної матриці.

Спосіб отримання порожнистих виробів з тонким дном полягає у пластичній течії металу між матрицею і пуансоном для зворотного холодного видавлювання, який відрізняється тим, що на дні стакана формується зовнішній кільцевий виступ шляхом заповнення заглиблення в торці протипуансона.

Формування кільцевого виступу певного обсягу дозволяє створити локальний набір металу і впливати на утворення утягнення тим, що в області виступу накопичується об'єм металу, достатній для заповнення утягнення у заключній стадії процесу, коли переміщуються периферійні шари металу прискорено вгору. Внаслідок створення такого технологічного виступу з об'ємом, достатнім для компенсації кутового незаповнення контуру (утягнення), усувається відхилення форми у вигляді утягнення.

Суть корисної моделі пояснюється рис. 7.31, стакан з тонким дном, на якому при видавлюванні утворюється утягнення α (див. 7.31 а), та схема

здійснення способу отримання порожнистих виробів з тонким дном (див. 7.31 б).

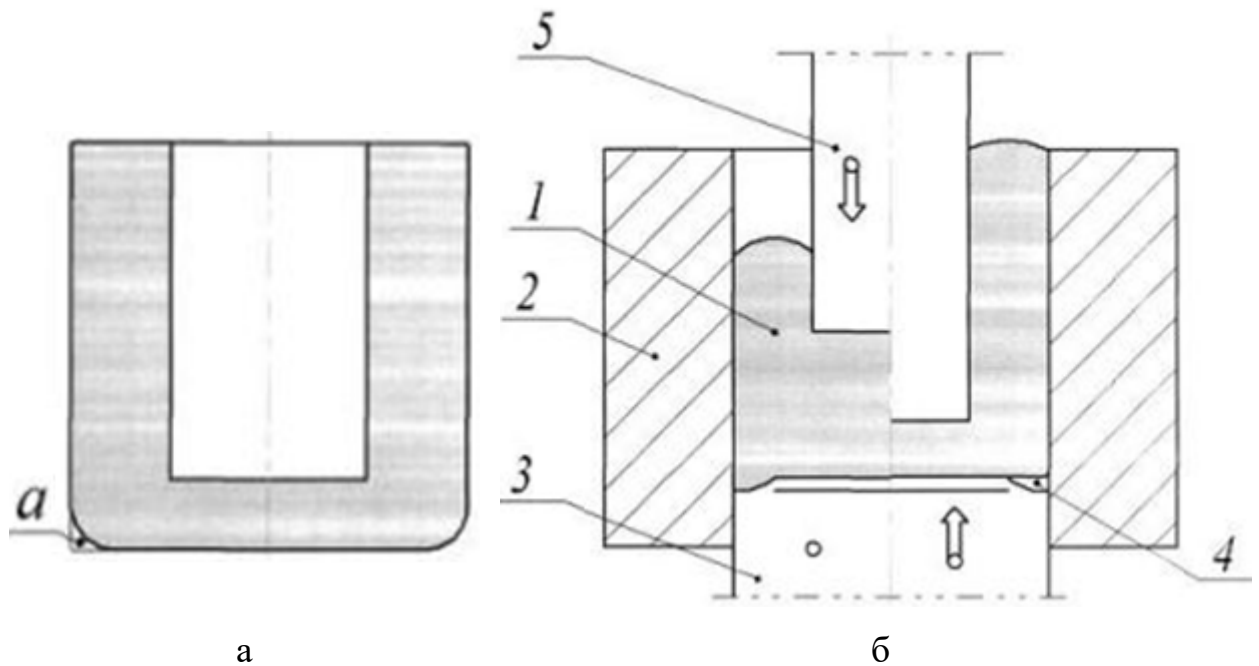


Рисунок 7.31 – Стакан з тонким дном, на якому при видавлюванні утворюється утягнення α (а) та схема здійснення способу отримання порожнистих виробів з тонким дном

Отримання порожнистих виробів з тонким дном здійснюється в такий спосіб. Заготовка 1 з підготованою поверхнею і структурою, переважно холодна, укладається в матрицю 2 на протипуансон 3, на торці якого виконано заглиблення 4, і здійснюють деформування пуансоном 5. Метал заготовки видавлюється в зворотному напрямку в зазор між пуансоном 5 і матрицею 2. Одночасно зі зворотним видавлюванням на поверхні в донній частині формується кільцевий виступ за рахунок видавлювання металу в заглиблення 4, що виконане на торці протипуансона 3. У заключній стадії видавлювання починається інтенсивна течія металу з заглиблення 4, заповнюючи кутову зону, в якій повинно було б з'явитись утягнення α . Після досягнення необхідної товщини дна стакана зворотне видавлювання завершується, тобто рух пуансону і силовий вплив з боку пуансона

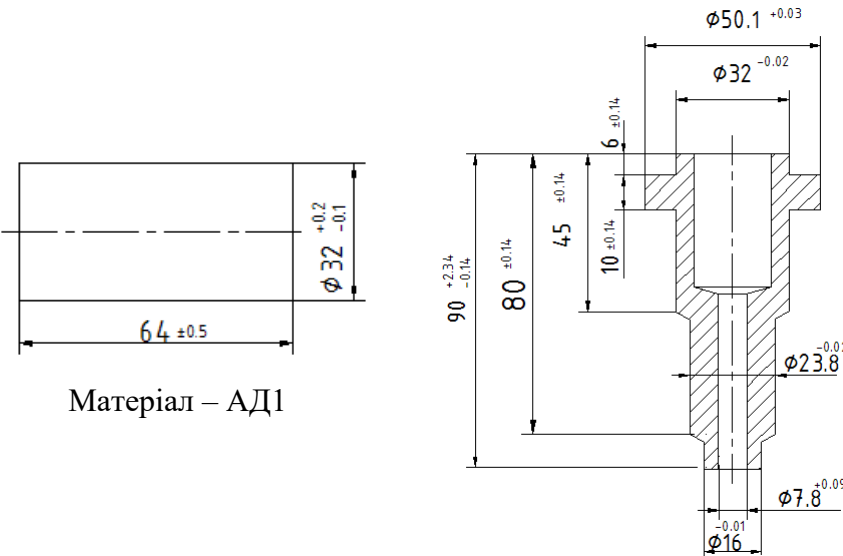
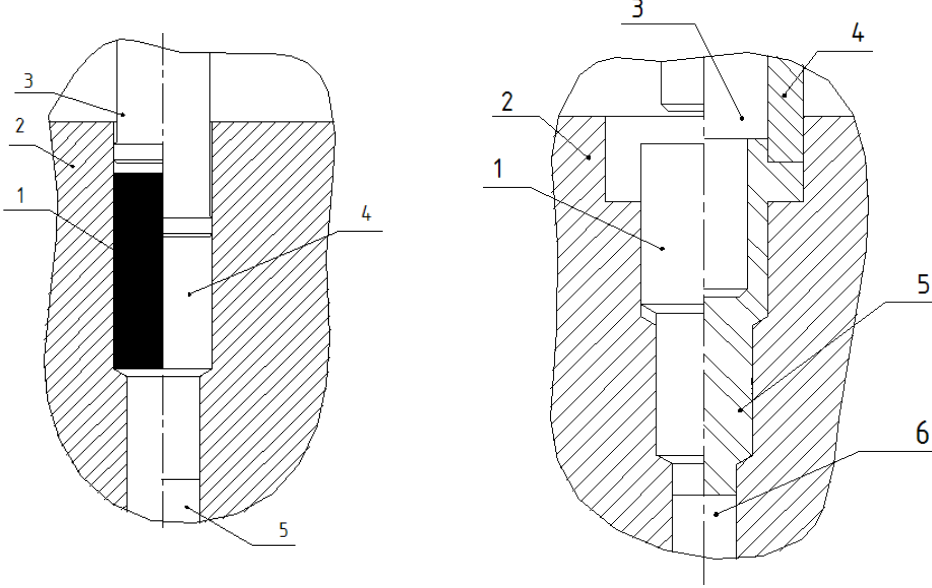
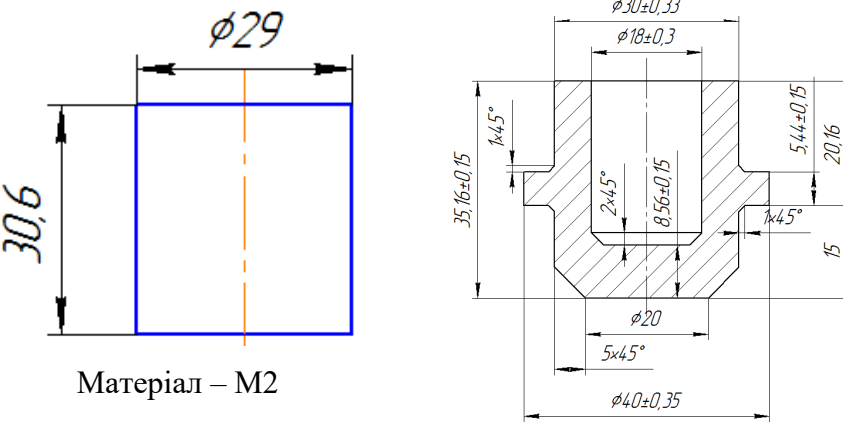
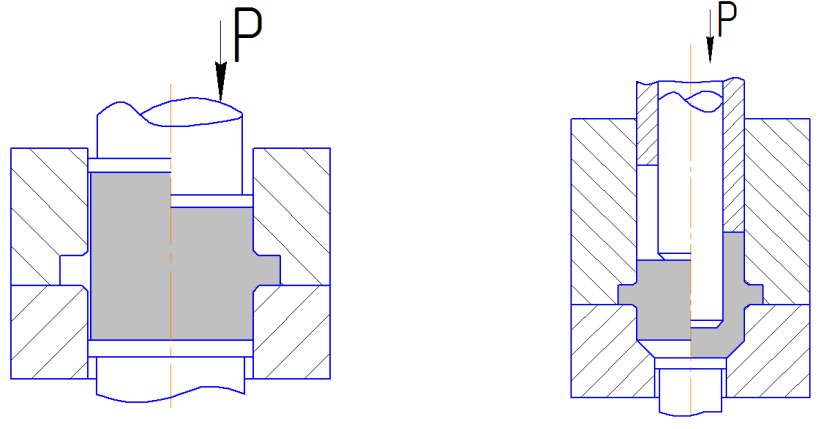
припиняють. Розміри утвореного на поверхні заготовки виступу обираються в залежності від розмірів стінки і дна стакану, а також відповідно розмірів утягнення, що очікується. Ширина виступу переважно рівна товщині стінки виробу. Приклад здійснення способу. Відпалену заготовку зі сталі 15 кп діаметром 28 мм і висотою 21 мм піддавали холодному зворотному видавлюванню в штампі. Мазильний шар створювали фосфатуванням і омилуванням заготовки.

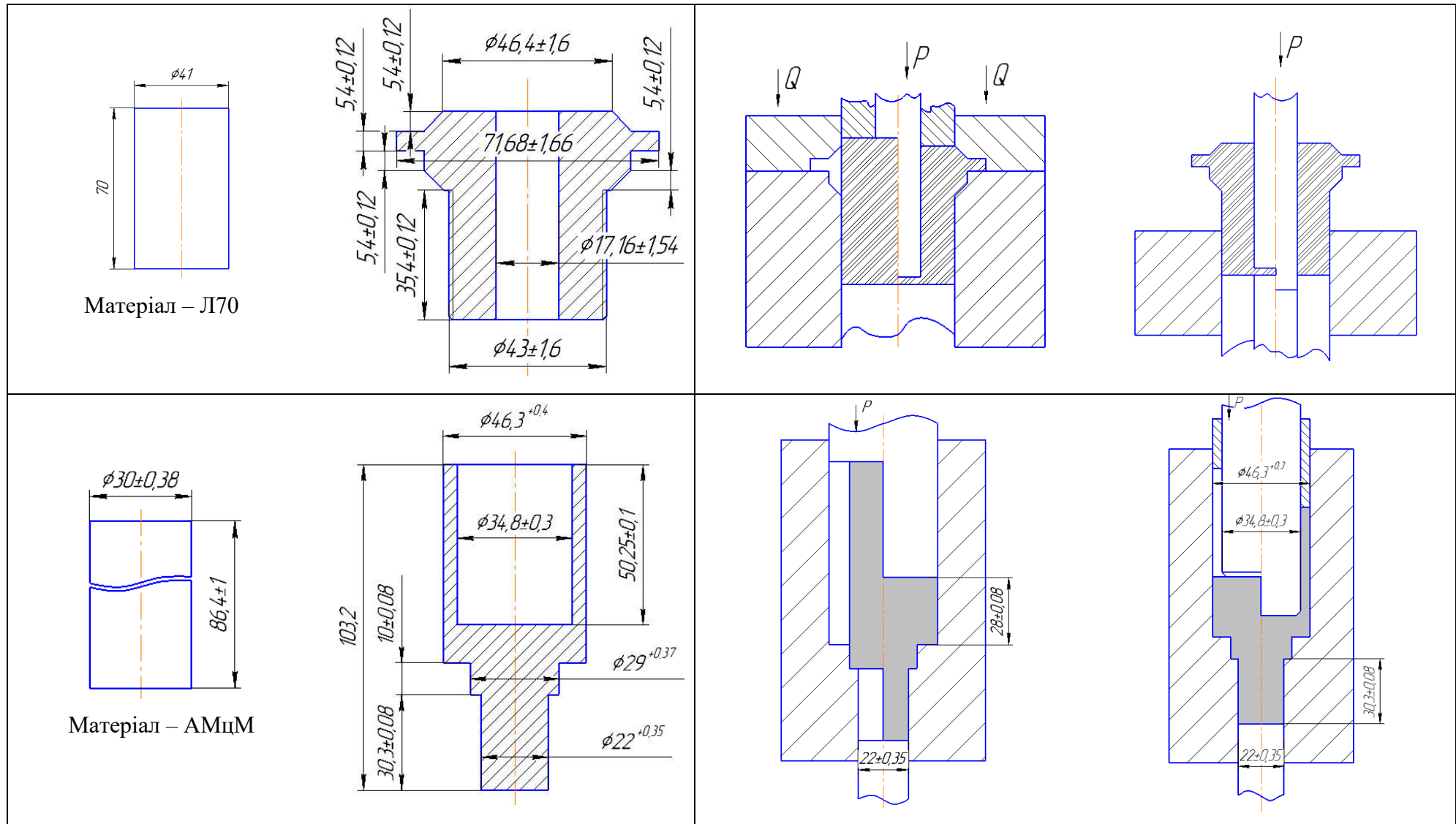
7.4 Розробка технологій об'ємного штампування

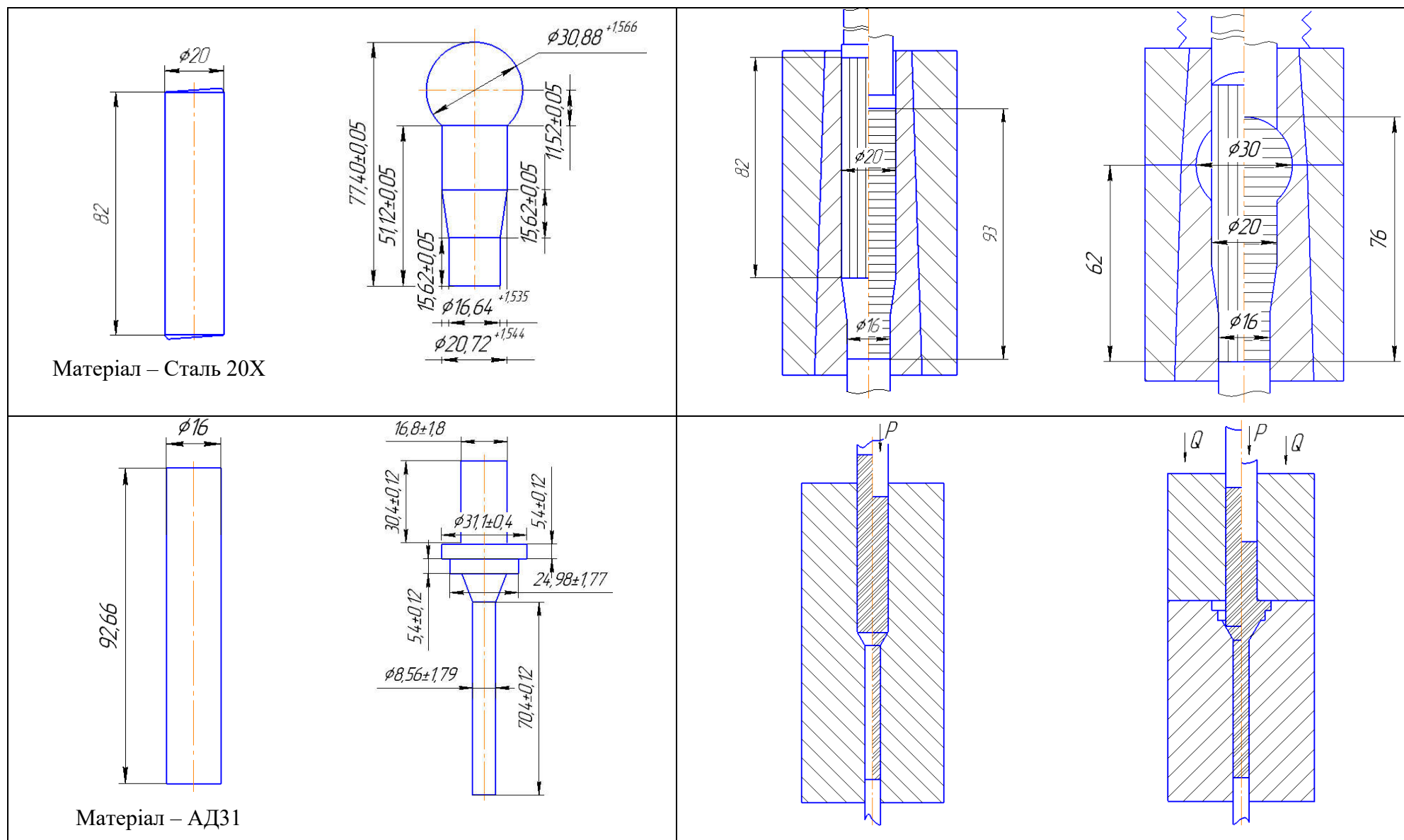
При виготовленні ряду поширених на виробництві деталей, в тому числі і відповідального призначення, застосовують методи механічної обробки, що не забезпечують необхідні властивості. Сучасною задачею є розширення технологічних можливостей та покращення якості виробів за рахунок забезпечення проробки металу і зниження нерівномірності деформованого стану. На основі застосування способів комбінованого об'ємного штампування (табл. 7.2) з'являється можливість підвищення якості і розширення номенклатури деталей за рахунок ускладнення форми деталей, скорочення числа переходів і підвищення якості обробки, реалізувати шляхи деформування матеріалу, що забезпечують мінімальні витрати ресурсу пластичності, знизити нерівномірність деформацій і сили деформування. Застосування таких комбінованих схем деформування у більшості випадків дозволяє підвищити точність і шорсткість поверхонь, знизити припуски і допуски, які не регламентовані стандартом і встановлюються за погодженням між постачальником і споживачем.

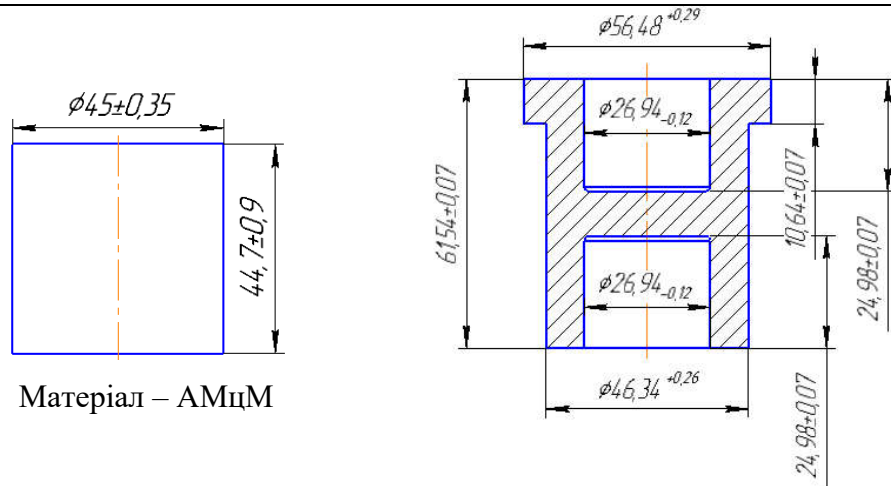
За результатами теоретичних і експериментальних досліджень процесів комбінованого, суміщеного, бокового видавлювання деталей з номенклатури підприємств розроблені методичні рекомендації, технології та штамп, що передані на освоєння на виробництво.

Таблиця 7.2 – Технологічні процеси комбінованого видавлювання

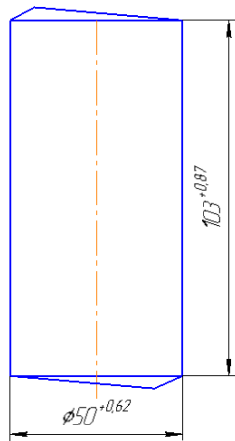
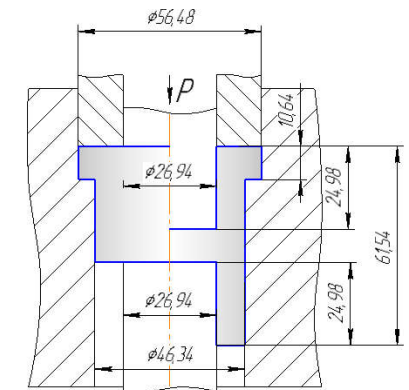
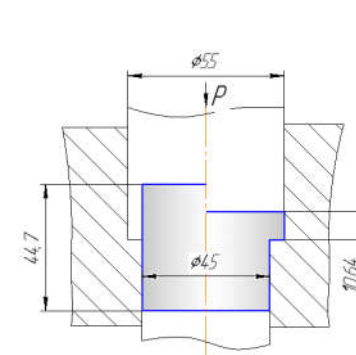
Ескіз заготовки (напівфабрикату, виробу)	Схема видавлювання
 Матеріал – АД1	
 Матеріал – М2	



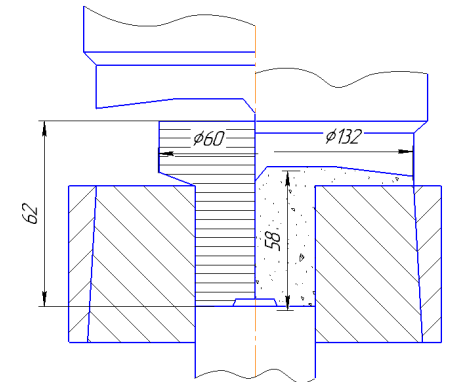
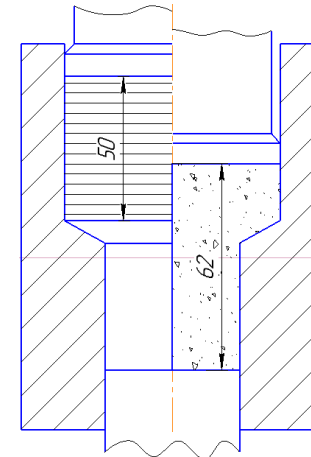
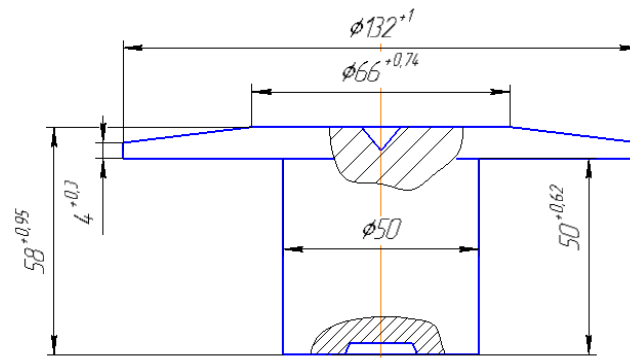


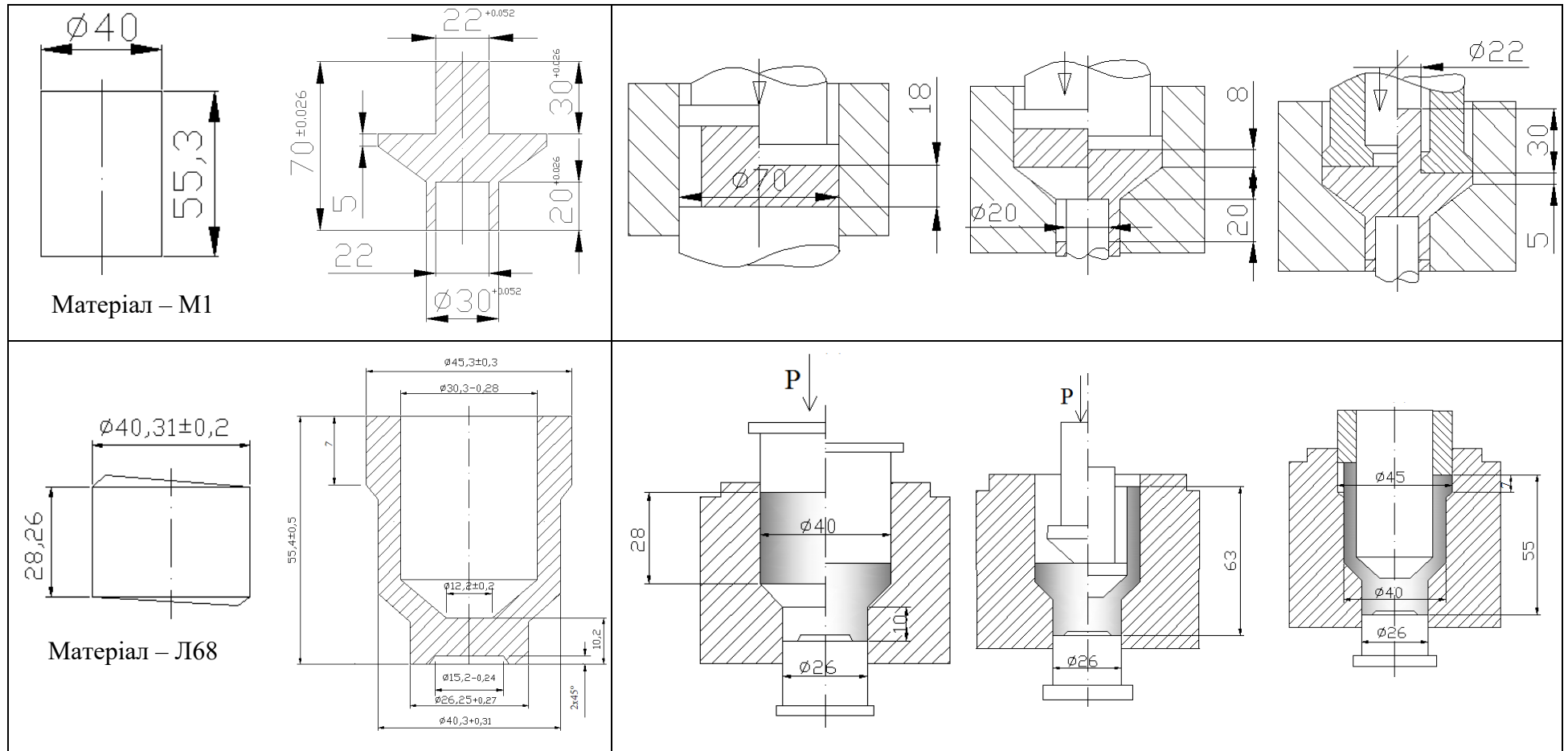


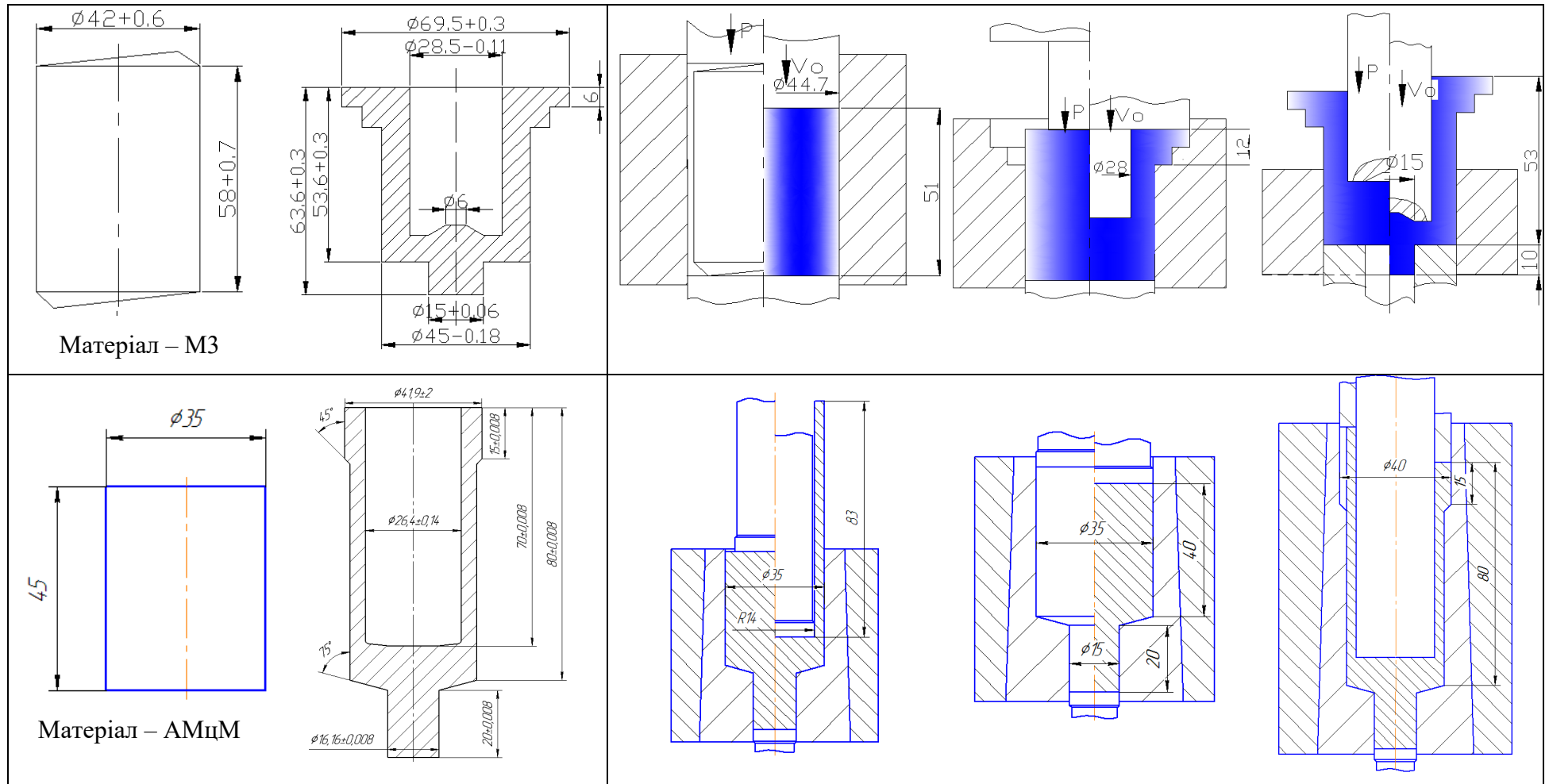
Матеріал – АМЦМ

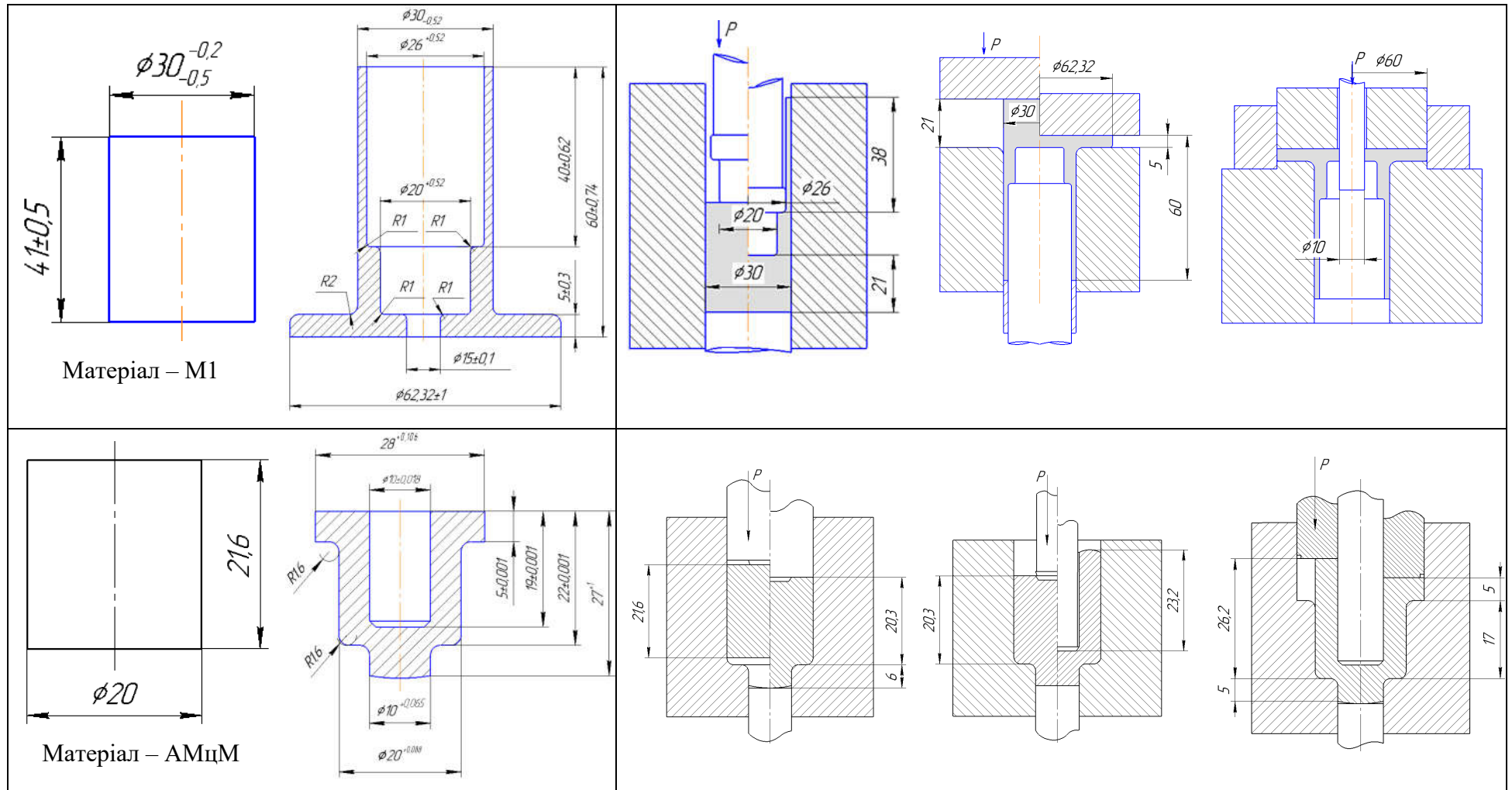


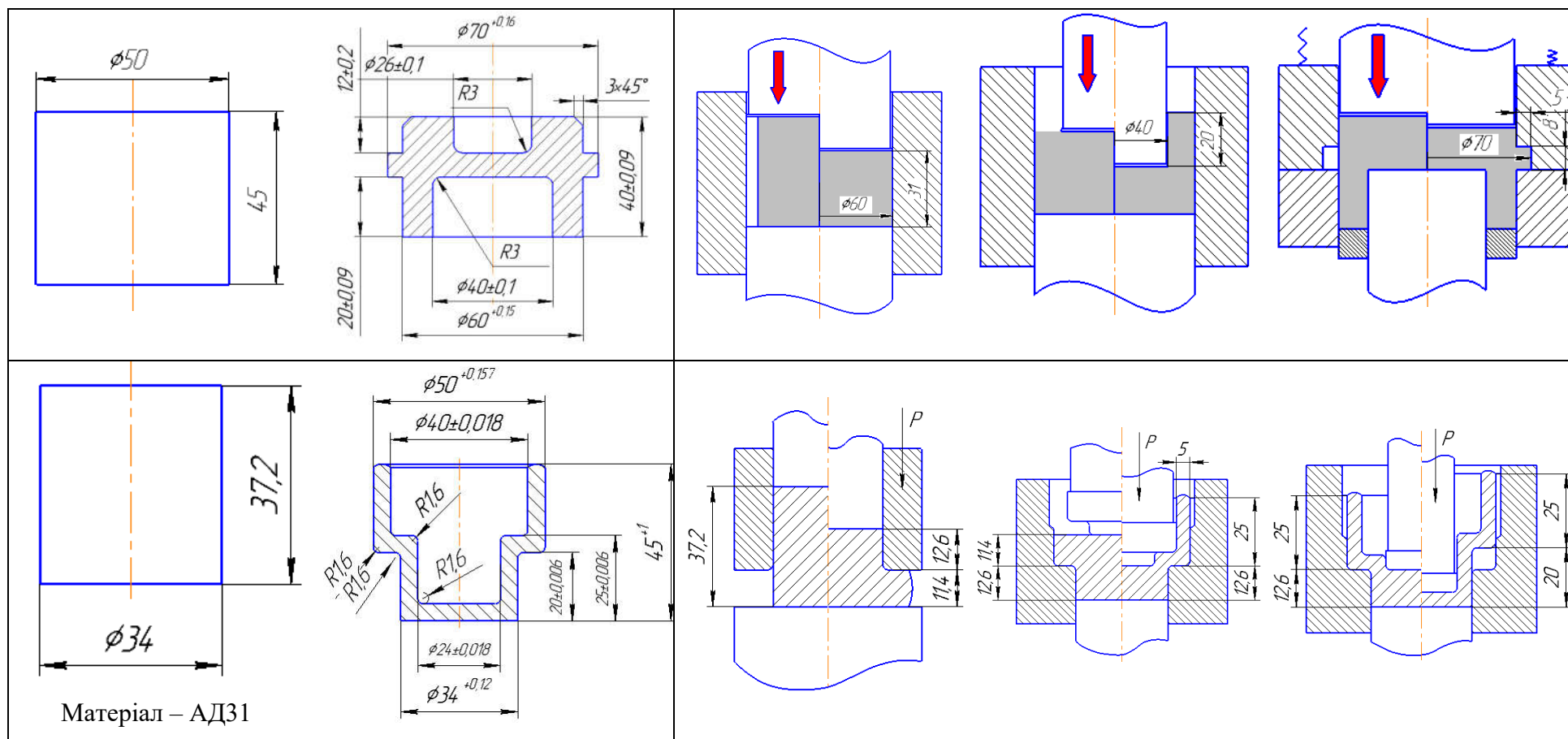
Матеріал – Сталь 10











Висновки:

1. Узагальнені особливості розробки технологічного процесу та методики проектування процесів штампування. Розглянуто та уточнено етапи проектування технологічних процесів об'ємного бездефектного штампування на основі регулювання кінематики процесів формоутворення та запропоновано технологічні рекомендації з проектування процесів осадки, бокового, комбінованого та суміщеного видавлювання.

2. На основі уточнених та отриманих закономірностей силового та деформаційного режимів запропонована методика проектування процесів точного об'ємного штампування в закритих матрицях. Надані технологічні рекомендації з проектування процесів закритого радіального видавлювання фасонних фланців, бокового видавлювання відростків різної конфігурації поперечного перерізу та різного розташування відносно осі заготовки, що забезпечують отримання деталей без утворення дефектів, дозволяють обрати необхідні співвідношення геометричних параметрів і рекомендувати силовий режим та навантаження, які будуть діяти на інструмент.

3. Запропоновано ряд типів штампового оснащення, що включають в себе використання зажимних пристроїв для усунення розкриття матриць. Розроблені ресурсозберігаючі технології і креслення штампів передані та впроваджені на ряді підприємств.

4. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано ряд способів, що розширюють технологічні можливості об'ємного штампування та дозволяють отримувати більш якісні вироби. Способи ТОШ захищені патентами України.

5. Отримані результати у вигляді розрахункових методик і проектних рекомендацій, а також дослідні установки для дослідження технологічних режимів процесів точного об'ємного деформування використовується в науково-дослідницькій практиці та навчальному процесі кафедри ОМТ ДДМА.

Результати досліджень відображені в опублікованих роботах [305-312].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів ТОШ на базі розвитку наукових основ, і удосконалення процесів деформування за рахунок регулювання кінематики формозмінення.

1. На підставі літературного аналізу встановлено проблеми і шляхи розвитку процесів точного об'ємного штампування. Визначено основні напрями удосконалення даної галузі обробки тиском, які полягають у створенні нових способів деформування, що базуються на регулюванні кінематики руху інструменту та течії металу заготовки, що дозволяють розширити номенклатуру отримуваних виробів та підвищення їх якості.

2. В процесах закритої осадки встановлено умови формозмінення заготовки, зміну силових характеристик та сил розкриття матриць. Результати досліджень показують, що для процесу осадки характерним є нерівномірне заповнення кутів матриці. Нижні кути матриці, що прилягають до нерухомого інструменту, заповнюються значно повільніше. Застосування компенсатора з оптимальним значенням висоти компенсатора до радіусу деталі $h_1/R_0 \leq 0,10$ дозволяє підвищити якість формоутворення заготовки. Дані рекомендації по вибору геометричних параметрів процесу та показано доцільність застосування фасонної заготовки. Доповненням традиційному способу є калібрування з застосуванням радіального видавлювання. Після формування відносно низького фланцю, за рахунок радіальної течії металу та рухомої півматриці з'являється можливість формувати відносно високі заготовки. Встановлено, що оптимальне значення кута скосу інструменту складає $\alpha = 20^\circ$, а рекомендована швидкість руху матриці $V_1/V=0,35$.

3. Для процесів радіального видавлювання порожнистих деталей, за якими можна отримувати фланці на різному рівні заготовки та різної фасонної

форми, встановлені особливості формоутворення та механізм утворення дефектів у вигляді утягнення та відхилення форми фланця. Основними фактором, що впливає на процес появи утягнення є відносна висота фланця $\bar{h}$ та кут скошу на матриці α . Встановлено, що при $\bar{h} \leq 0,8$ та $\alpha \leq 35^\circ$ утягнення не спостерігається. В якості рекомендацій по прогнозуванню дефектоутворення розроблені діаграми появи утягнення від відносного ходу деформуючого пуансона $\bar{S}$ від відносної висоти фланця $\bar{h}$ та кута інструменту α . Застосування фасок та заокруглень на інструменті збільшує силу розкриття матриць до 20%. На основі енергетичного методу балансу потужностей дана оцінка силових характеристик та особливостей формоутворення заготовки при радіальному видавлюванні з компенсатором, що розташований перпендикулярно до радіального напрямку течії металу.

4. Деформація з двосторонньою подачею при радіальному видавлюванні дозволяє отримувати досить великі фланці з рівномірним розподілом інтенсивності деформацій за перерізом. Рекомендовані ступені деформування для такого процесу $\epsilon_1 \approx 35\%$. Отримання точних бездефектних фланців можливе за рахунок використання операції підсадження, що реалізується тим же інструментом за рахунок рухомої півматриці. На основі проведених досліджень встановлені умови деформування заготовки з урахуванням операції підсадження фланцю.

5. Удосконалення закритого радіального видавлювання з метою зниження сил деформування та розкриття матриць можливе за рахунок додавання операції редукування, що дозволяє зменшити силу розкриття на величину, рівну силі редукування. Збільшення кута матриці в місці редукування з 15° до 45° дозволяє знизити силу деформування на 8..10%, а силу розкриття матриці – на 10..12%.

6. На основі енергетичного балансу потужностей та методу верхньої оцінки отримані аналітичні залежності для визначення сили деформування для схем бокового видавлювання відростків різної конфігурації з одно- та

двосторонньою подачами. Встановлено, що при формуванні відростків однієї форми односторонньою та двосторонньою подачами зниження сили при двосторонній подачі металу становить 15 – 20%. Скінченно-елементний аналіз процесу отримання бокового відростку типу «пера» дозволив встановити стадії формоутворення та особливості напружено-деформованого стану деталі. Встановлено, що інтенсивність деформацій в осередку деформування в середньому на 30% нижче при видавлюванні з заокругленням на матриці, ніж при видавлюванні з гострою перехідною кромкою; збільшення товщини «пера» сприяє зменшенню сили деформування. При порівнянні експериментальних та теоретичних даних відхилення теоретичних розрахунків не перевищувало 12%.

7. Удосконалення способів бокового видавлювання дозволило розширити номенклатуру отриманих виробів з відростками, що симетрично та несиметрично розташовані один відносно одного, відростками («перами») під кутом відносно до осі заготовки за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих схем деформування заготовки з кінематикою регулювання руху інструменту. На силовий режим процесу отримання відростків на різній висоті заготовки значно впливає кінематична схема деформування та зміщення осей відростків відносно один одного X (варіювання розміру X в межах від $(0...2)d$). Для отримання рівних за довжиною відростків рекомендовано застосовувати двосторонню подачу металу з дотриманням відношення швидкостей верхнього і нижнього пуансону $V_2/V_1=1$. При збільшенні параметра X , сила процесу зростає фактично лінійно до значення $X/2R_0 = 1,0$. Подальше збільшення значень до $X/2R_0 \geq 2,0$ значно впливає на напружено-деформований стан заготовки. В таких умовах в тілі заготовки з'являється зона інтенсивної деформації, що розташована в місці розвороту металу у відростки і може стати місцем відділення частини заготовки (відростка) від деталі.

8. Для процесу суміщеного радіального видавлювання деталей з фланцем встановлено особливості силового режиму з застосуванням енергетичного

методу балансу потужностей та методу верхньої оцінки. Методом скінченних елементів з залученням планування експерименту визначені аналітичні залежності для визначення силових характеристик та особливостей напружено-деформованого стану, що дало змогу визначити значення вичерпання ресурсу пластичності. Встановлено, що при досягненні логарифмічного ступеня деформації $\epsilon=0,70..0,85$ настає вичерпання ресурсу пластичності у фланцевій зоні деталі, що формується, радіальним видавлюванням. Встановлені умови дефектоутворення та рекомендації для їх усунення у вигляді діаграм. Набір математичних моделей дозволив встановити, що для бездефектного деформування за схемою суміщеного видавлювання слід дотримуватися співвідношень висоти фланцю до товщини стінки $h/t \leq 1,6$.

9. При ТОШ пустотілих деталей для усунення утягнення біля дна стакану рекомендовано виконувати горизонтальні або вертикальні технологічні бурти висотами X_i та Y_i відповідно. За результатами аналізу методом скінченних елементів побудовані діаграми з визначення геометричних параметрів для бездефектного формоутворення для процесів комбінованого та суміщеного видавлювання складнопрофільованих виробів. Усунення утягнення за рахунок горизонтального бурта відбувається при співвідношеннях розміру горизонтальної порожнини до товщини стінки $X_1/t = 0,2$ та розміру вертикальної порожнини до товщини дна $Y_1/L_1 \leq 2,5$; за рахунок вертикального бурта – при $Y_2/L_1 = 0,5$, $X_2/t \geq 1,0$.

10. Розроблено технологічні рекомендації і методики з проектування процесів видавлювання пустотілих та суцільних деталей на основі створеної бази розрахункових моделей. Впровадження розробок дозволило підвищити техніко-економічні показники процесів точного об'ємного штампування деталей. Запропоновано нові способи, які захищені трьома патентами. Методики і результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються в навчальному процесі і в науково-дослідних роботах академії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / [под ред. Е.И. Семенова и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. Т. 3. – 1987. – 384 с.
2. Овчинников А.Г. Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования / А.Г. Овчинников, В.А. Головин // В кн.: Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования. М.: МДНТП, - 1990. - С. 3-10.
3. Головин В.А. Расширение технологических возможностей и повышение эффективности процессов холодной и полугорячей объемной штамповки / В.А. Головин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1990. - № 7. - С. 14-17.
4. Сосенушкин Е.Н. Совершенствование технологической подготовки производства деталей холодной и полугорячей объемной штамповкой / Е.Н. Сосенушкин // Машиностроительное пр-во. Сер. Технология и оборудование кузнечно-штамповочного пр-ва: обзорная информация ВНИИТЭМР. Вып. 1. М.: - 1991. - 108 с.
5. Евстратов В.А. Состояние, направления развития и проблемы холодного и полугорячего выдавливания / В.А. Евстратов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - № 10. - С. 10-11.
6. Алиев И.С. Исследование процесса комбинированного поперечно-прямого выдавливания / И.С. Алиев, О.К. Савченко, А.Н. Рахметуллаев // Оптимизация металлосберегающих процессов при ОМД. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, - 1989. – С. 132-139.
7. Позднеев Б.М. Применение полугорячей объёмной штамповки (Из зарубежного опыта) / Б.М. Позднеев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – №7. – С. 2-4.
8. Ремпис М. Технологические процессы и автоматизированные комплексы для полугорячей штамповки фирмы Schuler (Германия) / М. Ремпис // М.: МДНТП, 1990. 30 с.
9. Холодная объемная штамповка: Справочник / [под ред. Г.А. Навроцкого]. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.

10. Артес А.Э. Разработка системы технологической подготовки группового производства деталей методами холодной объемной штамповки / А.Э. Артес // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - № 11. - С. 26-28.
11. Кузнецов А. В. Штамповка поковок выдавливанием в разъемных матрицах / А. В. Кузнецов, О. В. Протопопов, В. Т. Ключков // Кузнечно-штамповочное производство – 1980. – №11. – С. 2-6.
12. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов - Х.: Выща школа, - 1987. – 384 с.
13. Экономичные методы формообразования деталей / [под ред. К.Н. Богоявленского, В.В. Риса] // Л.: Лениздат, 1984. – 144 с.
14. Артес А.Э. Совершенствование процессов холодной объемной штамповки деталей из трубных заготовок / А.Э. Артес, Д.Г. Кобзианидзе // Кузнечно-штамповочное производство. - 1989. - № 10. - С. 7-8.
15. Алиев И.С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И.С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1986. - № 6. - С. 1-4.
16. Оприщенко Т.А. Повышение стойкости пуансонов для холодного выдавливания / Т.А. Оприщенко // Кузнечно-штамповочное производство – 2000. – № 4. – С. 23-25.
17. Артес А.Э. Групповое производство деталей холодной объемной штамповкой / А.Э. Артес // М.: Машиностроение, - 1991. - 192 с.
18. Евстифеев В.В. Классификация технологических процессов холодной объемной штамповки / В.В. Евстифеев, А.Э. Артес // Вопросы групповой технологии. М.: Машиностроение. - 1987. - 80 с.
19. Базык А.С. О классификации деталей, получаемых холодной объемной штамповкой / А.С. Базык, В.А. Головин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1973. - № 9. - С. 4-8.
20. Горячая штамповка стальных поковок в разъемных матрицах / А.В. Кузнецов, О.В. Протопопов, В.А. Блудов и др. // М.: НИИМАШ, 1968. 78 с.

21. Атрощенко А.П. Штамповка поковок сложной конфигурации в штампах с разъемными матрицами / А.П. Атрощенко, В.И. Федоров // Кузнечно-штамповочное производство – 1974. – №3. – С. 8-10.
22. Овчинников А. Г., Штамповка выдавливанием поковок с боковыми отростками и с фланцами / А. Г. Овчинников, О. Ф. Дрель, И.С. Поляков // Кузнечно-штамповочное производство – 1979, - № 4. – С. 10-13.
23. Евстратов В.А. Оптимизация формы головки пуансона для холодного выдавливания деталей типа стаканов / В.А. Евстратов, В.Н. Левченко, Ю.А. Плеснецов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 490-492.
24. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксон, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров; [под ред. Е.П. Унксона, А.Г. Овчинникова] // М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
25. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / Овчинников А.Г. // М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
26. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / Евстратов В.А. // Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.
27. Воронцов А.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование вытяжки по внутренней поверхности / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – №7. – С. 37-43.
28. Использование сверхпластичности в обработке металлов давлением / Г.Б. Строганов, И.И. Новиков, В.В. Бойцов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 108 с.
29. Тарасов А.Ф. Перспективы использования комбинированных методов обработки металлов давлением / А.Ф. Тарасов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 216-220.

30. Алгоритмизация выбора и расчёта штамповых компенсаторов при штамповке выдавливанием / М.И. Поксеваткин, А.А. Штильников, Г.А. Овчаров [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – №9. – С. 33-35.
31. Леванов А.Н. Технологические параметры процесса закрытой штамповки поковок с вытянутой осью в самораскрывающихся штампах / А.Н. Леванов, Д.И. Вичужанин // Известия вузов. Машиностроение. – 2000. – №5-6. – С. 101-111.
32. Овчинников А.Г. Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий с активными силами трения / А.Г. Овчинников, А.М. Дмитриев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. – №6. – С. 24-26.
33. Басалаев Э.П. Проблемы интенсификации процессов холодной обработки металлов давлением / Э.П. Басалаев, Д.Э. Басалаев // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – №9. – С. 20-23.
34. Алиев И.С. Интенсификация технологических процессов выдавливания полых деталей / И.С. Алиев, В.П. Ерёмин // Совершенствование процессов и машин ОМД: сборник научных трудов – Киев: УМК ВО, 1988. – С. 9-18.
35. Семёнов Е.И. К вопросу исследования обратного выдавливания цилиндрическим пуансоном с плоским торцом / Е.И. Семёнов, В.Е. Снимщиков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – №6. – С. 7-8.
36. Теоретические основыковки и горячей объёмной штамповки. / Е.М. Макушок, А.С. Матусевич, В.П. Северденко, В.М. Сегал // Минск: Наука и техника, - 1968 – 407 с.
37. Джонсон В. Механика процесса выдавливания металла. / В. Джонсон, Х. Кудо // М.: «Металлургия», - 1965. – 174с.
38. Алиев И.С. Поиск и классификация новых технологических способов выдавливания / И.С. Алиев // Сборник научных статей. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия. - 2000. – С. 207-212.

39. Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания / И.С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1990. - № 2. - С. 7 - 10.

40. Шофман Л.А. Основы расчета процессов штамповки и прессования. / Л.А. Шофман // М.: Машгиз, - 1961. – 339с.

41. Макушок Е.М. Об определении смещенных объемов в процессе объемной штамповки. / Е.М. Макушок, А.С. Матусевич // Пластическая обработка металлов давлением. – Минск: Наука и техника, - 1966, - С. 150-154.

42. Кондратенко В.Г. Исследование силовых параметров штамповки выдавливанием осесимметричных поковок в закрытых штампах / В.Г. Кондратенко, Ф.С. Абдуллаев, Л.С. Гаманкова // Изв. Вузов. Машиностроение, - 1979, - № 7, - С. 86 – 89

43. Тарновский И.Я. Исследование течения металла при осадке в подкладных кольцах при помощи вариационного метода / И.Я. Тарновский, О.А. Ганаго, Р.А. Вайсбург // Известия вузов. Черная металлургия. - 1960. - № 5. - С. 55 - 60.

44. Степанский Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Л.Г. Степанский // М.: Машиностроение, - 1979. – 215 с.

45. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. // М., Металлургиздат, - 1963. - 672 с.

46. Абдуллаев Ф.С. Разработка и исследование технологического процесса штамповки осесимметричных поковок в закрытых штампах выдавливанием в кольцевую полость / Ф.С. Абдуллаев // Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.:МВТУ им. Баумана, - 1979. - 16 с.

47. Овчинников А Г. Верхняя оценка деформирующей усилия при выдавливании изделий с боковыми отростками / А Г. Овчинников // «Машины и технологии ОМД». М.: Машиностроение, - 1973. - С. 181-186.

48. Жвик И.М. Усилие формоизменения при боковом выдавливании в щель / И М. Жвик, И.Б. Покрас// «Исследование процессов ОМД», Ижевск, изд. «Урмуртия», - 1969 - С. 36-40

49. Эдуардов М.С. Штамповка в закрытых штампах/ М. С. Эдуардов // М. Машиностроение, - 1971. - 230с
50. Барыкин В.И. Точная штамповка выдавливанием н плоские щели разъемных матриц / В. И. Барыкин, В. С. Нестеров // Сб. Общие вопросы технологии и конструирования. - 1977 - с 40-41.
51. Кондратенко В.Г. Технологические процессы изготовления поковок с фланцами на прессах для штамповки в разъемных матрицах / В.Г. Кондратенко, М. В. Блинов. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - №4. - С. 11-13.
52. Барков В.С. Силовые параметры штамповки выдавливанием в разъемных матрицах поковок с фланцем / В.С. Барков, Л.И. Подрабинник // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – №12. – С. 1–3.
53. Соловцов С. С. Изготовление стержневых деталей с фланцем поперечным выдавливанием / С. С. Соловцов, И. А. Быков // Технология автомобилестроения. - 1988. – М. - С. 6-9.
54. Simulation of the heading process / G. W. Vickers, A. Plumtree, R. Sowerby J. L. Duncan // J. Eng. Mater. Technol 97(2), - P. 126-135
55. Чудаков П. Д. Пластическое течение не упрочняющегося материала при выдавливании конических утолщений / П.Д. Чудаков, В.И. Гусинский // Прогрессивные технологические процессы ОМД. Вып.24.-ЭНИКМАШ.- М.:Машиностроение, - 1971. – С.69-78
56. Кузнецов Д.П. Напряженно-деформированное состояние заготовки при холодном поперечном выдавливании / Д.П. Кузнецов, Е.Т. Савушники // Кузнечно-штамповочное производство. - 1974. - №3. - С. 5-8.
57. Быков И. А. Исследование холодного поперечного выдавливания осесимметричных деталей / И. А. Быков // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: Мосстанкин, - 1980. - 19 с.
58. Баев Ю.Д. Штамп для объемной штамповки: А.с. 1821283 СССР, МКИ В21 J 13/02. / Ю.Д. Баев, Б.Г. Каплунов и А.А. Фельде (СССР). №4932160/27; Заявлено 26.04.91; Опубл. Открытия. Изобретения. - 1993. - №22.

59. Дриль О.Ф. Боковое выдавливание поковок звездочек с зубьями / О.Ф. Дриль, И.С. Поляков // Кузнечно-штамповочное производство. - 1979. - №12. - С. 6-8.

60. Момзиков Ю.Г. К расчету усилия раскрытия штампов с щелевыми компенсаторами / Ю.Г. Момзиков, О.А. Ганаго // Кузнечно-прессовое производство. – 1976. – №4. – С. 1–5.

61. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г. Я. Гун // М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

62. Матвеев С. А. Возможности конечно–элементного анализа при решении технологических задач обработки металлов давлением / С. А. Матвеев, В. С. Мамутов, К. М. Иванов // Металлообработка, - 2003. – № 1. – С. 23–28.

63. Овчинников А.Г. Штамповка прямым выдавливанием с раздачей / А.Г. Овчинников, А.В. Хабаров, Е.П. Добряков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №4. – С. 4-6.

64. Особенности механизма пластического деформирования в процессе прямого выдавливания с раздачей / А.В. Хабаров, А.Г. Овчинников, Ю.П. Либеров [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – №3. – С. 2-5.

65. Басовский Л.Е. Холодное обратное выдавливание цилиндрических стальных деталей / Л.Е. Басовский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – №6. – С. 17-19.

66. Алексеев В.П. Напряжённо-деформированное состояние материала при холодном гидромеханическом выдавливании полых заготовок / В.П. Алексеев, В.З. Спусканюк // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – №6. – С. 2-4.

67. Алексеев В.П. Исследование процесса выдавливания полых изделий / В.П. Алексеев, Я.Е. Бейгельзи, В.З. Спусканюк // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. – №2. – С. 153-157.

68. Ренне И.П. Технологические возможности процесса свободного

выдавливания (без матрицы) полых деталей / И.П. Ренне, А.И. Сумарокова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №6. – С. 25-26.

69. Оптимизация технологических процессов и конструкций штампов для холодного и полугорячего выдавливания / В.А. Евстратов, О.М. Иванов, В.И. Кузьменко и др. // М.:ВНИИТЭМР, - 1989. - 184 с.

70. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я.М. Охрименко // Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», - 1976. - 560 с.

71. Ильич В.Д. Полугорячее выдавливание / В.Д. Ильич, В.П. Мулин // М.: НИИМАШ, - 1971. – 72 с.

72. Geiger Rolf. Der Stofffluss beim kombinierten Napffliesspressen / Rolf Geiger// Berichte Inst. Umformtechnik. Univ. Stuttgart, - 1976. - N 36. - 196 p.

73. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. / А.Д. Томленов // М.: «Металлургия», - 1972. – 408с.

74. Niefer Werner. Einsatz der Massivumformung in der Automobilindustrie / Werner Niefer // Umformtechnik 26 (1992) 6, - P. 393-395.

75. Аксенов Л.Б. Системное проектирование процессов штамповки. / Л.Б. Аксенов // Л.: Машиностроение. - 1990. – 240 с.

76. Чапеля Ю.А. Методы поиска новых изобретательских идей. / Ю.А. Чапеля // Л.:Машиностроение. Ленинград. Отд-ние, - 1990. – 96 с.

77. Групповые технологические процессы полугорячей объемной штамповки деталей гидроаппаратуры / Б.М. Позднеев, Е.Н. Сосенушкин, Е.С. Серов, В.Г. Горючев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. - № 12. - С. 12 - 14.

78. Теоретичні основи обробки металів тиском / Б.М. Ілюкович, А.П. Огурцов, М.Є. Нехаєв, С.В. Єршов - : Монографія: У 2 т. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», - 2002. – Т.2. – 485 с.

79. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников [и др.]. Под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова // М. : Машиностроение, 1992. – 720 с.

80. Дорошко В.И. Автоматизированное проектирование технологии штамповки полых деталей / В.И. Дорошко, Е.Ю. Коваленко, В.М. Гришин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1993.- № 5-6.- С.2-4.
81. Matthias Hänsel. Near-Net-Shape-Umformung / Hänsel Matthias, Rolf Geiger // Umformtechnik 29 (1995) 6, - P. 218-224.
82. Данченко В. М. Теорія процесів обробки металів тиском / В. М. Данченко, В. О. Гринкевич, О. М. Головки // Дніпропетровськ : Пороги, 2008. – 370 с.
83. Оленин Л.Д. Расчет технологических переходов и конструирование инструмента для холодного комбинированного выдавливания / Л.Д. Оленин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. - №2. – С. 8-12.
84. Оленин Л.Д. К расчету технологических переходов при холодной двусторонней прошивке в принудительно перемещаемом контейнере. / Л.Д. Оленин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. - №2. – С. 8-12.
85. Оленин Л.Д. Интенсивная технология холодной объемной штамповки / Л.Д. Оленин // Автомобильная промышленность. - 1996. - №9. - С.35-37.
86. Оленин Л.Д. Анализ комбинированного выдавливания через три канала в режиме управления течением (квазистационарная стадия) / Л.Д. Оленин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. - № 2. - С.25-29.
87. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф. В. Гречников, А. М. Дмитриев, В. Д. Кухарь [и др.] // М. : Машиностроение, 1985. – 184 с.
88. Алиев И.С., Методика анализа процессов выдавливания с несколькими степенями свободы истечения. / И.С. Алиев, В.М. Гридасов // Сборник научных статей. Вып. 3. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия. - 1996. – С. 40-50.

89. Алиев И.С. Классификация и анализ расчетных схем процессов комбинированного выдавливания. / И.С. Алиев, В.М. Гридасов // Донбасская государственная машиностроительная академия. – Краматорск, - 1997. –12 с. – Рук. – Деп. в УкрИНТЭИ 23.01.97, №80-Ук97.

90. Гридасов В.М. Совершенствование ресурсосберегающих процессов штамповки полых деталей с фланцем на базе использования технологических способов комбинированного выдавливания / В.М. Гридасов - : Дис. канд. техн. наук: 05.03.05. – Краматорск, - 1999. – 214 с.

91. Алиев И.С. Методика анализа процессов точной объемной штамповки с помощью модульных полей скоростей / И.С. Алиев // Разработка и исследование высоко-эффективных технологических процессов, оснастки и оборудования. Обработка металлов давлением. Тематический сборник научных трудов. – Киев УМК ВО, - 1990, - С. 7-17.

92. Алиев И.С. Моделирование процессов комбинированного выдавливания / И.С. Алиев, Е.М. Солодун, К. Крюгер // Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. - Тульский гос. унив-т. Тула, - 2000, - С.21-27.

93. Комбинированное выдавливание деталей типа ступенчатой втулки инструментом со скошенными кромками / А.К. Евдокимов, Е.В. Юдахин, М.М. Копченкова, И.В. Иванова // Машины и процессы обработки металлов давлением. Тула: ТПИ. - 1988. - С. 67-73.

94. Игнатенко В. Н. Применение холодной объемной штамповки в заготовительном производстве / В. Н. Игнатенко // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2008.– № 1(19). – С. 168–170.

95. А.с. 745587 СССР, В 21 J 5/08. Устройство для утолщения концов труб / А.А. Родионов, И.В. Ганжов (СССР). – №2602119/25-27; Заявлено 11.04.78; Открытия. Изобретения. - 1980, - № 25.

96. А.с. 1402403 СССР, В 21 J 5/08. Способ получения цилиндрического утолщения на трубчатой заготовке и устройство для его осуществления / А.Ю. Аверкиев, Ю.А. Алюшин, С.А. Шульга (СССР). – №

3929858/31-27; Заявлено 15.06.88; Открытия. Изобретения. - 1988, - № 22.

97. Дмитриев А.М. Влияние упругой деформации матрицы на процесс выдавливания полых цилиндрических изделий. / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов // Справ. Инж. ж. - 2002. - №5. - С. 6-11.

98. Воронцов А.Л. Анализ напряженного и кинематического состояний сплошной и трубной заготовок при радиальном выдавливании / А.Л. Воронцов // Вестник машиностроения – 1998. - №3. - С. 33-35.

99. Воронцов А.Л. Деформированное состояние заготовки при радиальном выдавливании / А.Л. Воронцов // Вестник машиностроения – 1999. - №10. – С. 36-40.

100. Алиев И.С. Определение силовых параметров при радиальном выдавливании / И.С. Алиев // Обработка металлов давлением. - Ростов н/Д, - 1983. - С. 93-100.

101. Савченко О.К. Проектирование штампов с разъемными матрицами / О.К. Савченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. - Краматорськ: ДДМА, - 1998. – С. 407-410.

102. Пасько А.Н. Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок: монография. / А.Н. Пасько // Тула: Изд-во ТулГУ, - 2004. – 252 с.

103. Кухарь В.Д. Формирование утолщений на стенках трубчатых заготовок / В.Д. Кухарь, А.А. Харитонов, Л.П. Бурак // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением: Межвуз. сб. научн. тр. Тула: ТулГУ, - 2002. – С. 172–177.

104. Алиев И.С. К вопросу изучения контактного пластического трения / И.С. Алиев, К. Крюгер // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, - 2002. – С. 112-120.

105. Ас. 275691 СССР, М. Кл В 21) 5/12. Способы изготовления изделий с боковыми выступами / И.С Алиев, И А. Грачев, Ф.Э. Лзадов и П.А. Зиновьев (СССР) - №1063520, заявл 04 11.88; опубл. 30.10.91. Бюл. №40.

106. Ас. 707671 СССР, М Кл. В21к 1/74. Способы получения деталей с отростками / Л.М. Бсдностик, Л.Л. Ластовская, В.Н. Шеринов. А.В. Караваев и Н.И. Сотников (СССР).- №3948758/25-27; заявл. 03. 09.85; опубл. 15.06.88. Бюл. №22 - 5с.

107. А.с. 707671 СССР, М Кл . В21к 23/00. Способы получения изделий с боковыми наружными выступами / А. И. Щепакин, М.А. Бородин. Н.Н. Юдин, Н.И. Касатов, К.А. Кирсанов, Г.А Шабалин и А.Б. Цамалашвили (СССР).-№2501280/25-27; заявл. 30. 06.77; опубл. 25.08 79. Бюл. №31,-3с.

108. Can Yilmaz. A study of lateral extrusion of gear like elements and splines / Yilmaz Can, Tahir Altınbalık, H. Erol Akata // Journal of Materials Processing Technology 166 (2005) - s. 128–134.

109. Алиев И.С. Исследование процесса выдавливания деталей с утолщениями в разъемной матрице / И.С. Алиев, Ф.Э. Азадов, О.К. Савченко // Известия вузов. Черная металлургия. - 1990. - № 4. - С. 42 – 44.

110. Проектирование процессов выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, А. И. Лобанов, Р. С. Борисов, И. Г. Савчинский // Известия Тульского государственного университета. Серия «Механика деформируемого твердого тела и ОМД». – Тула : ТулГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 132–139.

111. Алиев И.С. Методика проектирования технологических процессов точной объемной штамповки выдавливанием / И.С. Алиев, В.Г. Бойко, О.К. Савченко // Сб. научн. Статей. Вып. 2. - Краматорск: ДГМА. - 1994. - С. 109-116.

112. Савченко О.К. Силовой режим процесса поперечного выдавливания и оптимизация формы инструмента / О.К. Савченко, Ф.Э. Азадов, С.Л. Черняева // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Тематич. сб. научн. тр. – Краматорск, ДГМА, - 1988. – С. 21-28.

113. Алиева Л.И. Прогнозирование отклонений формы деталей при холодном выдавливании / Л.И. Алиева, Ю.И. Гуменюк, Д.В. Усманов //

Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – Том 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. – С. 515–520.

114. Алиев И.С. Методика моделирования силового режима процессов выдавливания в разъемных матрицах / И.С. Алиев // Металлургическая и горнорудная промышленность. - №8-9. – 2002. – С. 458-462.

115. Каржан В.В. Прогрессивная технология и оборудование для обработки давлением / В.В. Каржан // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - №8, - С. 10-13.

116.Новиков В.М. Внедрение металлосберегающей технологии – важнейший резерв экономии металла / В.М. Новиков, И.З. Мансуров, Ю.С. Радюченко // Кузнечно-штамповочное производство. - 1982. - №5 - С. 2-5.

117. Методика расчета и проектирования процессов выдавливания в разъемных матрицах / Алиева Л.И., Борисов Р.С., Лобанов А.И., Савчинский И.Г.// V International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»:Series: Monographs. – Nr 56. – Czestochowa, 2004. – С. 383 – 391.

118. Евдокимов А. К. Комбинированное выдавливание с противодавлением / А. К. Евдокимов, К. А. Антонкина // Кузнечно-штамповочное производство. - 2012. - №12 С. 6-12.

119. Добров И. В Разработка нового визиопластичного метода исследования процессов ОМД на примере осадки симметричной заготовки, И. В. Добров, А. В. Семичев, В. Н. Рубан, А. В. Коптиль // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, - 2017. – № 1 (44). – С. 44–48.

120. Applications of numerical simulation to the analysis of bulk-forming processes case studies / G. Liua, L.B. Zhanga, X.L. Hua, Z.R. Wanga, R.W. Wanga, S.D. Huangb, Q.B. Tangb // Journal of Materials Processing Technology 150 (2004) – s. 56–61.

121. Park K.S. Process analysis of multistage forging by using finite element method / K.S. Park, C. J. Van Tyne, Y.H. Moon // Journal of Materials Processing Technology 187-188 (2007) - P. 586–590.

122. Design solution evaluation for metal forming product development / M. W. Fu, M. S. Yong, K. K. Tong, A. Danno // *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 38: - P. 249–257.

123. Воронцов А. Л. Осадка заготовки с разным расширением на верхнем и нижнем торцах / А.Л. Воронцов // *Кузнечно-штамповочное производство*. - 2007. - №4 - С. 3-12.

124. Лисунец Н. Л. Объемная штамповка алюминиевых заготовок / Н.Л. Лисунец // М.: Машиностроение, - 2009.

125. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковок из алюминиевого сплава АК6 / И. Л. Константинов, И. Ю. Губанов, И. О. Астрашабов, С. Б. Сидельников, Н. А. Белан // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2015 – № 1 - С. 45-48.

126. Семёнова Л. П. Моделирование процесса высадки головных частей стержневых изделий / Л. П. Семёнова, О. А. Ткач, А. Н. Пасько // *Кузнечно-штамповочное производство*. - 2012. - №12 С. 21-28.

127. Третьюхин В. В. Закрытая штамповка поковок методом комбинированного выдавливания / В. В. Третьюхин // *Кузнечно-штамповочное производство*. - 2008. - №8 - С. 16-19.

128. Третьюхин В. В. Закрытая штамповка методом высадки с выдавливанием / В. В. Третьюхин // *Кузнечно-штамповочное производство*. - 2010. - №6 - С. 43-45.

129. Leea D.J. New processes to prevent a flow defect in the combined forward backward cold extrusion of a piston-pin // D.J. Leea, D.J. Kimb, B.M. Kimc // *Journal of Materials Processing Technology* 139 (2003) - P. 422–427.

130. Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis / Y.K. Lee, S.R. Lee, C.H. Lee, D.Y. Yang // *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001) - s. 59-63.

131. Zhang Da-wei. Analysis of deformation characteristic in multi-way loading forming process of aluminum alloy cross valve based on finite element model / Da-wei Zhang, Sheng-dun Zhao, He Yang // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 24(2014) - P. 199_207.

132. Kima Young Suk. Rigid-plastic finite element simulation for process design of impeller hub forming / Young Suk Kima, Hyun Sung Sonb, Chan II Kimb // Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) - P. 729–734.

133. Ryu C.H. Finite element simulation of the cold forging process having a floating die / C.H. Ryu, M.S. Joun // Journal of Materials Processing Technology 112 (2001) - P. 121-126

134. Shan Debin Three-dimensional rigid-plastic finite-element analysis of the isothermal precision forging of a cylindrical housing / Debin Shan, Xu Yi, Lu Yan // Journal of Materials Processing Technology 102 (2000) - P. 188-192

135. Petrov P. Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618 / P. Petrov, V. Perfilov, S. Stebunov // Journal of Materials Processing Technology 177 (2006) - P. 218-223

136. Ma Yanling. Forming of hollow gear-shafts with pressure-assisted injection forging (PAIF) / Yanling Ma, Yi Qin, Raj Balendra // Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) - P. 294–301.

137. Cai J. Alternative die designs in net-shape forging of gears / J. Cai, T.A. Dean, Z.M. Hu // Journal of Materials Processing Technology 150 (2004) - P. 48-55

138. Study of the Flow Behavior and Defect Formation in Forming of Axisymmetrically Flanged and Multi-Scaled Parts / Jilai Wang, Mingwang Fu1, Junxi Yu1, Xing Wang, Wenbin Yang // International journal of precision engineering and manufacturing Vol. 17, No. 10, pp. 1341-1349.

139. Бильчук М. В. Разработка и исследование закрытой объемной штамповки поковок сложной формы / М. В. Бильчук // Кузнечно-штамповочное производство. - 2010. - №6 С. 9-13.

140. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л.А. Шофман // М.: Машиностроение, - 1964 .- 375 с.

141. Zhang Yanqiu. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging/ Yanqiu Zhang, Debin Shan, Fuchang Xu// Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) – P. 745 – 753

142. Исследование комбинированного процесса выдавливания полых полусферических деталей с фланцем / В. А. Рагулин, А. В. Молодов, Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев, Е. В. Крутина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, - 2011. – № 2 (27). – С. 89–92.

143. Филиппов Ю. К. Влияние упрочнения на пластичность металла при обработке поверхностным пластическим деформированием / Ю. К. Филиппов, Н. Н. Беззубов, Т. С. Басюк // Интенсивность производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием. - Тольятти, - 1989.

144. Миропольский Ю. А. Особенности технологии холодной объемной штамповки на многопозиционных автоматах / Ю. А. Миропольский, Ю. К. Филиппов, Н. Д. Павлов // Машины и автоматизация кузнечноштамповочного производства. - М. : ВЗМИ, - 1988. - С. 159-165.

145. А. с. СССР № 1648598. Способ изготовления полых деталей / Ю. К. Филиппов и др. Опубл. 15.01.1991.

146. Разработка технологического процесса холодного выдавливания деталей типа эксцентрик / А. В. Молодов, Н. Ю. Калпина, Ю. К. Филиппов, А. Г. Зайцев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, - 2013. – № 2 (35). – С. 114–117.

147. Разработка технологического процесса холодной объемной штамповки детали «корпус заряда» / Ю. К. Филиппов, А. В. Рагулин, Е. В. Крутина, А. В. Молодов, И. А. Тишкин, В. И. Игнатенко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, - 2011. – № 3 (28). – С. 97–101.

148. Kim D.J. Application of neural network and FEM for metal forming processes / D.J. Kim, B.M. Kim // International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) - P. 911–925.

149. Songa J.H. Process design for closed-die forging of bevel gear by finite element analyses / J.H. Songa, Y.T. Imb // Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) - P. 1–7.

150. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів / В.Л. Калюжний., О.В. Калюжний, В.М. Горностай та ін. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, Краматорск, ДГМА, - 2009, - № 1(20). - С. 67-75.

151. Калюжний В.Л. Розрахунковий аналіз методом скінчених елементів процесу холодного видавлювання з різним ступенем деформації порожнистих виробів із сталі 20 з прикладанням розтягую чого зусилля до заготовки / В.Л. Калюжний, С.Ф. Сабол, В.В. Піманов // Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение, Київ, - 2009, - № 56. - С. 300-305.

152. Використання холодного штампування для отримання порожнистого виробу з необхідними властивостями здеформованого металу / В.Л. Калюжний, А.С. Цибенко, Ю.О.Чувільов, Є. О. Чувільов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2015. – № 1(73). – С. 124–130.

153. The forming characteristics of radial-forward extrusion / Y.S. Lee, S.K. Hwang, Y.S. Chang, B.B. Hwang. // Journal of Materials Processing Technology 113 (2001) 136-40.

154. Евстратов В.А. Разработка и экспериментальное исследование технологического процесса выдавливания деталей типа втулок с двумя фланцами и ступицами / В.А. Евстратов, И.В. Куликов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - №10. - С. 17-18.

155. Литвинов А.М. Изготовление звездочек цепных передач методом чистового пластического деформирования в штампах с разъемными матрицами / А.М. Литвинов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1984. - №3. - С. 9.

156. Басюк С.Т. Изготовление поковок сложных форм в штампах с разъемными матрицами / С.Т. Басюк // Кузнечно-штамповочное производство. - 1973. - №7. - С. 8-11.

157. Иосифов В.Н. Внедрение процессов безоблойной штамповки на Минском автомобильном заводе / В.Н. Иосифов, Л.А. Войналович, И.Н. Терейей // Кузнечно-штамповочное производство. - 1979. - №7. - С. 7-8.

158. Штамп для горячей штамповки точных заготовок в разъемных матрицах / Б.Г. Каплунов, Ю.Д. Баев, А.А. Фельде, Б.Д. Ялов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1997. - №7, - С. 30-31.

159. Смуров А.М. Из опыта разработки, освоения и внедрения штампов с разъемной матрицей для металлоэкономной штамповки стальных поковок / А.М. Смуров // Кузнечно-штамповочное производство. - 1992. - №6 - С.5-8.

160. Безоблойная штамповка латунных отрезковых поковок в разъемных матрицах / А.В. Кузнецов, В.Т.Клочков, В.П. Ашурков, С.А. Сафарян, В.П. Салов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1983. - №12. - С.2-3.

161. Воллак А. Горячая штамповка в разъемных матрицах на прессах двойного действия / А. Воллак // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - №3. - С. 3-5.

162. Роганов Л.Л. Перспективные конструктивные схемы машин для разделения проката с клиношарнирным механизмом / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Сб. науч. раб. – Краматорск – Славянск, - 2000. – С. 437-439.

163. Сафонов А.В. Винтовые прессы двойного действия для малоотходной штамповки в штампах с разъемными матрицами / А.В. Сафонов, И.З. Мансуров // Кузнечно-штамповочное производство. - 1986. - №5 - С. 35-37.

164. Атрощенко А.П. Штамповка сложных поковок из специальных сталей и сплавов / А.П. Атрощенко, Р.П. Колесников // Кузнечно-штамповочное производство. - 1975. - №10. - С. 13-15.

165. А.С. 662223 СССР, МКИ В21 J5/00. Способ выдавливания металлических изделий /И.С.Алиев (СССР). - № 2016402/25-27. Заявлено 12.04.74; Открытия. Изобретения. - 1979, - №18.

166. Кадыркаев А.А. Гидравлический рычаг для зажима полуматриц / А.А. Кадыркаев, Г.Я. Злотников // Кузнечно-штамповочное производство. - 1979. - №5. - С. 38.

167. А.с. 1489915 СССР, МКИ В21 J 13/02. Штамп для радиального выдавливания / Ю.Д. Баев, В.С. Чесноков, В.В. Потапов, Н.Н. Акимова и О.В. Усачев (СССР). - №4332272/30-27; Заявлено 23.11.87; Открытия. Изобретения. - 1989. - №24.

168. А.с. 550214 СССР, МКИ В21 J 13/02. Штамп для выдавливания / И.С. Алиев (СССР). - №2188379/27. Заявлено 10.11.75; Открытия. Изобретения. - 1977. - №10.

169. Шулаков А.М. Штамповка точных поковок в штампах с разъемными матрицами / А.М. Шулаков, О.С. Кошелев, В.С. Нестеров // Кузнечно-штамповочное производство. - 1980. - №5 - С. 38-39.

170. А.с. 1266633 СССР, МКИ В21 J 13/02. Штамп для безоблойной штамповки / А.М. Шулаков и В.В. Жулин (СССР). - №3761874/25-27; Заявлено 28.06.84; Открытия. Изобретения. - 1986. - №40.

171. Разработка процессов комбинированного выдавливания в разъемных матрицах / И.С. Алиев, Е.М. Солодун, А.А. Носаков, А.И. Лобанов // Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej: Seria Metalurgia, nr 25. - Czestohowa: Wipmifs, - 2002. - С. 159-162.

172. Алиев И.С. Обеспечение стойкости штамповой оснастки / И.С. Алиев, А.И. Лобанов, И.Г. Савчинский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Краматорськ - Хмельницький: ДДМА, - 2002. - С. 331-335.

173. Кондо К. Повышение точности поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой / К. Кондо // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2000. - №5. - С. 28-32.

174. Петухов В.В. Высокочастотная магнетронная распылительная система на базе установки УВН-75Р-3 / В.В. Петухов, Д.Н. Терпий // ВАНТ. - Сер. «Вакуум, чистые металлы, сверхпроводники» вып. 4(5), 5(6). - Харьков. - 1998. - С. 57-58.

175. Андриевский Р. А. Высокоразрешающая просвечивающая и сканирующая микроскопия наноструктурных боронитридных пленок /

Р.А. Андриевский, Г.В. Калинин, Д.В. Штанский // Физика твердого тела. - 2000. - Т. 42, вып. 4, - С. 741-746.

176. Григорьев С.Н. Виды износостойких покрытий и методы их нанесения на штампы для холодного деформирования / С.Н. Григорьев, А.А. Шеин // Кузнечно-штамповочное производство. - 2004. - №12 - С. 30-34.

177. Зенкин Н.А. Выбор метода упрочнения поверхности режущих элементов штампов / Н.А. Зенкин // Кузнечно-штамповочное производство. - 2001. - №10 - С. 30-33.

178. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров // М.: Металлургия, - 1986. - 688 с.

179. Алюшин Ю.А. Энергетические основы механики / Ю.А. Алюшин // Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, - 1999. – 192 с.

180. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / Под ред. д.т.н., проф. А.В. Лясникова // СПб.: Внешторгиздат – Петербург, - 1995. – 527 с.

181. Яковченко А.В. Аналитические методы моделирования нестационарных процессов обработки металлов давлением / А.В. Яковченко // Донецк: ДонНИИЧермет, - 1997. – 177 с.

182. Чудаков П.Д. Нестационарное пластическое течение упрочняющегося материала / П.Д. Чудаков // Исследование в области пластичности и ОМД. - Тула: ТПИ, - 1974. - С. 34-41.

183. Чучин О.В. Кинематически возможные поля скоростей при выдавливании в разъемных матрицах / О.В. Чучин, Р.С. Борисов, В.Г. Бойко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, - 2000. – С. 52-56.

184. Пат. 108568 Україна, МПК В 21 J 1/04. Спосіб інтенсивного пластичного деформування заготовок / Л. І. Алієва, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201513087; заявл. 30.12.2015; опубл. 25.07.2016. – Бюл. № 14.

185. Пат. 107950 Україна, МПК В 21 J 5/12, В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення порожнистих виробів типу стакана / Л. І. Алієва, Х.В.

Гончарук, О.В. Шкира, Р.І. Сивак; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201513100; заявл. 30.12.15; опубл. 24.06.16, Бюл. № 12.

186. Алиева Л. И. Выбор кинематических модулей для определения силовых параметров радиального выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник ДДМА: зб. наук. праць. Краматорськ, - 2006. – № 3 (5). – С. 108–113.

187. Алиев И.С. Метод кинематических модулей для анализа процессов точной объемной штамповки / И.С. Алиев, А.А. Носаков, К.Д. Махмудов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, - 2001. - С. 142-146.

188. Вайсбурд Р.А. Исследование деформаций при осадке дисков на плите с отверстием / Р.А. Вайсбурд, Д.С. Жиров // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988 - №5. - С. 12-15.

189. Дмитриев А.М. Прогнозирование утяжин при штамповке / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов // Справ. Инж. ж. - 2004. - №11. - С. 29-32.

190. Алиев И.С. Прогнозирование дефектообразования при выдавливании / И.С. Алиев, К. Крюгер // Теория, технология оборудования и автоматизация обработки металлов давлением, резанием: Сб. науч. тр. Вып. 1. – Тула: ТулГУ, 1999. – С. 87-90.

191. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич // М.: Мир, - 1975. - 541 с.

192. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич // Днепропетровск: Системные технологии, - 2005. – 448с.

193. Иванов К.М. Метод конечных элементов в технологических задачах / К.М. Иванов, В.С. Шевченко, Э.Е. Юргенсон // Учебн. пособие – СПб.: Изд-во ПИМаш, - 2000. - 224 с.

194. Биба Н.В. Применение программы QFORM 2D/3D для разработки

малоотходной технологии штамповки/ Н.В. Биба, С.А. Стебунов // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. - Том 5. Пластична деформація металів. - Дніпропетровськ: Системні технології, - 2002. – С. 221-226.

195. Петров П.А. Моделирование выдавливания осесимметричной детали с помощью системы QFORM 2D/3D / П.А. Петров, Д.А. Гневашев, Ю.К. Филиппов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – №12. – С. 26-27.

196. Алиев И.С. Анализ процессов комбинированного выдавливания стержневых деталей / И.С. Алиев, Е.М. Солодун, К. Крюгер, Ф. Йеше // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-цтво СУДУ, - 2000. – С. 8-13.

197. Гуменюк Ю.И. Применение перестроения сетки при конечно-элементном моделировании процесса холодного продольного выдавливания / Ю.И. Гуменюк, С.В. Даниленко, Д.В. Усманов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, - 2004. – С. 235–240.

198. Степанский Л.Г. Об опытной проверке результатов компьютерного моделирования процессов пластического деформирования / Л.Г. Степанский // КШП-ОМД. - 2001. - №6. - С. 36-40.

199. Третьяк В.В. Разработка программного комплекса для расчета параметров импульсной объемной штамповки / В.В. Третьяк, А.И. Долматов, А.С. Федорова, С.В. Бреус // Вестник двигателестроения, - 2014. – С. 176–180.

200. Алиева Л.И. Оценка деформированного состояния деталей в процессе холодного выдавливания / Л.И. Алиева // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – №2. – С. 77–85.

201. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников // К.: УМК ВО, - 1989 – 152 с.

202. Огородников В.А. Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении: монография / В.А. Огородников, И.А.

Деревенько, Л. И. Алиева // Винница : ВНТУ, ООО «Меркьюри-Подолье» - 2016. – 176 с. – ISBN 978–966–2696–69–1.

203. Хван Д.В. Экспериментальная механика конечных деформаций / Д.В. Хван, Ф.Х. Томилов, В.И. Корольков // Воронеж: Изд-во «ЭЛИСТ», 1996. – 248 с.

204. Сивак И. О. Поверхность предельной пластичности / И.О. Сивак // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: ДДМА, 1999. – С. 9–15.

205. Коцюбивская Е. И. Пластичность металлов при плоском напряжённом состоянии / Е.И. Коцюбивская, Л.И. Алиева // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов ОМД: Материалы МНТК, 11–14 октября 2005 г. – Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех», 2005. – С. 86–90.

206. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением / П. Н. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин, Н. А. Чиченов // М. : Машиностроение, - 1974. – 336 с.

207. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский // М. : Машиностроение, - 1972. – 360 с.

208. Лисицын А. И. Моделирование процессов обработки металлов давлением / А. И. Лисицын, В. Я. Остренко // К.: Техніка, - 1976. – 208 с.

209. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха // М. : Машиностроение, - 1980. – 155 с.

210. Ренне И.П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением // Тула: ТПИ, 1979. - 96 с.

211. Андрейченко В.А. Теория ОМД. Часть IV. Теоретические основы экспериментальных исследований пластического формоизменения / В.А. Андрейченко: Учеб. пособие // Тула: Тул. гос. ун-т., - 2002. – 68 с.

212. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки / И.П. Ренне // Тула, - 1970. – 147 с.

213. Абхари П. Б. Формоизменение трубчатой заготовки в процессе раздачи / П. Б. Абхари, О. В. Патык // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 26–30.

214. Абхари П.Б. Моделирование процесса закрытой осадки методом конечных элементов / П. Б. Абхари // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Киев : НТУ «ХПИ», 2016 – С. 3–5.70.

215. Абхари П. Б. Исследование формоизменения заготовки в процессе осадки профилированным инструментом / Абхари П. Б., Самоглядов А. Д. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – С. 5–6.

216. Алиева Л. И. Силовые режимы радиального выдавливания деталей с высоким фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4. – С. 24–26.

217. Алиева Л.И. Радиальное выдавливание втулок с фланцем / Л. И. Алиева, П. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С. 6.

218. Абхари П. Конечно-элементный анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании / П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 173–174.

219. Алиева Л. И. Анализ заполнения полости штампа в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Вісник НТУУ «КП». Серія «Машинобудування». – Київ, 2011. – № 63. – С. 285–288.

220. Прогнозирование дефектообразования в процессе радиального

выдавливания / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. В. Патык // Вісник національного технічного університету «ХП» : зб. наук. праць. – Харків, 2011. – № 47. – С. 140–145.

221. Алиева Л. И. Анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании методом измерения твердости / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Обработка материалов давлением: сб. научн. труд. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 30–33.

222. Абхари П. Исследование формоизменения в процессах радиального выдавливания / П. Абхари, Л. И. Алиева // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С. 6.

223. Алиев И. С. Технологические процессы штамповки радиальным выдавливанием в закрытых штампах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 166–172.

224. Abhari Payman. Investigation of load on the tools in precision radial extrusion process with multiple ram /Payman Abhari// XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering»:Series: Monographs. – Nr 56. – Częstochowa, 2016 – P. 330–333.

225. Абхари П. Б. Усилия раскрытия полуматриц при радиальном выдавливании фланцев на оправке / П. Б. Абхари // Сучасні технології промислового комплексу-2016. Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон, 2016. – С. 125–127.

226. Абхари П. Б. Прогнозирование возникновения дефекта утяжины в процессе радиального выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Кременчук, 2016. – С. 32–34.

227. Абхари П. Б. Силовой режим процесса радиального

выдавливания фланца на оправке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 11–16.

228. Абхари П. Б. Исследование деформированного состояния деталей с фланцем в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 8–9.

229. Abhari Payman. Investigation of fracture moment in radial extrusion process by finite element method / Payman Abhari // XVIII International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics. – Series: Monographs. – Częstochowa, 2017. – Nr 68. – С. 97–101.

230. Abhari Payman. Finite Element Simulation of Flashless Radial Extrusion Process / Payman Abhari, Igramotdin Aliiev // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 14, Issue 4 Ver. III (Jul. – Aug. 2017), PP 79 – 83 [http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14\(4\)Version-3.html](http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14(4)Version-3.html), DOI: 10.9790/1684-1404037983.

231. Abhari Payman. Application of Numerical Simulation to Investigate Material Flow in Hollow Radial Extrusion/ Payman Abhari // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET). – July-August-2017. – Volume 3. – Issue 5. – p. 556–560. – ISSN 2394-4099. – <http://ijsrset.com/archive.php?v=6&i=18&pyear=2017>, DOI :10.32628/IJSRSET1734145.

232. Абхари П. Б. Теоретический анализ процесса выдавливания деталей с фланцем в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Херсонського національного технічного університета. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 11–18.

233. Моделирование процесса закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием / П. Б. Абхари, Р. И. Сивак, Л. В. Таган,

К. В. Малий // Обработка материалов давлением : сб. научн. труд. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (45). – С. 17–21.

234. Алиев И. С. Формоизменение полых деталей с фланцем в процессе холодного выдавливания / И. С. Алиев, П. Б. Абхари // Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Мариуполь ПГТУ, 2017. – Том 1. – С. 190–191.

235. Алиев И. С. Кинематические варианты бокового выдавливания деталей с отрезками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – С. 9.

236. Алиев И. С. Особенности штамповки в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. В. Цыганенко // Машини та пластична деформація металів. Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. – Запоріжжя, 2012. – С. 70–71.

237. Абхари П. Б. Моделирование закрытой штамповки поковок типа «крестовин» методом конечных элементов / П. Б. Абхари, О. А. Жукова, О. В. Патык // Всеукраинская научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь 2013». – Краматорск. – С. 22.

238. Алиев И. С. Исследование формоизменения силового режима процесса бокового выдавливания методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. пр. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків, 2013. – № 42 (1015). – С. 7–13.

239. Алиев И. С. Боковое выдавливание деталей с отрезками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2013 – С. 16.

240. Абхари П. Б. Моделирование процесса бокового выдавливания деталей с наклонными отрезками в форме наклонных перьев / П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Современные технологии обработки материалов давлением:

моделирование, проектирование, производство. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И. А. Норицина. – Москва, 2013. – С. 251–252.

241. Алієв І. С. Дослідження силового режиму в процесі видавлювання деталей з бічними відростками в роз'ємних матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ. – Київ: НТТУ «КПІ», 2014 – С. 10–12.

242. Алиев И. С. Моделирование кинематических вариантов бокового выдавливания деталей с отростками / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 12–13.

243. Алиев И. С. Моделирование формоизменения в процессе бокового выдавливания / О. А. Жукова, П. Б. Абхари, И. С. Алиев // Матеріали загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Механіка пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів». – Київ : НТТУ «КПІ», 2014. – С. 64–66.

244. Напряженно-деформированное состояние поковок в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова, Г. П. Клименко // Вестник Карагандинского государственного промышленного университета. – Темиртау, 2014. – №1 (4). – С. 9–12.

245. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов : научное издание. – Монография – Днепропетровск, 2014. – Том 1. – С. 192–196.

246. Алиев И. С. Боковое выдавливание отростков в разъемных

матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 8–9.

247. Алиев И. С. Моделирование процесса бокового выдавливания отростка в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Сучасні технології промислового комплексу. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2015. – Випуск 2. – С. 7.

248. Исследование энергосиловых параметров в процессе бокового выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина, В. Т. Лебедь // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 13–17.

249. Abhari Payman. The investigation of lateral extrusion process using finite element simulation / Payman Abhari // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET). – August 2017. – Volume 5. – Issue VIII. – p.1703–1707. – ISSN 2321-9653. <http://ijraset.com/archive-detail.php?AID=60>, DOI: 10.22214/ijraset.2017.8242.

250. Абхари П. Б. Исследование силового режима процесса точной объемной штамповки несесимметричных изделий в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2017. – С. 87–88.

251. Абхари П. Б. Выдавливание деталей с боковыми отростками / П. Б. Абхари // Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції: збірник тез доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – С. 14–15.

252. Косенко М. В. Выдавливание полых конических деталей / М. В. Косенко, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С.350-352.

253. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 1 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2005. – №2 – С.24-29.

254. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 2 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2006. – №3 (5)– С.97-102.

255. Марков О.Е. Моделирование процессаковки валов из слитков / О.Е. Марков, П. Абхари // IX Всеукр. наук.-практ. конф. «Технологія-2006». – Сєверодонецьк, 2006. – С. 15–16.

256. Марков О.Е. Моделирование процессовковки МКЭ / О.Е. Марков, П. Абхари // „Азовмаш 2006”: I міжнар. наук.-техн. конф. – Маріуполь, 2006. – С. 57–58.

257. Совершенствование технологии деформирования осесимметричных поковок / О. Е. Марков, Л. Н. Соколов, С. В. Янчук, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 295–298.

258. Марков О.Е. Компьютерное моделирование процессовковки / О.Е. Марков, П. Абхари // Энергомашспецсталь: I наук.-техн. конф. молодых вчених та спеціалістів ОАО „ Энергомашспецсталь-2007”. – Краматорськ, 2007. – С. 27–29.

259. Марков О.Е. Особенности комбинированнойковки прокатных валов с осадкой слитка на плите с отверстием / О.Е. Марков, П. Абхари, С.В. Янчук // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском: наук.-практ. конф. – Краматорськ, ДДМА, 2007. – С. 70. – ISBN 5-77-63-1585-9.

260. Алиев И. С., Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала Сообщение 3 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2008. – № 1(11). – С. 7–12.

261. Abhari P. Modeling simulation for fleshless precision forging process with finite element method / P. Abhari, O. A. Zhykova // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – С. 98.

262. Прогнозирование дефектообразования при комбинированном выдавливании в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 63–67.

263. Алиева Л. И. Определение величины утяжины в процессе радиально-продольного выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків, 2014. – № 44 (1087). – С. 3–7.

264. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов. Материалы X Международной научно-технической конференции. – Днепропетровск : Национальная металлургическая академия Украины, 2014 – С. 25.

265. Абхари П. Б. Моделирование комбинированного выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, К. В. Гончарук, Л. К. Паращенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 9–10.

266. Алиева Л. И. Определение энергосиловых параметров совмещенного радиального выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением. Материалы Международной научно-технической конференции. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 28–32.

267. Алиев И. С. Дефектообразование при штамповке в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Теоретичні та

практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 85-річчю створення кафедри обробки металів тиском в НТУУ «КПІ», 2015 – С. 10–15.

268. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // XVI International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Series : Monographs. – Czestochowa, 2015. – №48. – P. 90–93.

269. Абхари П. Б. Напряженно-деформированное состояние осесимметричных заготовок при штамповке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 64–67.

270. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания / Л. И. Алиева, Я.Г. Жбанков, Н.С. Грудкина, П.Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 148–152.

271. Abhari Payman. Numerical simulation of cold forging process to investigate folding defect in enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2 (80). – p. 71–77. – ISSN 2521-1943, <http://journal.mmi.kpi.ua/author/submission/109198>, DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.96079>.

272. Абхари П. Б. Конечно-элементное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей / П. Б. Абхари / Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Том 1. – Мариуполь ПГТУ, 2017. – С. 192–194.

273. Abhari Payman. The study of folding defects during the radial-forward extrusion in the enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Science and Research (IJSR). – July 2017. – Volume 6. – Issue 7. – p. 1746–1749.

– ISSN: 2319-7064, <https://www.ijsr.net/archive/v6i7/ART20175702.pdf>, DOI: 10.21275 /ART20175702.

274. Abhari Payman. Computer-aided simulation to investigate material flow in combined-radial extrusion / Payman Abhari // International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT). February 2018. – Volume 4. – Issue 2.– p. 24–28.– ISSN: 2454-6135.– DOI: 10.7324/IJERAT.2018.3187, Doiurl <http://dx.doi.org/10.7324/IJERAT.2018.3187>, <https://ijerat.com/index.php/admin/archiveissue?issueid=410>.

275. Волков Б.Н. Унификация деталей машин / Б.Н. Волков, В.Я. Кремянский // М.: Издательство стандартов, - 1989. - 229 с.

276. Соломенцев Ю.М. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров // М.: Машиностроение, - 1985. - 256 с.

277. Норенков И.П. Системы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков // в 9 кн. Кн. 1. Принципы построения и структура САПР. М.: Высшая школа, - 1986. - 127 с.

278. Прохоров А.Ф. Принципы построения САПР технических систем / А.Ф. Прохоров // Методические рекомендации. М.: ВНИИинформ. и техн.-экон. ис-след. по машиностроению и робототехнике, - 1986. - 58 с.

279. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р.А. Аллик, В.И. Бородянский, А.Г. Бурин и др. // под общ. ред. Р.А. Аллика. Л.: Машиностроение, - 1986. - 319 с.

280. Разработка САПР: в 10 кн. Кн. 1. Проблемы и принципы создания САПР: практическое пособие / А.В. Петров, В.М. Черненко; под ред. А.В. Петрова. М.: Высшая школа, - 1990. - 143 с.

281. Энкарначо Ж. Автоматизированное проектирование / Ж. Энкарначо, Э. Шлехтендаль // основные понятия и архитектура систем. М.: Радио и связь, - 1986. - 287 с.

282. Райан Д. Инженерная графика в САПР / Д. Райан // М.: Мир, - 1989. - 391 с.

283. Spur G. CAD-Technik Lehr-und Arbeitsbuch für die

«Rechnerunterstützung in Konstruktion und Arbeitsplanung. Berlin / G. Spur, F. Krause // Hanser, - 1986. - 648 p.

284. CAD/CAM-System für Stenerkurven und ebene Formteile / Ü. Frans, H. Freitag, W. Gehissdorf, B. Lull // Metallbeard. 71. (1977). 10. P. 25-27.

285. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем / А.И. Уемов // М.: Мысль, - 1978. - 272 с.

286. Ступаченко А.А. САПР технологических операций / А.А. Ступаченко // Л.: Машиностроение, - 1988. - 234 с.

287. Система автоматизированного проектирования процесса горячей штамповки тел вращения / Р.А. Вайсбурд, Г.А. Еремеев, В.Б. Дядюк и др. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1976. - № 1. - С. 13-14.

288. Вайсбурд Р.А. Развитие системы автоматизированного проектирования процессов кузнечно-штамповочного производства / Р.А. Вайсбурд // Кузнечно-штамповочное производство. - 1981. - № 8. - С. 30-31.

289. Алиев Ч.А. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объемной штамповки / Ч.А. Алиев, Г.П. Тетерин // М.: Машиностроение, - 1987. - 224 с.

290. Петров А.И. Автоматизированная система технологической подготовки кузнечно-штамповочного производства для поковок типа тел вращения / А.И. Петров, М.А. Яхнис, А.Г. Девятериков // Кузнечно-штамповочное производство. - 1984. - № 4. - С. 36-38.

291. Тетерин Т.П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки / Т.П. Тетерин, П.Н. Полухин // М.: Машиностроение, - 1979. - 284 с.

292. Тетерин Г.П. Направления развития САПР в кузнечно-штамповочном производстве / Г.П. Тетерин // Кузнечно-штамповочное производство - 1985. - №6. - С. 3-6.

293. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект - прикладные системы / Г.С. Поспелов, Д.А. Поспелов // Т. 9. М.: Знание, - 1985. - 48 с.

294. Хант Э. Искусственный интеллект / Э. Хант // М.: Мир, - 1978. - 558 с.

295. Кузин Л.Т. Общение в системах искусственного интеллекта / Л.Т. Кузин, А.В. Ганночка // учеб. пособие. М.: МИФИ, - 1986. - 51 с.
296. Мальковский М.Г. Диалог с системой искусственного интеллекта / М.Г. Мальковский // М.: Изд-во МГУ, - 1985. - 213 с.
297. Haton J. Artificial intelligence techniques in man-machine communication / J. Haton, M. Halon // Computer Stand, and Interfaces. - 1988. - № 1. - P. 37-40.
298. Горелик А.Л. Современное состояние проблемы распознавания / А.Л. Горелик, И.Б. Гуревич, В.А. Скрипкин // Некоторые аспекты. М.: Радио и связь, - 1985. - 161 с.
299. Тюхтин В.С. Теория автоматического опознавания и гносеология / В.С. Тюхтин // М.: Наука, - 1976. - 190 с.
300. Попов Э.В. Экспертные системы. Решение неформальных задач в диалоге с ЭВМ / Э.В. Попов // М.: Наука, - 1987. - 288 с.
301. Кирсанов В.С. Экспертные системы. Состояние и перспективы / В.С. Кирсанов, Э.В. Попов // В кн.: Экспертные системы. М.: МДНТП, - 1986. - С. 3-8.
302. Спивак Л.Ф. К проблеме интеграции экспертных и теоретических систем / Л.Ф. Спивак // В кн.: Экспертные системы и анализ данных. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, - 1988. - 137 с.
303. Евстратов В. А. Методологическая база САПР холодной и полугорячей объемной штамповки / В.А. Евстратов // В кн.: Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования. М.: МДНТП, - 1990. - С. 149-154.
304. Сосенушкин Е. Н. Прогрессивные процессы объемной штамповки. / Е. Н. Сосенушкин // М: Машиностроение, 2011.-480 с.
305. Абхари П. Б. Кинематические варианты в закрытой штамповке деталей с фланцем / П. Б. Абхари, А. А. Еремина, А. С. Кучма // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 11.
306. Алиев И. С. Штампы с разъемными матрицами для закрытой

штамповки / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию кафедры «Обработка металлов давлением» – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – С. 4.

307. Пат. 116545 Україна, В 21 J 5/00. Спосіб виготовлення деталей з фланцем / П. Абхари, Л. І. Алієва, Р. І. Сивак, А. А. Єрьоміна, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612441; заявл. 06.12.2016; опубл. 25.05.2017. Бюл. №10. – 5 С.

308. Разработка штампов для выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, Л. И. Алиева, И. С. Алиев, А. А. Ерёмина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 223–321.

309. Пат. 117796 Україна, МПК В21К 21/00, В21С 23/20, В21J 5/00. Спосіб отримання порожнистих виробів з тонким дном / Алієва Л. І., Абхари П., Гончарук Х. В., Таган Л. В.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201700272; заявл. 10.01.2017; опубл. 10.07.2017. – Бюл. № 13. – 4 С.

310. Пат. 122023 Україна, МПК В21К 21/08. Спосіб отримання порожнистих виробів з фланцем / Абхари П., Алієва Л. І., Таган Л. В., Картамишев Д. О.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201706444; заявл. 23.06.2017; опубл. 26.12.2017. – Бюл. № 24. – 5 С.

311. Алієв І. С. Удосконалення технологічного оснащення процесів штамповки у роз'ємних та рухливих матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари // Пластична деформація металів. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Дніпро : Національна металургійна академія України, 2017. – С. 43–44.

312. Способы управления формообразованием деталей при выдавливании / Алиева Л. И., Абхари П. Б., Ибрагимов А. И., Корденко М. В. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 8–10.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А**Список опублікованих робіт за темою дисертації**

1. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов : научное издание. – Монография – Днепропетровск, 2014. – Том 1. – С. 192–196.

2. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // XVI International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Series : Monographs. – Czestochowa, 2015. – №48. – P. 90–93.

3. Abhari Payman. Investigation of load on the tools in precision radial extrusion process with multiple ram /Payman Abhari // XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» :Series: Monographs. – Nr 56. – Częstochowa, 2016 – P. 330–333.

4. Abhari Payman. Investigation of fracture moment in radial extrusion process by finite element method / Payman Abhari // XVIII International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics. – Series: Monographs. – Częstochowa, 2017. – Nr 68. – C. 97–101.

5. Abhari Payman. Numerical simulation of cold forging process to investigate folding defect in enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2 (80). – p. 71–77. – ISSN 2521-1943, <http://journal.mmi.kpi.ua/author/submission/109198>, DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.96079>.

6. Abhari Payman. Finite Element Simulation of Flashless Radial Extrusion Process / Payman Abhari, Igramotdin Aliiev // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 14, Issue 4 Ver. III (Jul. – Aug. 2017), PP 79 – 83

[http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14\(4\)Version-3.html](http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/pages/14(4)Version-3.html), DOI: 10.9790/1684-1404037983.

7. Abhari Payman. The study of folding defects during the radial-forward extrusion in the enclosed dies/ Payman Abhari // International Journal of Science and Research (IJSR). – July 2017. – Volume 6. – Issue 7. – p. 1746–1749. – ISSN: 2319-7064, <https://www.ijsr.net/archive/v6i7/ART20175702.pdf>, DOI: 10.21275/ART20175702.

8. Abhari Payman. Application of Numerical Simulation to Investigate Material Flow in Hollow Radial Extrusion/ Payman Abhari // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET). – July-August-2017. – Volume 3. – Issue 5. – p. 556–560. – ISSN 2394-4099. – <http://ijrsrset.com/archive.php?v=6&i=18&pyear=2017>, DOI :10.32628/IJSRSET1734145.

9. Abhari Payman. The investigation of lateral extrusion process using finite element simulation / Payman Abhari // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET). – August 2017. – Volume 5. – Issue VIII. – p. 1703–1707. – ISSN 2321-9653. <http://ijraset.com/archive-detail.php?AID=60>, DOI: 10.22214/ijraset.2017.8242.

10. Abhari Payman. Computer-aided simulation to investigate material flow in combined-radial extrusion / Payman Abhari // International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT). February 2018. – Volume 4. – Issue 2.– p. 24–28.– ISSN: 2454-6135.– DOI: 10.7324/IJERAT.2018.3187, Doiurl <http://dx.doi.org/10.7324/IJERAT.2018.3187>, <https://ijerat.com/index.php/admin/archiveissue?issueid=410>.

11. Прогнозирование дефектообразования при комбинированном выдавливании в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 63–67.

12. Алиева Л. И. Силовые режимы радиального выдавливания деталей с высоким фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4. – С. 24–26.

13. Напряженно-деформированное состояние поковок в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова, Г. П. Клименко // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – Темиртау, 2014. – №1 (4). – С. 9–12.

14. Косенко М. В. Выдавливание полых конических деталей / М. В. Косенко, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С.350-352.

15. Совершенствование технологии деформирования осесимметричных поковок / О. Е. Марков, Л. Н. Соколов, С. В. Янчук, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 295–298.

16. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 1 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2005. – №2 – С.24-29.

17. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение 2 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2006. – №3 (5)– С.97-102.

18. Алиев И. С., Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала Сообщение 3 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2008. – № 1(11). – С. 7–12.

19. Алиева Л. И. Анализ заполнения полости штампа в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – Київ, 2011. – № 63. – С. 285–288.

20. Прогнозирование дефектообразования в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. В. Патык //

Вісник національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. – Харків, 2011. – № 47. – С. 140–145.

21. Алиева Л. И. Анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании методом измерения твердости / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Обработка материалов давлением: сб. научн. труд. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 30–33.

22. Абхари П. Б. Формоизменение трубчатой заготовки в процессе раздачи / П. Б. Абхари, О. В. Патык // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 26–30.

23. Алиев И. С. Исследование формоизменения силового режима процесса бокового выдавливания методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків, 2013. – № 42 (1015). – С. 7–13.

24. Алиева Л. И. Определение величины утяжины в процессе радиально-продольного выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків, 2014. – № 44 (1087). – С. 3–7.

25. Абхари П. Б. Теоретический анализ процесса выдавливания деталей с фланцем в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Херсонського національного технічного університета. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 11–18.

26. Моделирование процесса закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием / П. Б. Абхари, Р. И. Сивак, Л. В. Таган, К. В. Малий // Обработка материалов давлением : сб. научн. труд. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (45). – С. 17–21.

27. Пат. 116545 Україна, В 21 J 5/00. Спосіб виготовлення деталей з фланцем / П. Абхарі, Л. І. Алієва, Р. І. Сивак, А. А. Єрьоміна, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612441; заявл. 06.12.2016; опубл. 25.05.2017. Бюл. №10. – 5 С.

28. Пат. 117796 Україна, МПК В21К 21/00, В21С 23/20 , В21J 5/00.

Спосіб отримання порожнистих виробів з тонким дном / Алієва Л. І., Абхари П., Гончарук Х. В., Таган Л. В.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201700272; заявл. 10.01.2017; опубл. 10.07.2017. – Бюл. № 13. – 4 С.

29. Пат. 122023 Україна, МПК В21К 21/08. Спосіб отримання порожнистих виробів з фланцем / Абхари П., Алієва Л. І., Таган Л. В., Картамишев Д. О.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201706444; заявл. 23.06.2017; опубл. 26.12.2017. – Бюл. № 24. – 5 С.

30. Алиева Л.И. Радиальное выдавливание втулок с фланцем / Л. И. Алиева, П. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С. 6.

31. Абхари П. Конечно-элементный анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании / П. Абхари, Е. Н. Бондарева // Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 173–174.

32. Абхари П. Исследование формоизменения в процессах радиального выдавливания / П. Абхари, Л. И. Алиева // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С. 6.

33. Алиев И. С. Кинематические варианты бокового выдавливания деталей с отростками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – С. 9.

34. Алиев И. С. Особенности штамповки в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. В. Цыганенко // Машини та пластична деформація металів. Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. – Запоріжжя, 2012. – С. 70–71.

35. Абхари П. Б. Моделирование закрытой штамповки поковок типа «крестовин» методом конечных элементов / П. Б. Абхари, О. А. Жукова, О. В. Патык // Всеукраинская научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь 2013». – Краматорск. – С. 22.

36. Алиев И. С. Боковое выдавливание деталей с отрогками / И. С. Алиев, О. А. Жукова, П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2013 – С. 16.

37. Abhari P. Modeling simulation for fleshless precision forging process with finite element method / P. Abhari, O. A. Zhykova // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013.– С. 98.

38. Абхари П. Б. Моделирование процесса бокового выдавливания деталей с наклонными отрогками в форме наклонных перьев / П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И. А. Норицина. – Москва, 2013. – С. 251–252.

39. Алиев И. С. Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Пластическая деформация металлов. Материалы X Международной научно-технической конференции. – Днепропетровск : Национальная металлургическая академия Украины, 2014 – С. 25.

40. Алієв І. С. Дослідження силового режиму в процесі видавлювання деталей з бічними відростками в роз'ємних матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари, О. А. Жукова // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ. – Київ: НТТУ «КПІ», 2014 – С. 10–12.

41. Алиев И. С. Штампы с разъемными матрицами для закрытой штамповки / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию кафедры «Обработка металлов давлением» – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – С. 4.

42. Абхари П. Б. Моделирование комбинированного выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, К. В. Гончарук, Л. К. Паращенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 9–10.

43. Алиев И. С. Моделирование кинематических вариантов бокового выдавливания деталей с отрезками / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 12–13.

44. Алиева Л. И. Определение энергосиловых параметров совмещенного радиального выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением. Материалы Международной научно-технической конференции. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 28–32.

45. Алиев И. С. Боковое выдавливание отрезков в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 8–9.

46. Алиев И. С. Моделирование процесса бокового выдавливания отрезка в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Сучасні технології промислового комплексу. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Херсон : Херсонський національний технічний університет, 2015. – Випуск 2. – С. 7.

47. Алиев И. С. Дефектообразование при штамповке в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 85-річчю створення кафедри обробки металів тиском в НТУУ «КПІ», 2015 – С. 10–15.

48. Абхари П. Б. Напряженно-деформированное состояние осесимметричных заготовок при штамповке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 64–67.

49. Абхари П. Б. Исследование деформированного состояния деталей с фланцем в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 8–9.

50. Абхари П. Б. Усилия раскрытия полуматриц при радиальном выдавливании фланцев на оправке / П. Б. Абхари // Сучасні технології промислового комплексу-2016. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон, 2016. – С. 125–127.

51. Абхари П. Б. Прогнозирование возникновения дефекта утяжины в процессе радиального выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Кременчук, 2016. – С. 32–34.

52. Абхари П.Б. Моделирование процесса закрытой осадки методом конечных элементов / П. Б. Абхари // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Киев : НТУ «ХПИ», 2016 – С. 3–5.

53. Алієв І. С. Удосконалення технологічного оснащення процесів штамповки у роз'ємних та рухливих матрицях / І. С. Алієв, П. Б. Абхари //

Пластична деформація металів. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Дніпро : Національна металургійна академія України, 2017. – С. 43–44.

54. Абхари П. Б. Исследование силового режима процесса точной объемной штамповки несесимметричных изделий в закрытых матрицах / П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2017. – С. 87–88.

55. Абхари П. Б. Конечно-элементное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей / П. Б. Абхари / Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Том 1. – Мариуполь ПГТУ, 2017. – С. 192–194.

56. Абхари П. Б. Выдавливание деталей с боковыми отростками / П. Б. Абхари // Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції: збірник тез доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 14–15.

57. Способы управления формообразованием деталей при выдавливании / Алиева Л. И., Абхари П. Б., Ибрагимов А. И., Корденко М. В. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – С. 8–10.

Додатково наукові результати дисертації відображені в роботах:

58. Марков О.Е. Особенности комбинированнойковки прокатных валов с осадкой слитка на плите с отверстием / О.Е. Марков, П. Абхари, С.В. Янчук // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском: наук.-практ. конф. – Краматорськ, ДДМА, 2007. – С. 70. – ISBN 5-77-63-1585-9.

59. Исследование энергосиловых параметров в процессе бокового

выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина, В. Т. Лебедь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 13–17.

60. Алиев И. С. Технологические процессы штамповки радиальным выдавливанием в закрытых штампах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Еремина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 166–172.

61. Разработка штампов для выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, Л. И. Алиева, И. С. Алиев, А. А. Ерёмина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 223–321.

62. Абхари П. Б. Силовой режим процесса радиального выдавливания фланца на оправке в разъемных матрицах / П. Б. Абхари // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 11–16.

63. Марков О.Е. Компьютерное моделирование процессовковки / О.Е. Марков, П. Абхари // Энергомашспецсталь: I науч.-техн. конф. молодых ученых та спеціалістів ОАО „ Энергомашспецсталь-2007”. – Краматорськ, 2007. – С. 27–29.

64. Марков О.Е. Моделирование процессаковки валов из слитков / О.Е. Марков, П. Абхари // IX Всеукр. науч.-практ. конф. «Технологія-2006». – Сєверодонецьк, 2006. – С. 15–16.

65. Марков О.Е. Моделирование процессовковки МКЭ / О.Е. Марков, П. Абхари // „Азовмаш 2006”: I міжнар. науч.-техн. конф. – Маріуполь, 2006. – С. 57–58.

66. Алиев И. С. Моделирование формоизменения в процессе бокового выдавливания / О. А. Жукова, П. Б. Абхари, И. С. Алиев // Матеріали загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Механіка пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів». – Київ : НТТУ «КПІ», 2014. – С. 64–66.

67. Абхари П. Б. Кинематические варианты в закрытой штамповке деталей с фланцем / П. Б. Абхари, А. А. Еремина, А. С. Кучма // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2014. – С. 11.

68. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания / Л. И. Алиева, Я.Г. Жбанков, Н.С. Грудкина, П.Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ–Херсон, 2016. – С. 148–152.

69. Алиев И. С. Формоизменение полых деталей с фланцем в процессе холодного выдавливания / И. С. Алиев, П. Б. Абхари // Университетская наука-2017. Материалы Международной научно-технической конференции. – Мариуполь ПГТУ, 2017. –Том 1. – С. 190–191.

70. Абхари П. Б. Исследование формоизменения заготовки в процессе осадки профилированным инструментом / Абхари П. Б., Самогляднов А. Д. // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 5–6.

Особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві:

[1] – розробка кінематичної схеми руху деформуючого інструменту; [6, 35] – розробка та аналіз розрахункових скінченно-елементних моделей процесів; [22] – виявлення основних факторів, що впливають на деформування трубчатих заготовки; [2, 68] – встановлення дефектів при видавлюванні; [11] – побудова діаграм для усунення дефектів; [24, 47] – надання рекомендацій з усунення дефектів при видавлюванні; [32] – побудова діаграм прогнозування утворення утягнення при радіальному видавлюванні на оправці; [13, 57] – дослідження закономірностей

формоутворення заготовки методом скінченних елементів; [40] – отримання уточнених залежностей для визначення силового режиму деформування в залежності від розташування відростків деталі; [39, 66, 69] – аналіз регулювання формозмінення заготовок на основі варіювання геометрією інструменту; [27, 59] – фізичне обґрунтування результатів дослідження; [12, 19, 23] – аналіз особливостей силового режиму; [28] – теоретичне підтвердження запропонованої ідеї отримання порожнистих деталей з тонким дном; [34, 38] – пропонування шляхів підвищення точності виробів при видавлюванні в роз’ємних матрицях; [14] – аналіз впливу форми заготовки на заповнення порожнини матриці при видавлюванні конічних стаканів; [15] – систематизація способів отримання осесиметричних поковок; [16 – 18] – розробка методик і оснащення для експериментального підтвердження можливості одержання порожнистих деталей радіально-прямим видавлюванням; [21] – експериментальне дослідження та підтвердження результатів моделювання; [26, 29] – запропонування нових ідей видавлювання; [30, 31] – узагальнення процесів радіального видавлювання; [33, 36] – розробка кінематичних варіантів деформування заготовок боковим видавлюванням; [43, 45] – аналіз НДС осередків деформування при боковому видавлюванні; [37, 42, 46] – аналіз та узагальнення результатів моделювання; [41, 61] – удосконалення конструкцій штампів; [53] – розробка нових схем деформування; [58, 63] – розробка скінченно-елементних моделей пластичного деформування; [44, 64, 65] – встановлення особливостей НДС заготовки; [60, 67] – систематизація процесів видавлювання в закритих штампах; [70] – запропонування профільованого інструменту для процесу осадки.

Примітка: В анотації до списку дано також посилання на дисертації співавторів, у яких було використано результати спільних робіт і бібліографічні дані яких наведені в списку використаних джерел. Номер за даним списком вказано в дужках

ДОДАТОК Б**Апробація результатів дисертаційної роботи
на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях**

1. I Міжнародна науково-технічна конференція «Азовмаш 2006», (м. Маріуполь, 10 червня, 2006 р), очна форма участі;
2. I Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів ОАО «Енергомашспецсталь-2007», (м. Краматорськ, 29 травня – 5 червня, 2007 р), очна форма участі;
3. VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 1-4 червня, 2010 р), очна форма участі;
4. Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні і практичні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз», (м. Вінниця, 30 травня – 2 червня, 2011 р), заочна форма участі;
5. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 31 травня – 3 червня, 2011 р), очна форма участі;
6. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 25 – 28 квітня, 2011 р.), очна форма участі;
7. X Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 5 – 8 червня, 2012 р), очна форма участі;
8. II Міжнародна науково-технічна конференція «Машини та пластична деформація металів», (м. Запоріжжя, 19-22 листопада, 2012 р), заочна форма участі;
9. XV Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 23 – 26 квітня, 2012 р.), очна форма участі;
10. Міжнародна науково-технічна конференція «Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование,

проектирование, производство», (м. Москва, 23 – 25 вересня, 2013 р), заочна форма участі;

11. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих спеціалістів «Енергомашспецсталь 2013», (м. Краматорськ, 24 травня, 2013 р), очна форма участі;

12. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 6 – 7 червня, 2013 р), очна форма участі;

13. IV Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ, 14 – 17 травня, 2013 р), заочна форма участі;

14. XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 22 – 25 квітня, 2013 р.), очна форма участі;

15. X Міжнародна науково-технічна конференція «Пластическая деформация металлов», (м. Дніпропетровськ, 26 – 28 травня, 2014 р), заочна форма участі;

16. V Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ, 19 – 22 травня, 2014 р), заочна форма участі;

17. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», (м. Харків, 19 – 21 листопада, 2014 р), заочна форма участі;

18. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 5 – 6 червня, 2014 р), очна форма участі;

19. Міжнародна науково-технічна конференція «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением», (м. Санкт-Петербург, 14 – 17 жовтня, 2014 р), заочна форма участі;

20. XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і

проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 21 – 24 квітня, 2014 р.), очна форма участі;

21. Загальноуніверситетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, (м. Київ, 4 – 5 грудня, 2014 р), заочна форма участі;

22. XVI International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», (Czestochowa, 28 – 29 травня, 2015 р), заочна форма участі;

23. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 2 – 3 червня, 2015 р), очна форма участі;

24. I Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу», (м. Херсон, 15 – 18 вересня, 2015 р), заочна форма участі;

25. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ, 14 – 18 грудня, 2015 р), заочна форма участі;

26. XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 20 – 23 квітня, 2015 р.), очна форма участі;

27. XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», (Czestochowa, 29 – 31 травня, 2016 р), заочна форма участі;

28. VII Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ-Херсон, 30 травня – 3 червня, 2016 р), очна форма участі;

29. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м. Краматорськ, 1 – 3 червня, 2016 р), очна форма участі;

30. II Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології промислового комплексу-2016», (м. Херсон, 14 – 18 вересня, 2016 р), заочна форма участі;

31. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції

розвитку машинобудування та транспорту», (м. Кременчук, 9 – 11 листопада, 2016 р), заочна форма участі;

32. VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», (м. Харків, 23 – 25 листопада, 2016 р), очна форма участі;

33. XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки тиском» (м. Краматорськ, 25 – 28 квітня, 2016 р.), очна форма участі;

34. XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics», (Czestochowa, 29 – 31 травня, 2017), заочна форма участі;

35. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Пластична деформація металів», (м. Дніпро, 22–26 травня, 2017 р), заочна форма участі;

36. VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», (м. Київ–Херсон, 29 травня – 02 червня, 2017 р), очна форма участі;

37. Міжнародна науково-технічна конференція «Університетська наука-2017», (м. Маріуполь, 18–19 травня, 2017 р), заочна форма участі;

38. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки», (м. Вінниця, 17–19 травня, 2017 р), заочна форма участі;

39. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та энергоефективность процессов и оборудования обработки тиском у машинобудуванні та металургії», (м. Харків, 22–24 листопада 2017 р), очна форма участі;

40. XX Міжнародна науково-технічна конференція «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки тиском» (м. Краматорськ, 24 – 27 квітня, 2017 р.), очна форма участі;

41. XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки тиском» (м. Краматорськ, 23 – 26 квітня, 2018 р.), очна форма участі.

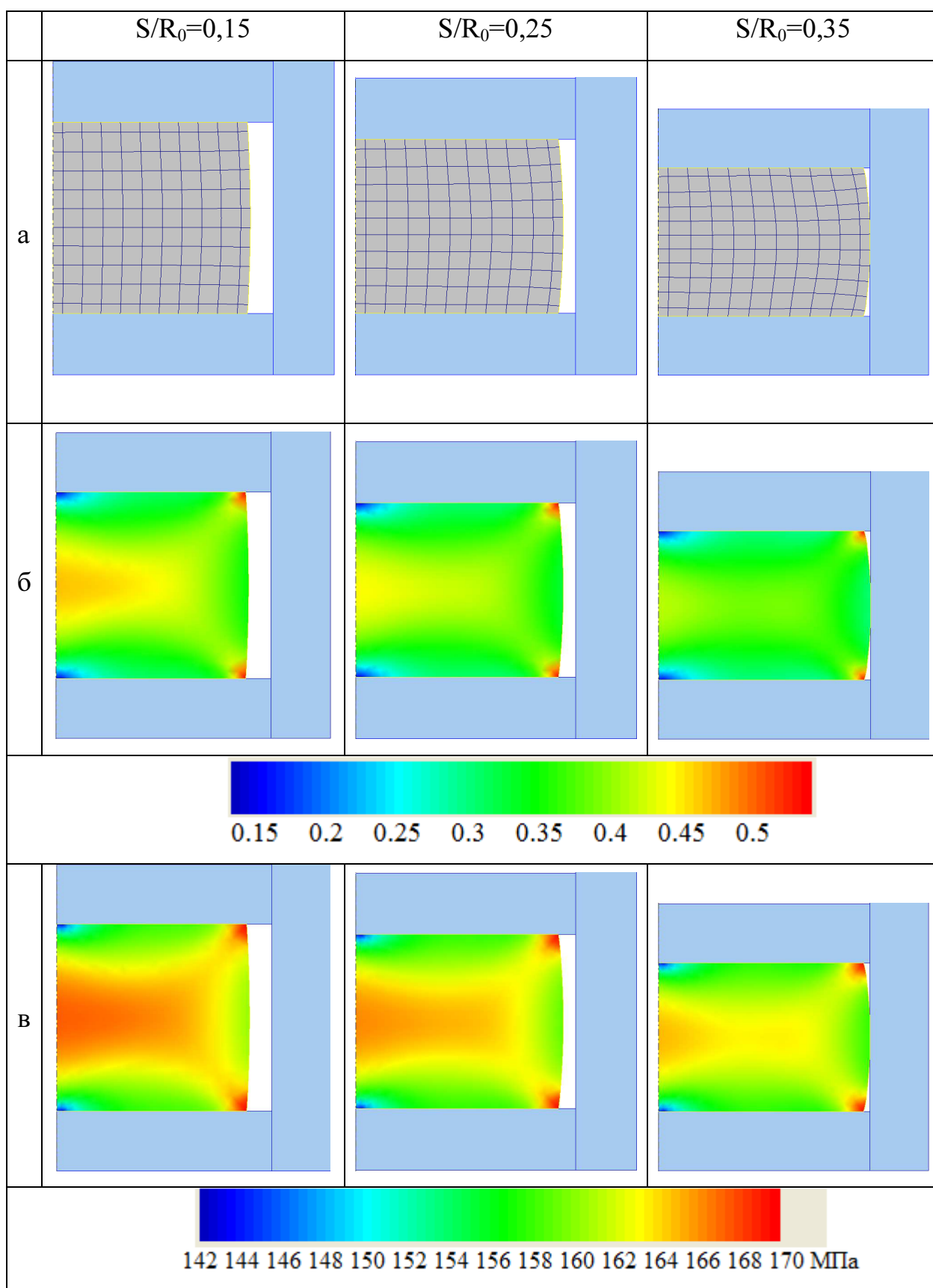


Рисунок В.1 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій E_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа(в) по ходу деформування в процесі закритої осадки при $h/d=0,6$

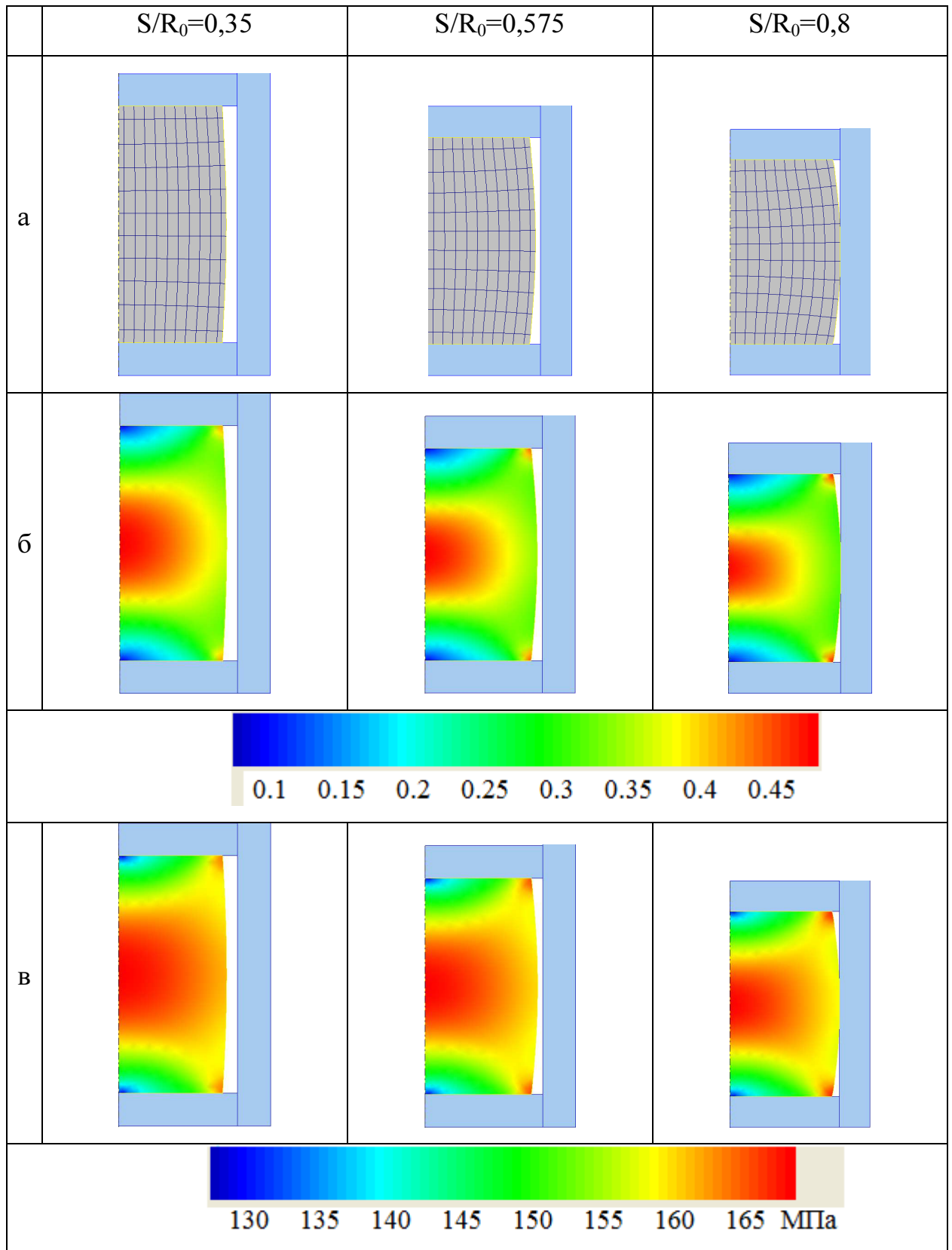


Рисунок В.2 – Викривлення ділільної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій E_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа(в) по ходу деформування в процесі закритої осадки при $h/d = 1,4$

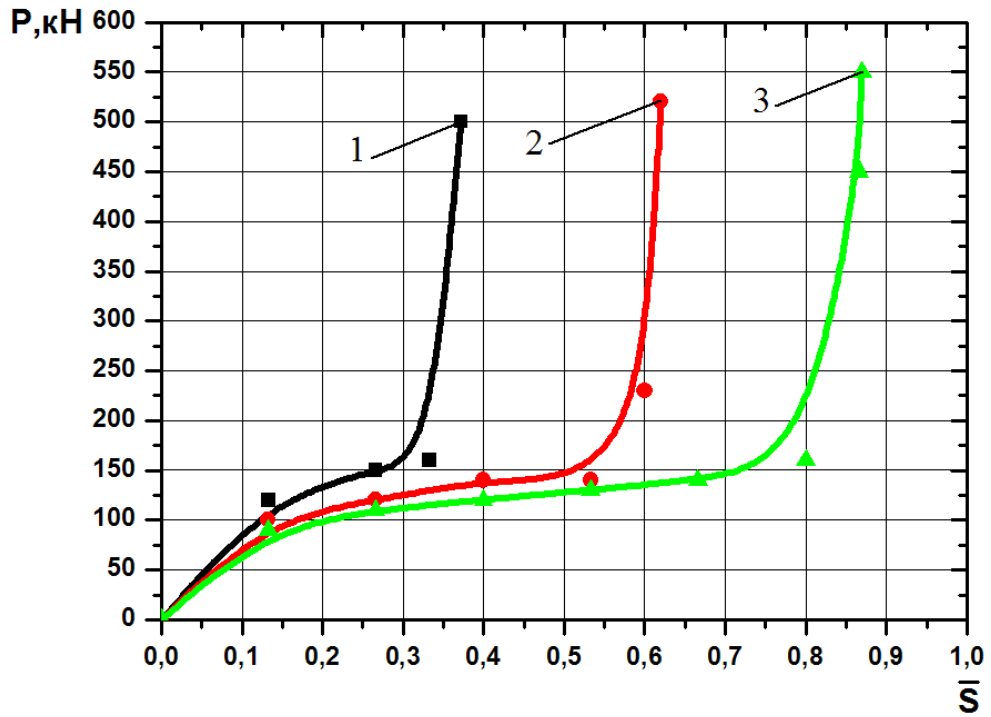


Рисунок В.3 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $\mu = 0,05$ де 1 – $h/d = 0,6$; 2 – $h/d = 1,0$; 3 – $h/d = 1,4$

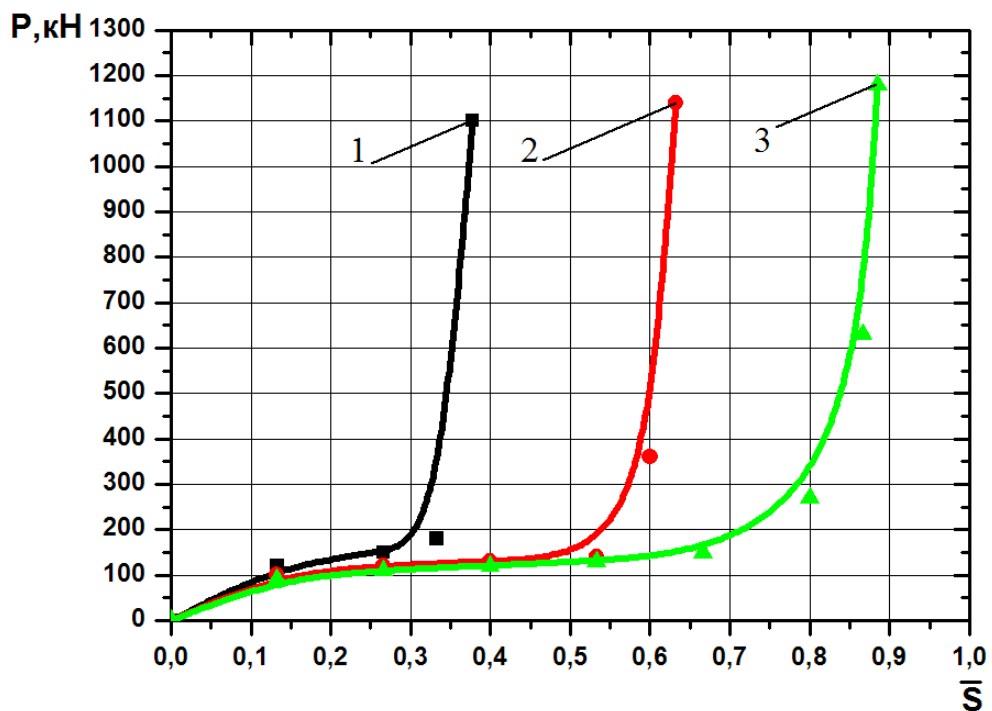


Рисунок В.4 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $\mu = 0,3$ де 1 – $h/d = 0,6$; 2 – $h/d = 1,0$; 3 – $h/d = 1,4$

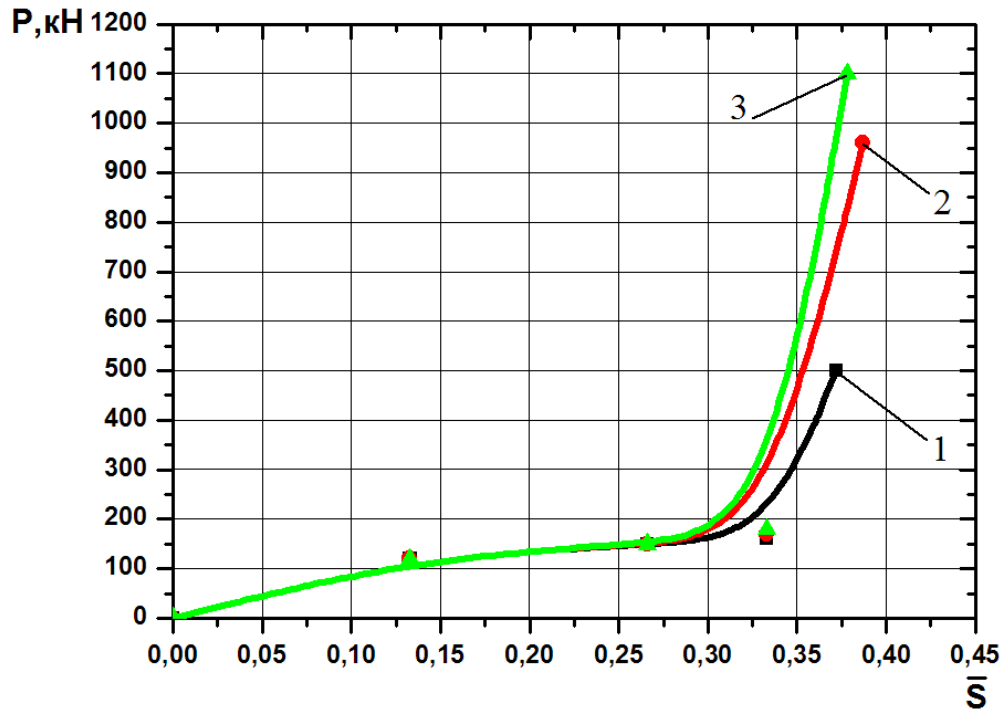


Рисунок В.5 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $h/d=0,6$ де 1 – $\mu = 0,05$; 2 – $\mu = 0,15$; 3 – $\mu = 0,3$

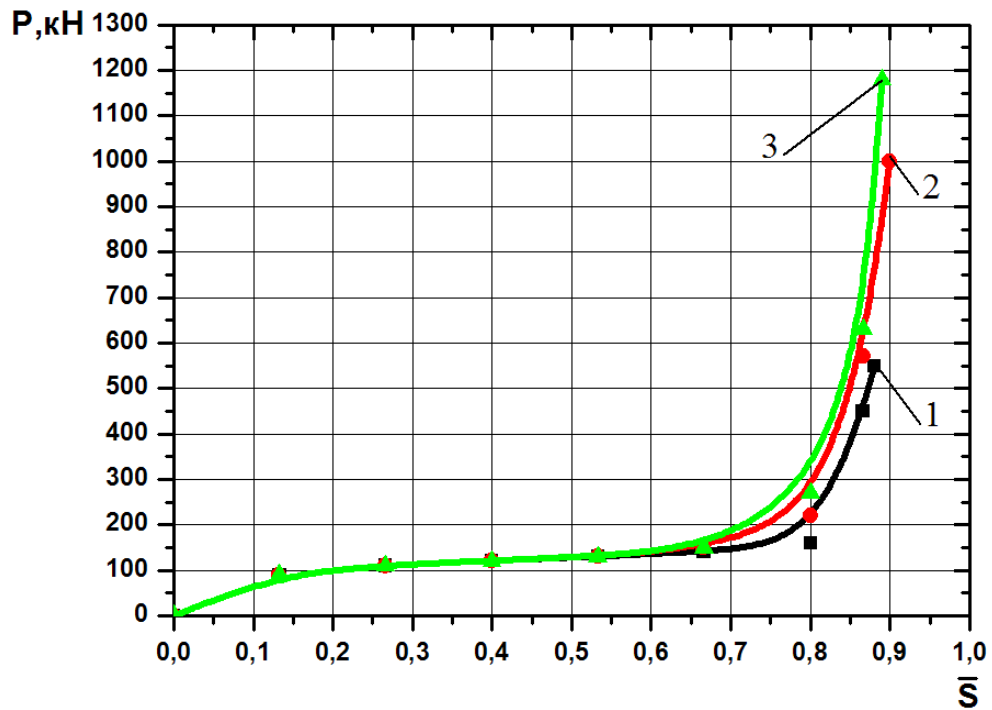


Рисунок В.6 – Графік залежності сили від відносного ходу процесу закритої осадки при $h/d=1,4$ де 1 – $\mu = 0,05$; 2 – $\mu = 0,15$; 3 – $\mu = 0,3$

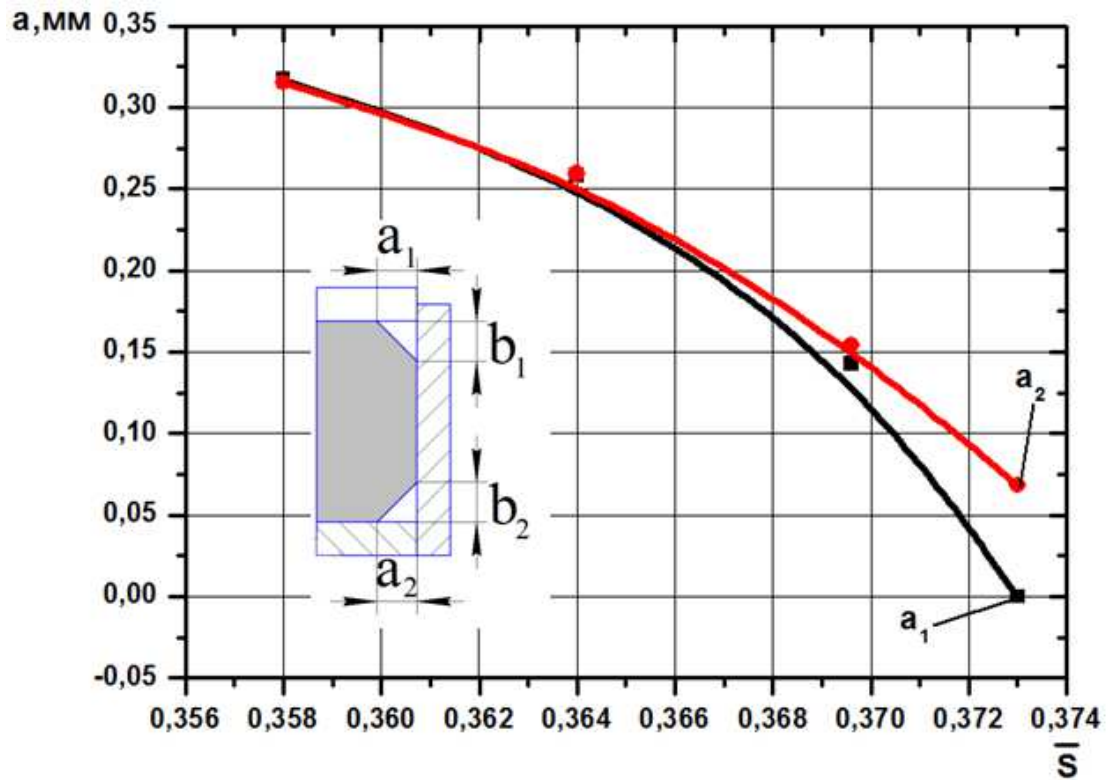


Рисунок В.7 – Графік залежності заповнення кута біля плит від відносного ходу процесу закритої осадки при: $h/d = 0,6$; $\mu = 0,08$

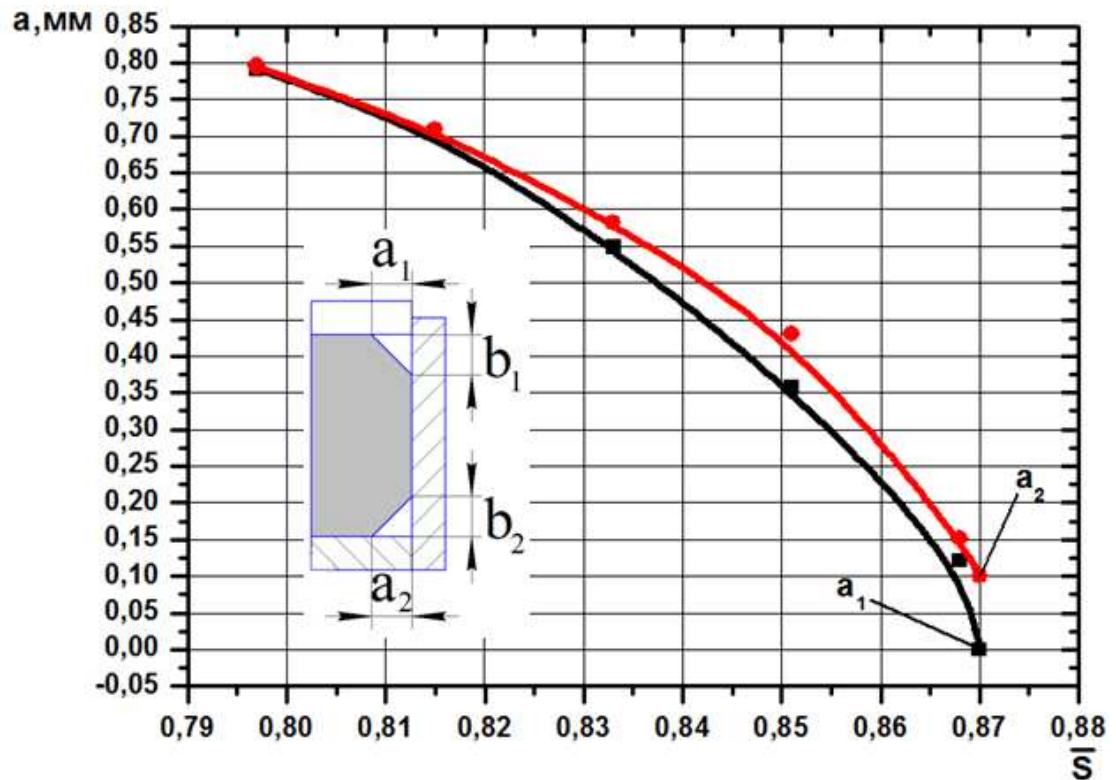


Рисунок В.8 – Графік залежності заповнення кута біля плит від відносного ходу процесу закритої осадки при: $h/d = 1,4$; $\mu = 0,08$

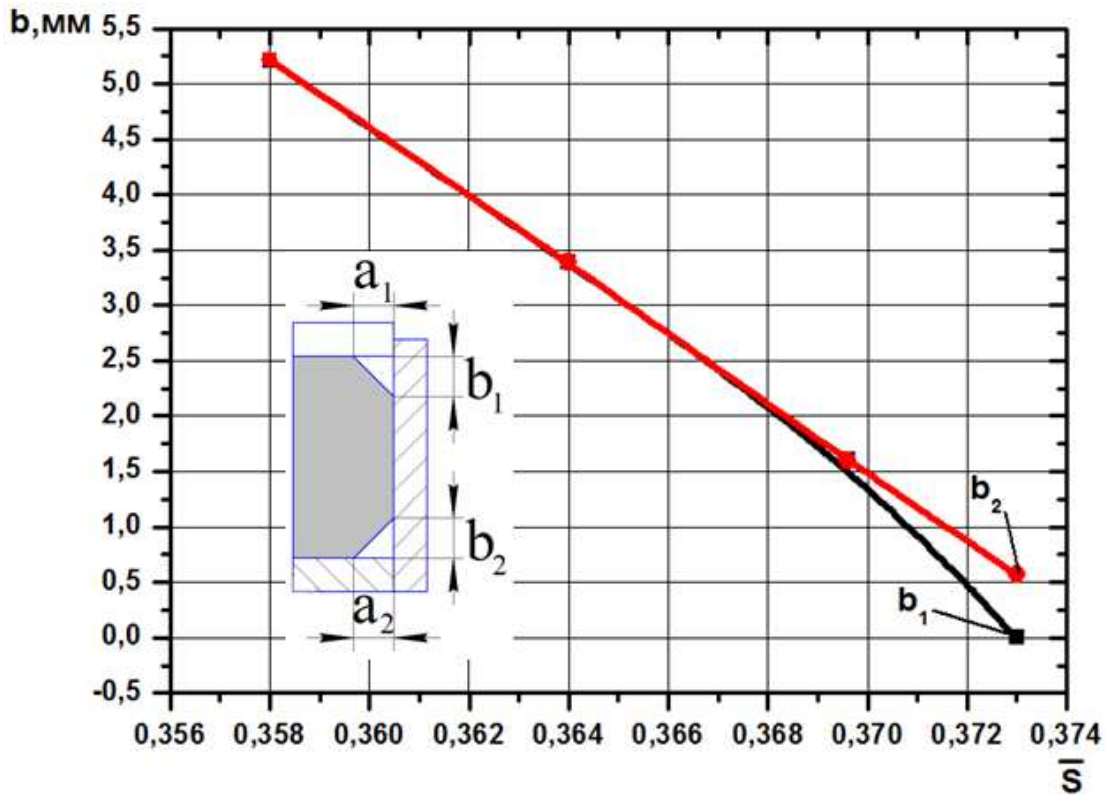


Рисунок В.9 – Графік залежності заповнення кута біля стінки матриці від відносного ходу процесу закритої осадки при: $h/d = 0,6$; $\mu = 0,08$

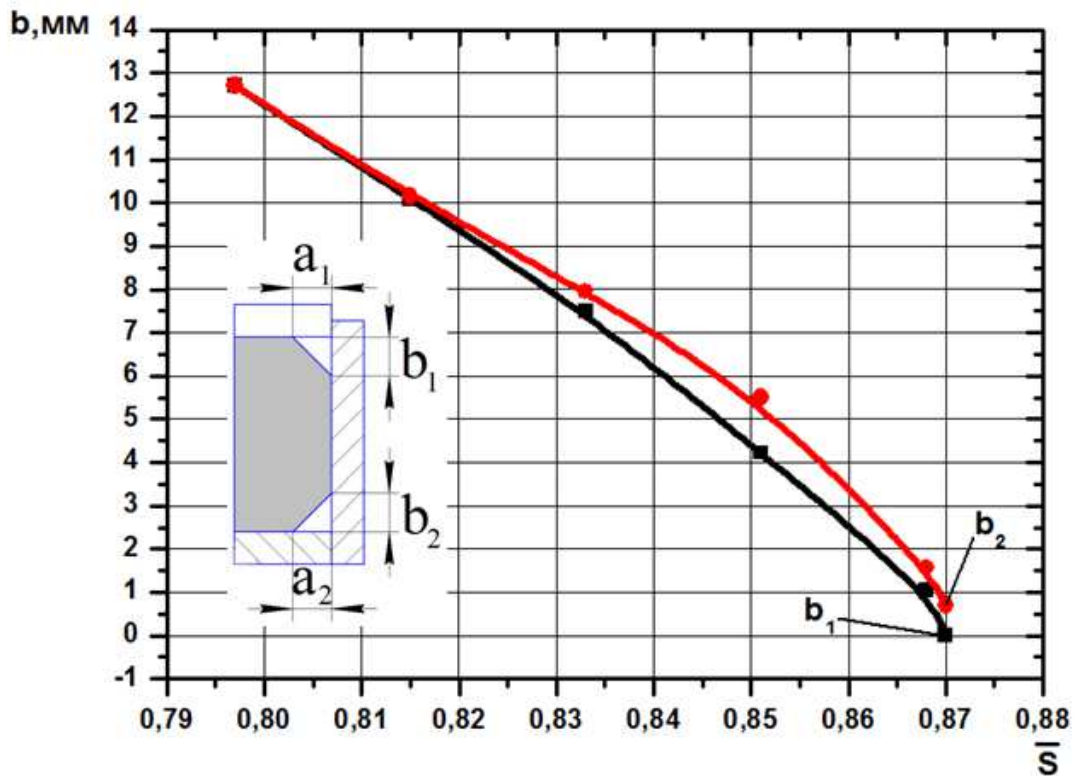


Рисунок В.10 – Графік залежності заповнення кута біля стінки матриці від відносного ходу процесу закритої осадки при: $h/d = 1,4$; $\mu = 0,08$

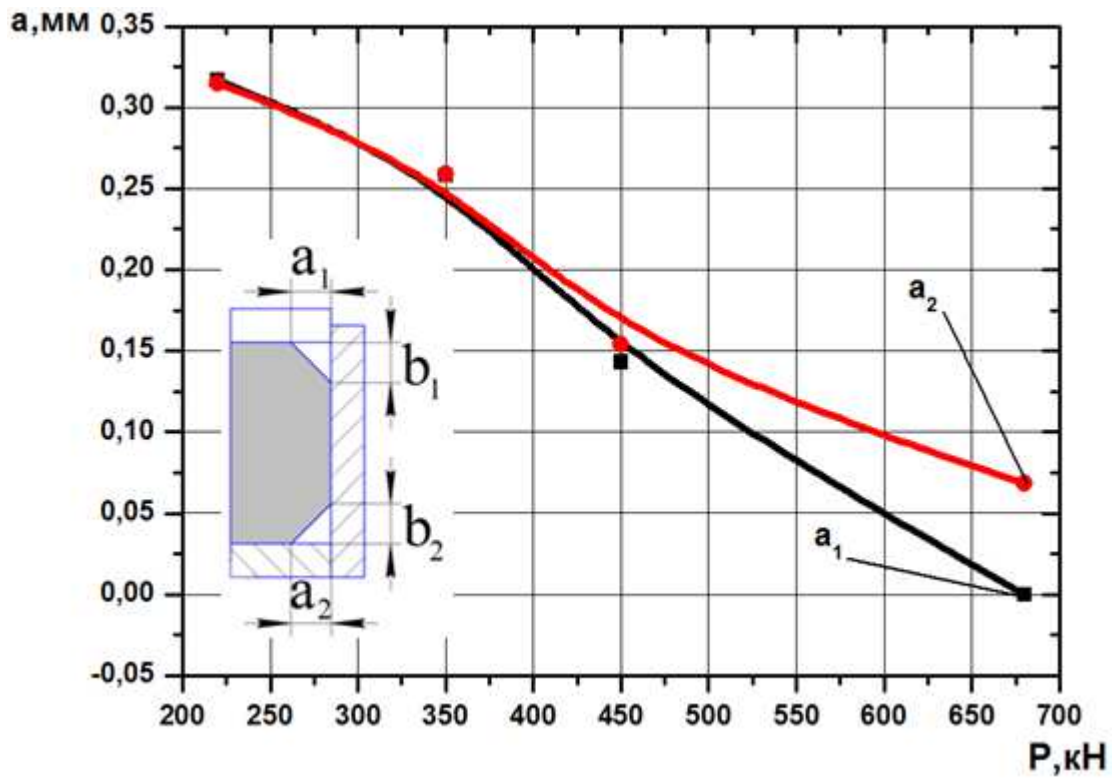


Рисунок В.11 – Графік залежності заповнення кута біля плит від сили процесу закритої осадки при: $h/d = 0,6$; $\mu = 0,08$

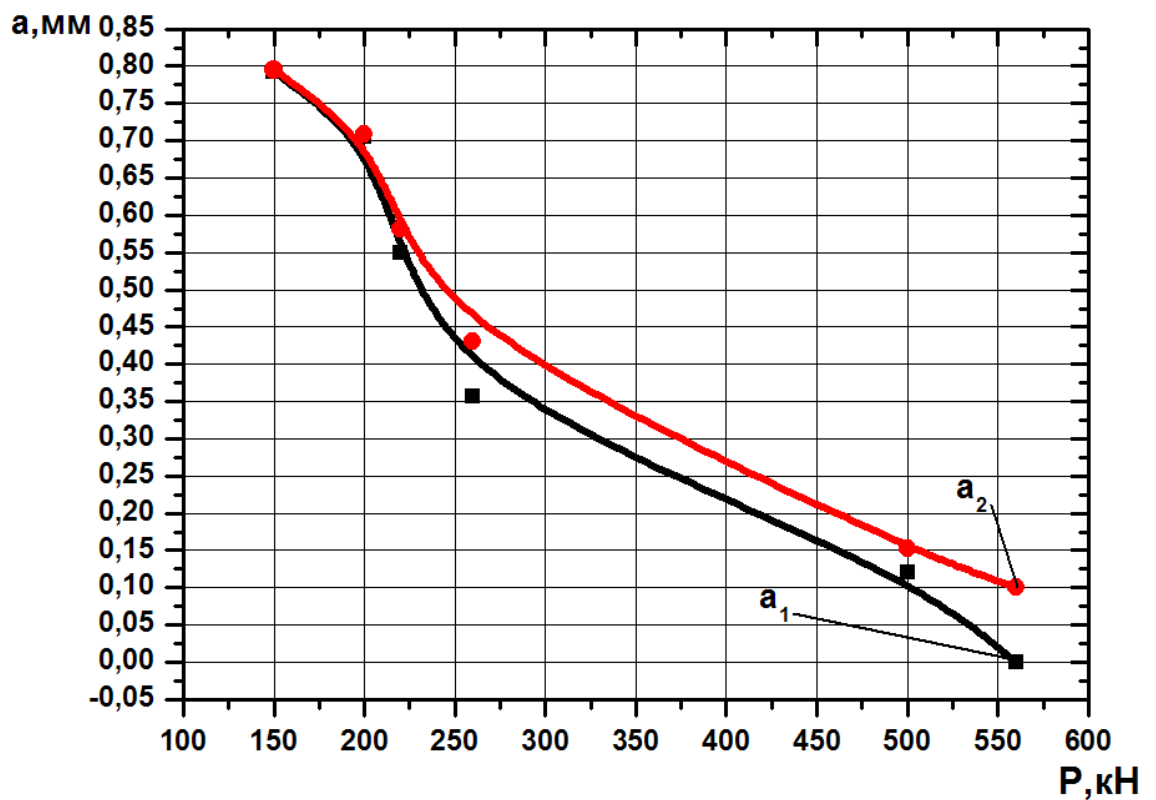


Рисунок В.12 – Графік залежності заповнення кута біля плит від сили процесу закритої осадки при: $h/d = 1,4$; $\mu = 0,08$

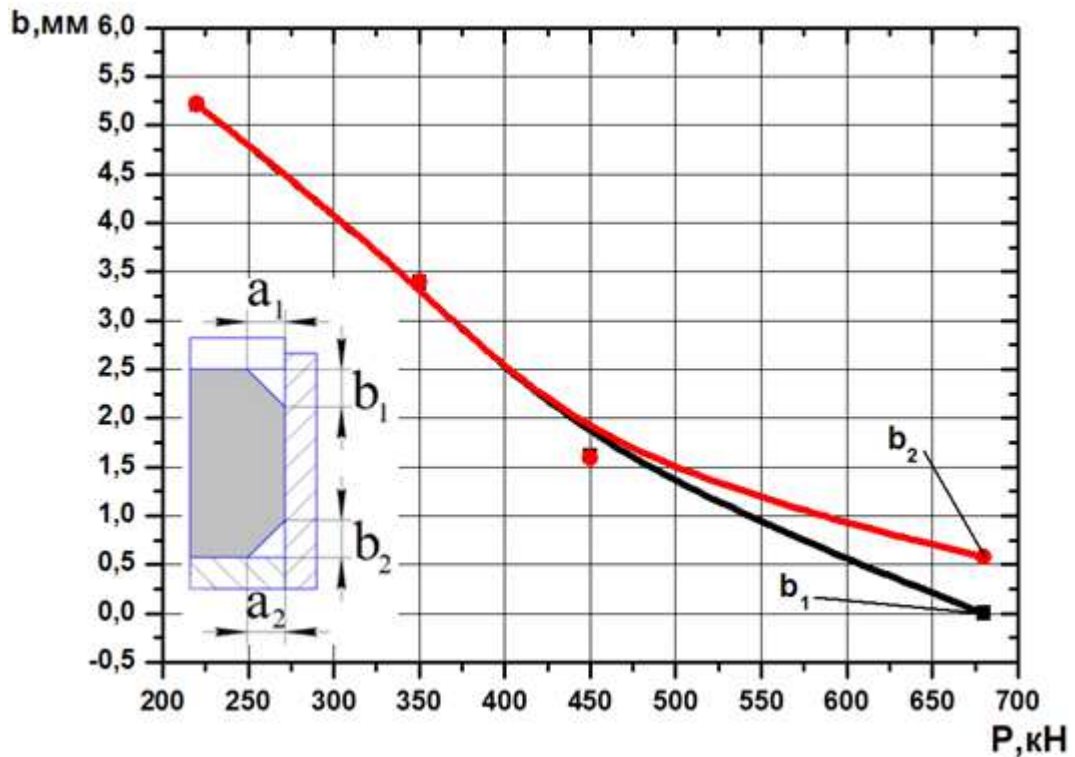


Рисунок В.13 – Графік залежності заповнення кута біля стінами матриці від сили процесу закритої осадки при: $h/d = 0,6$; $\mu = 0,08$

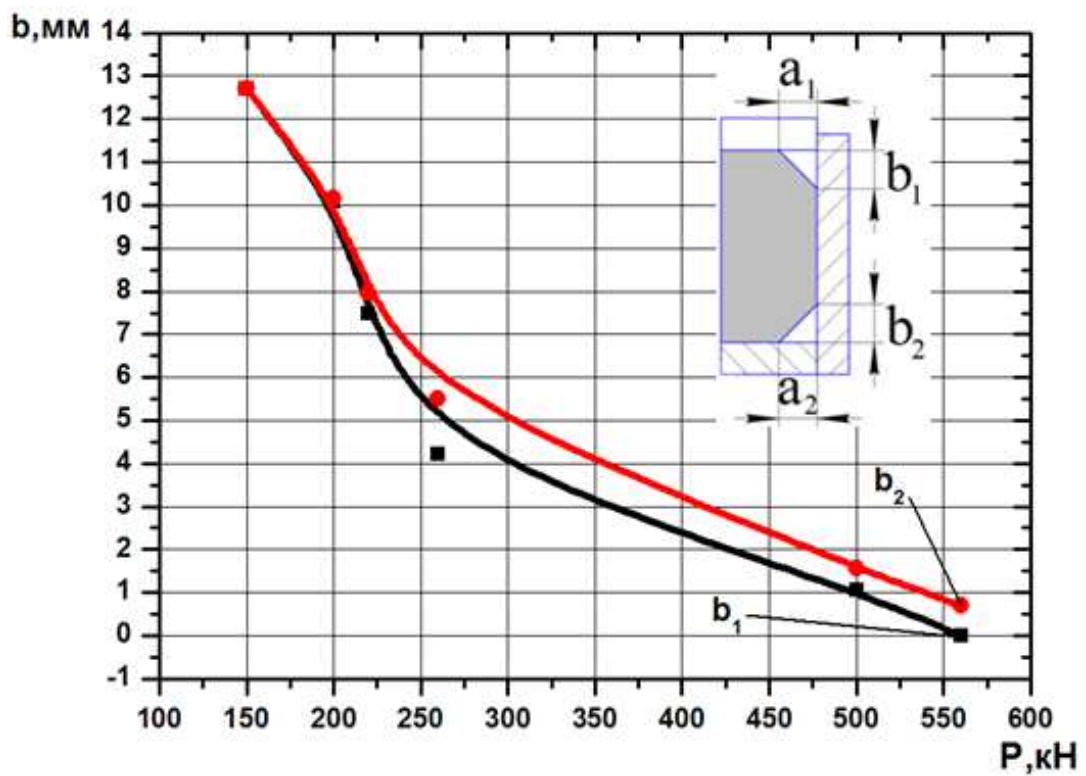
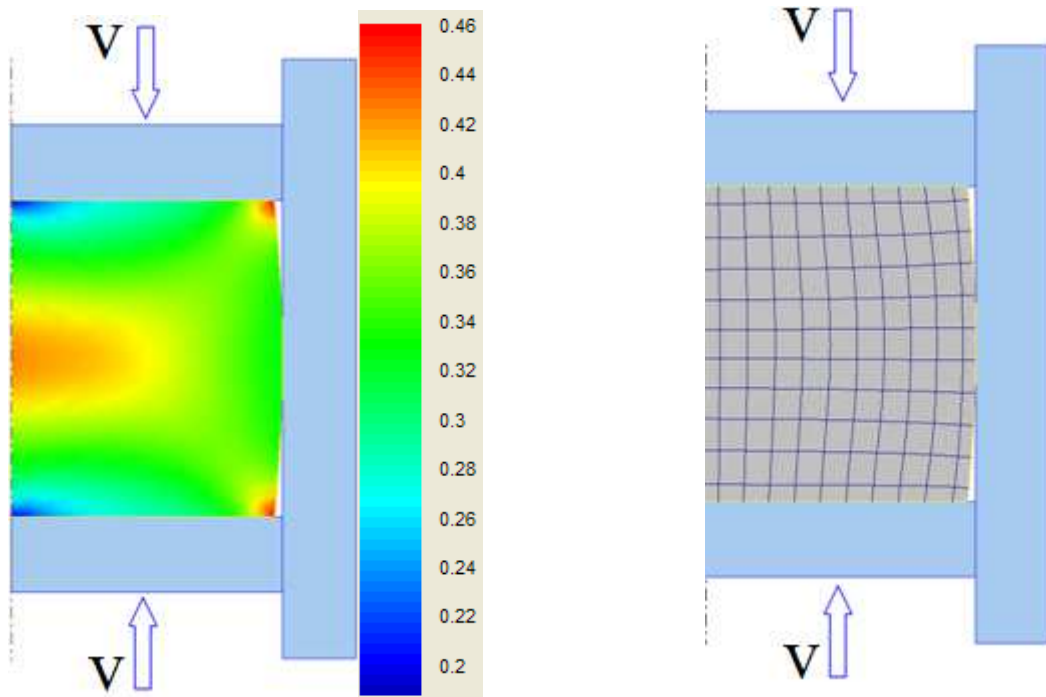
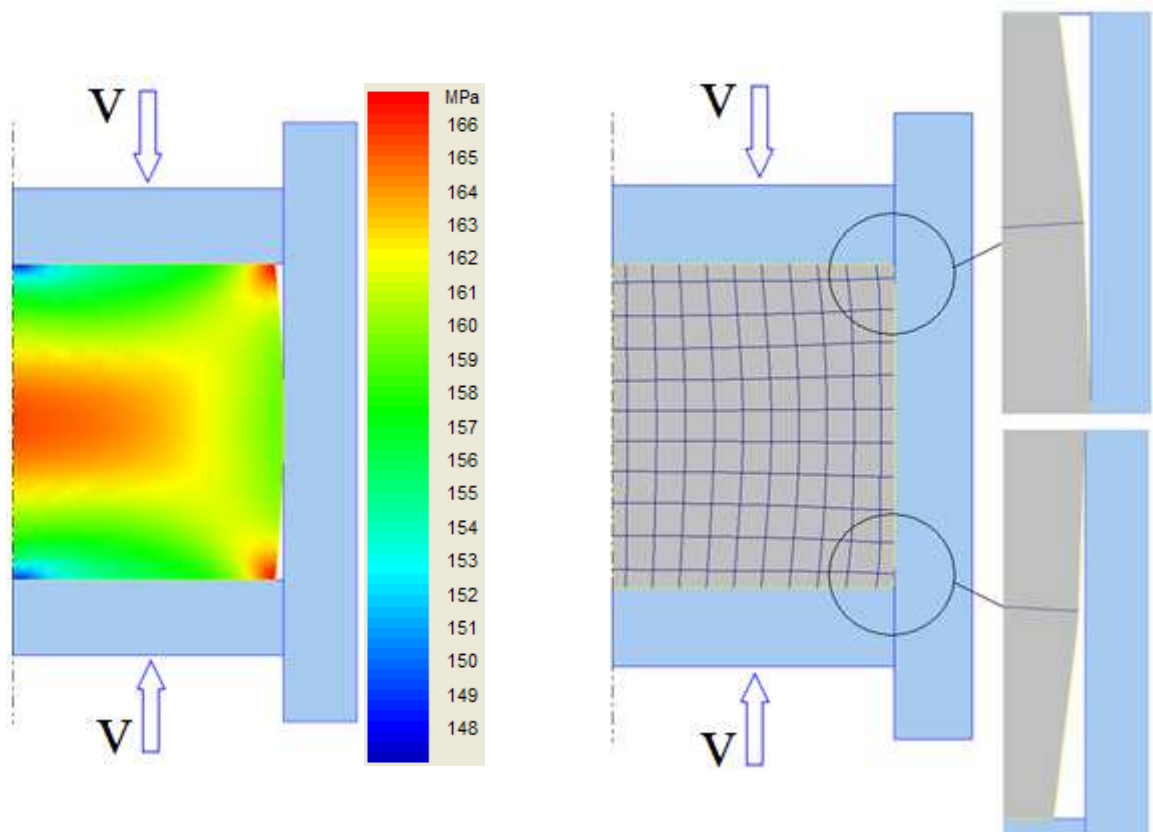


Рисунок В.14 – Графік залежності заповнення кута біля стінами матриці від сили процесу закритої осадки при: $h/d = 1,4$; $\mu = 0,08$

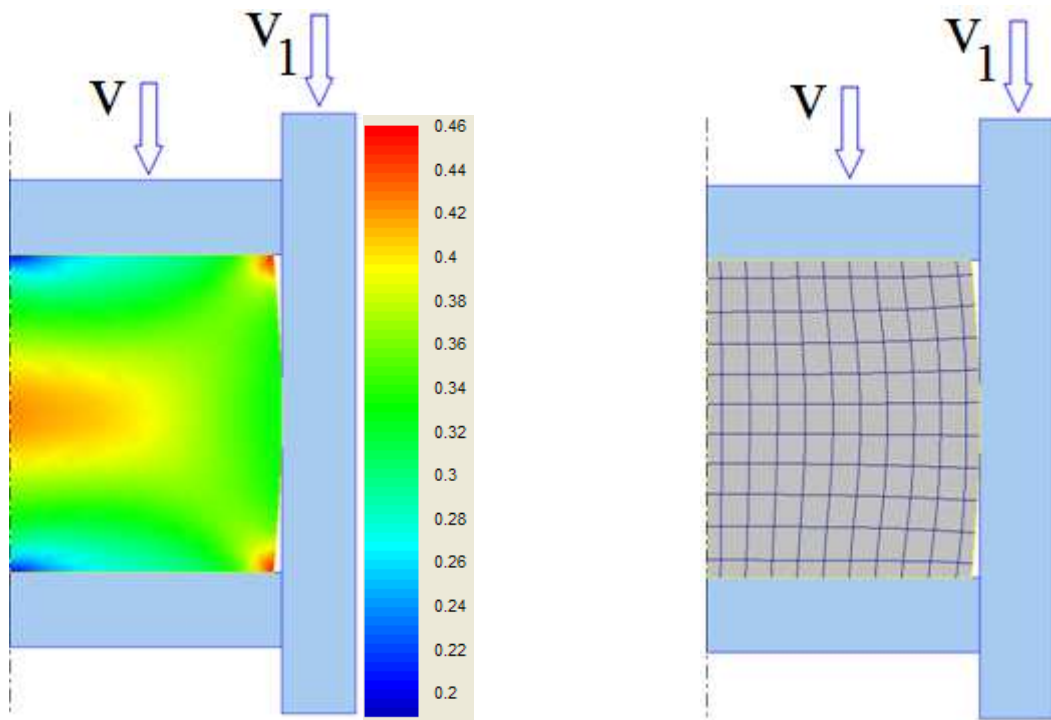


$$S/R_0=0,58$$

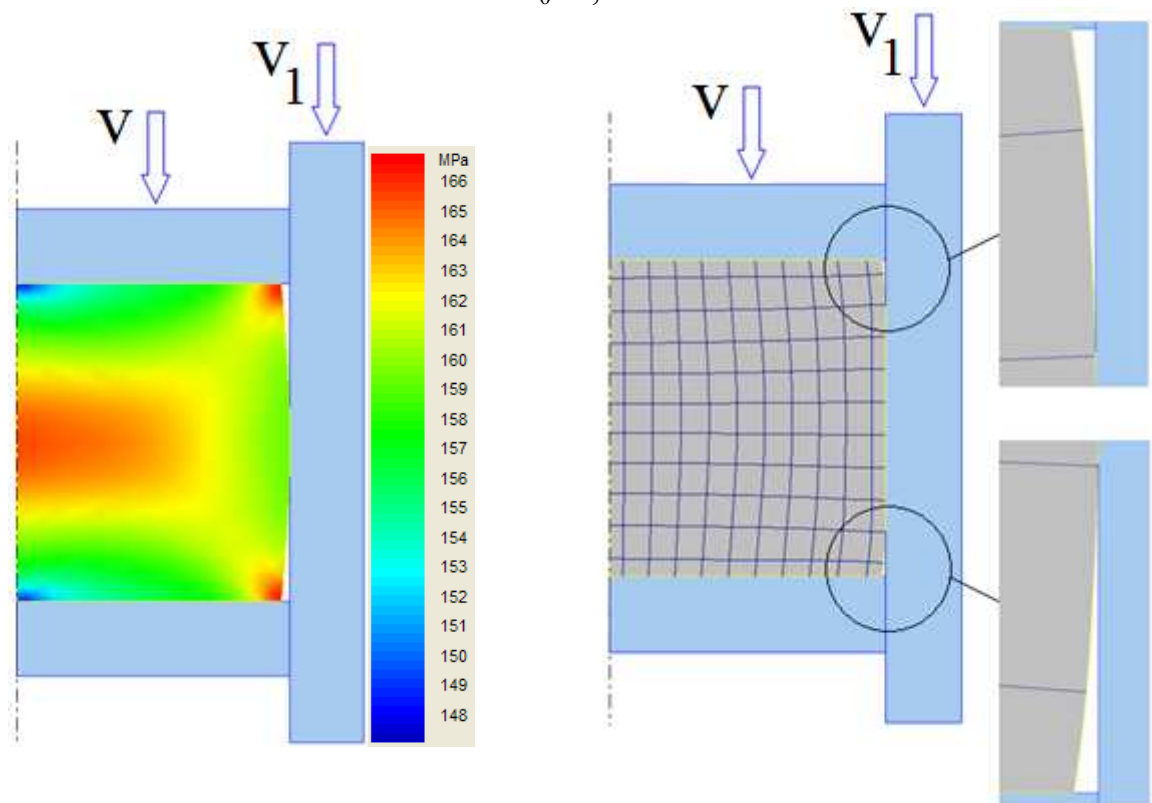


$$S/R_0=0,62$$

Рисунок В.15 – Незаповнення кутів при процесу закритої осадки з двосторонньою подачею: $R_0=15$ мм, $L=30$ мм, $R_1=18$ мм



$S/R_0 = 0.58$



$S/R_0 = 0.62$

Рисунок В.16 – Незаповнення кутів при процесу закритої осадки з двосторонньою подачею в рухомій матриці: $R_0 = 15$ мм, $L = 30$ мм, $R_1 = 18$ мм

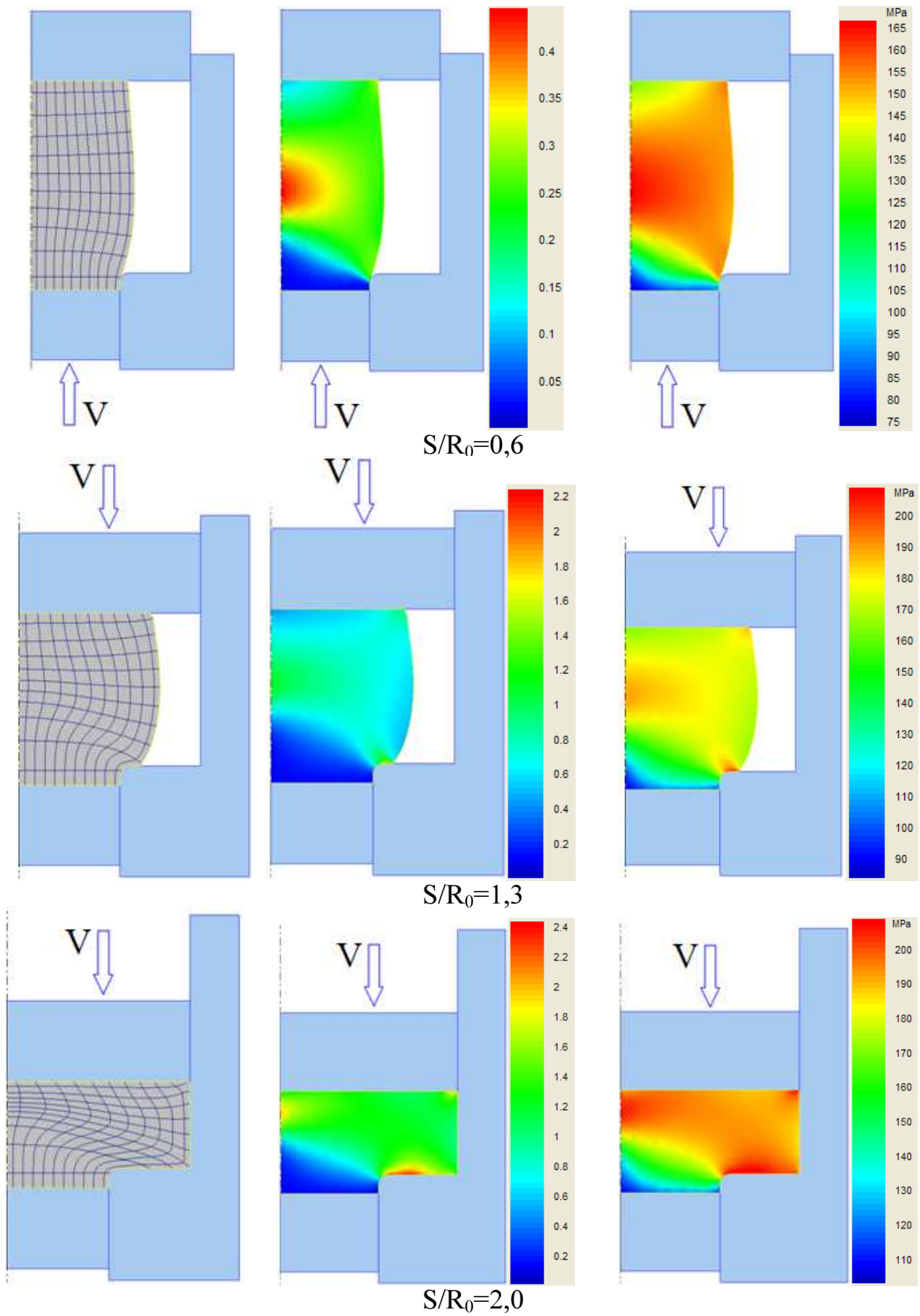


Рисунок В.17 – Викривлення ділянки сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень при поетапному деформуванні процесу закритої осадки

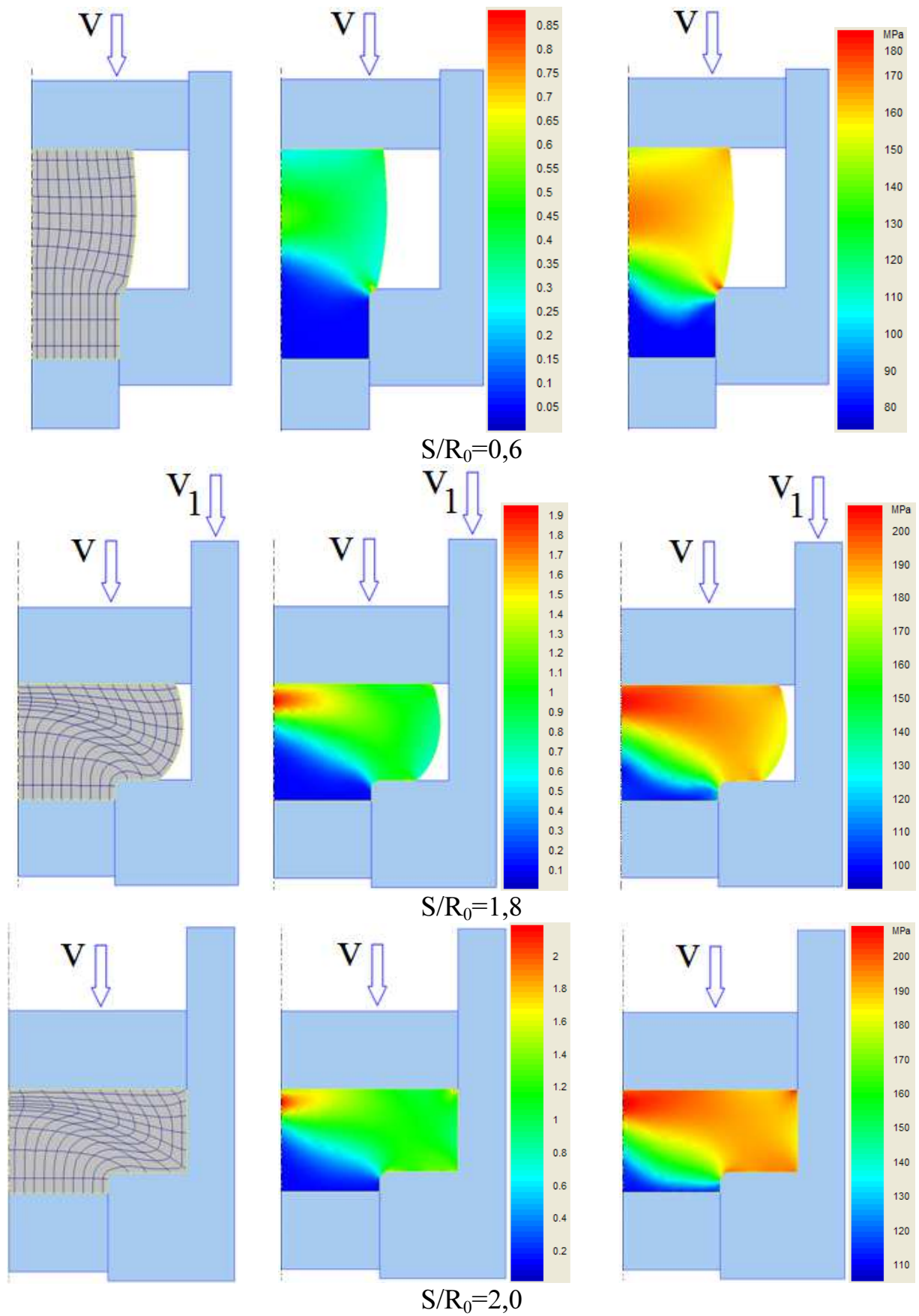


Рисунок В.18 – Викривлення ділянки сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень при поетапному деформуванні процесу закритої осадки в рухомій матриці

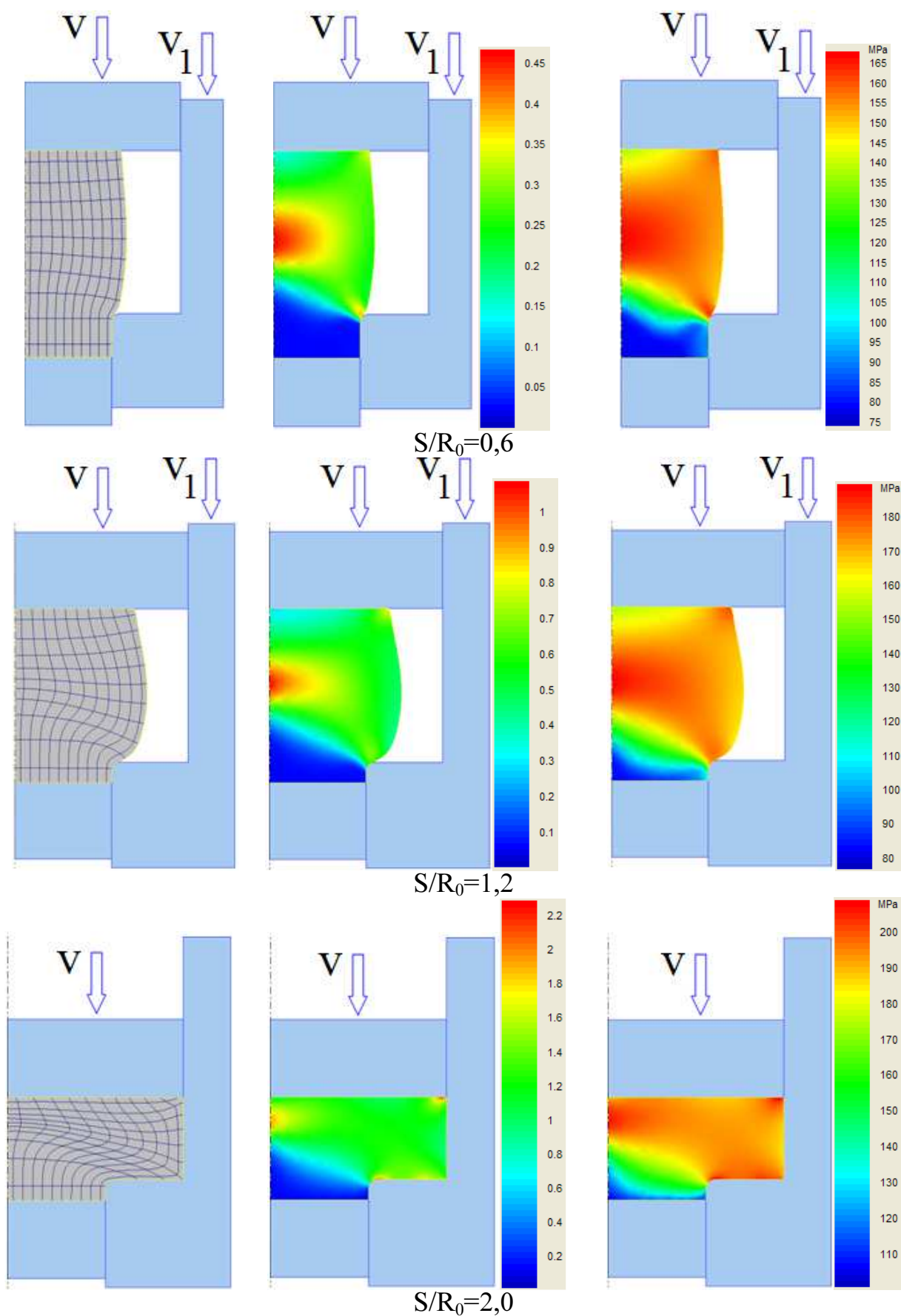


Рисунок В.19 – Викривлення діляльної сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень при поетапному деформуванні процесу закритої осадки в рухомій матриці

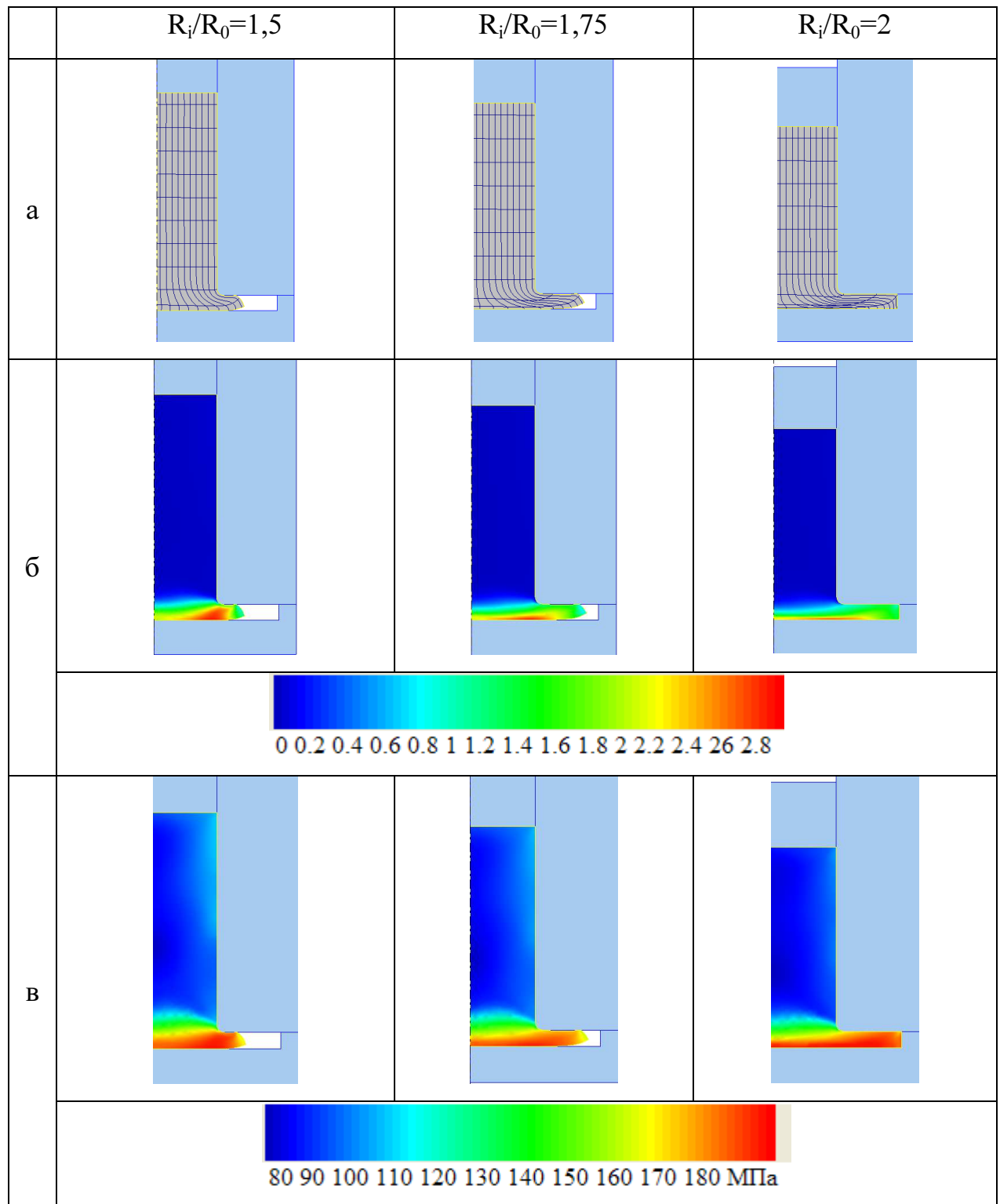


Рисунок Г.1 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при відносному радіусі фланця в процесі закритого радіального видавлювання на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,25$, $r=2$ мм и $\mu=0,08$

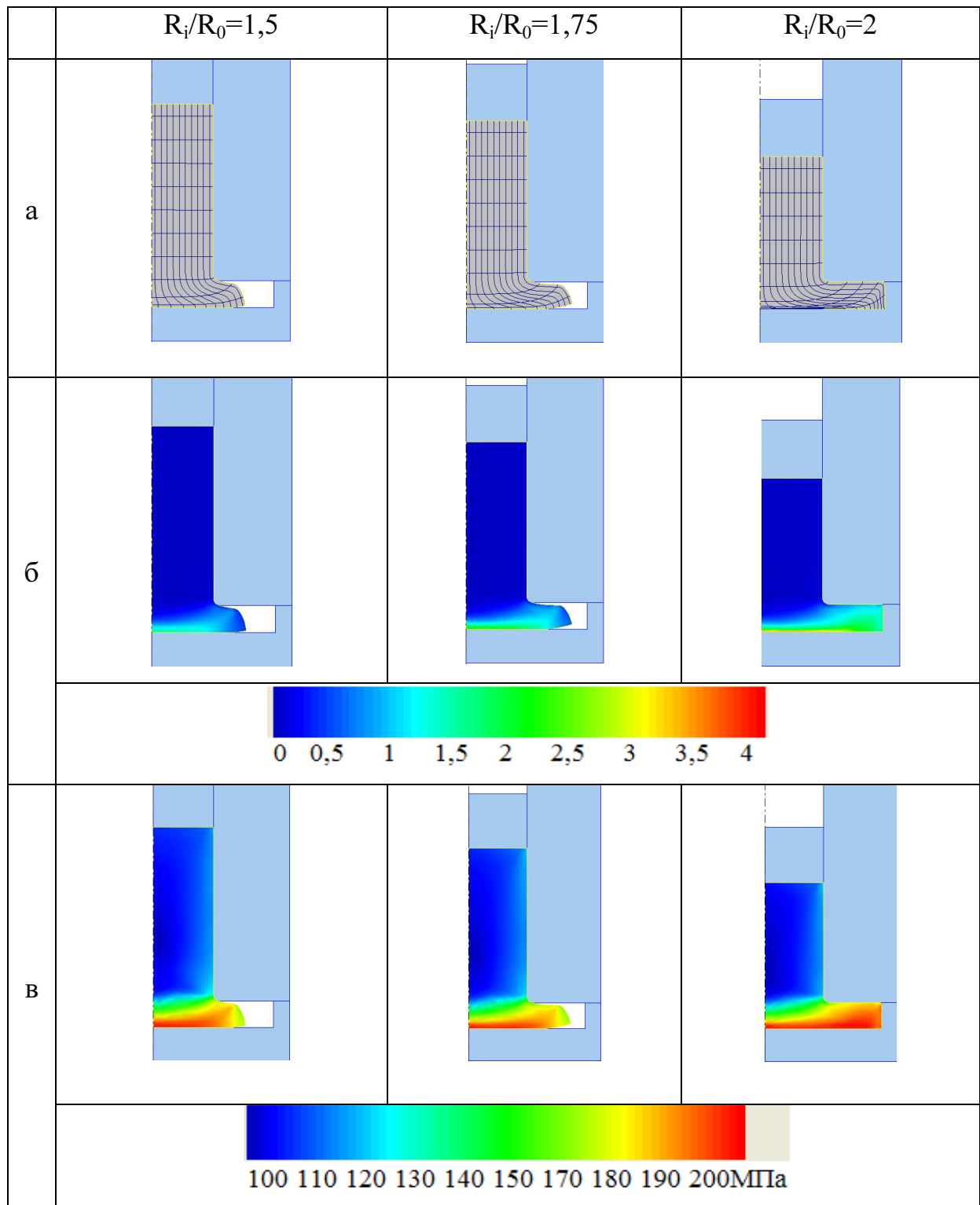


Рисунок Г.2 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при відносному радіусі фланця в процесі закритого радіального видавлювання на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,45$, $r=2$ мм и $\mu=0,08$

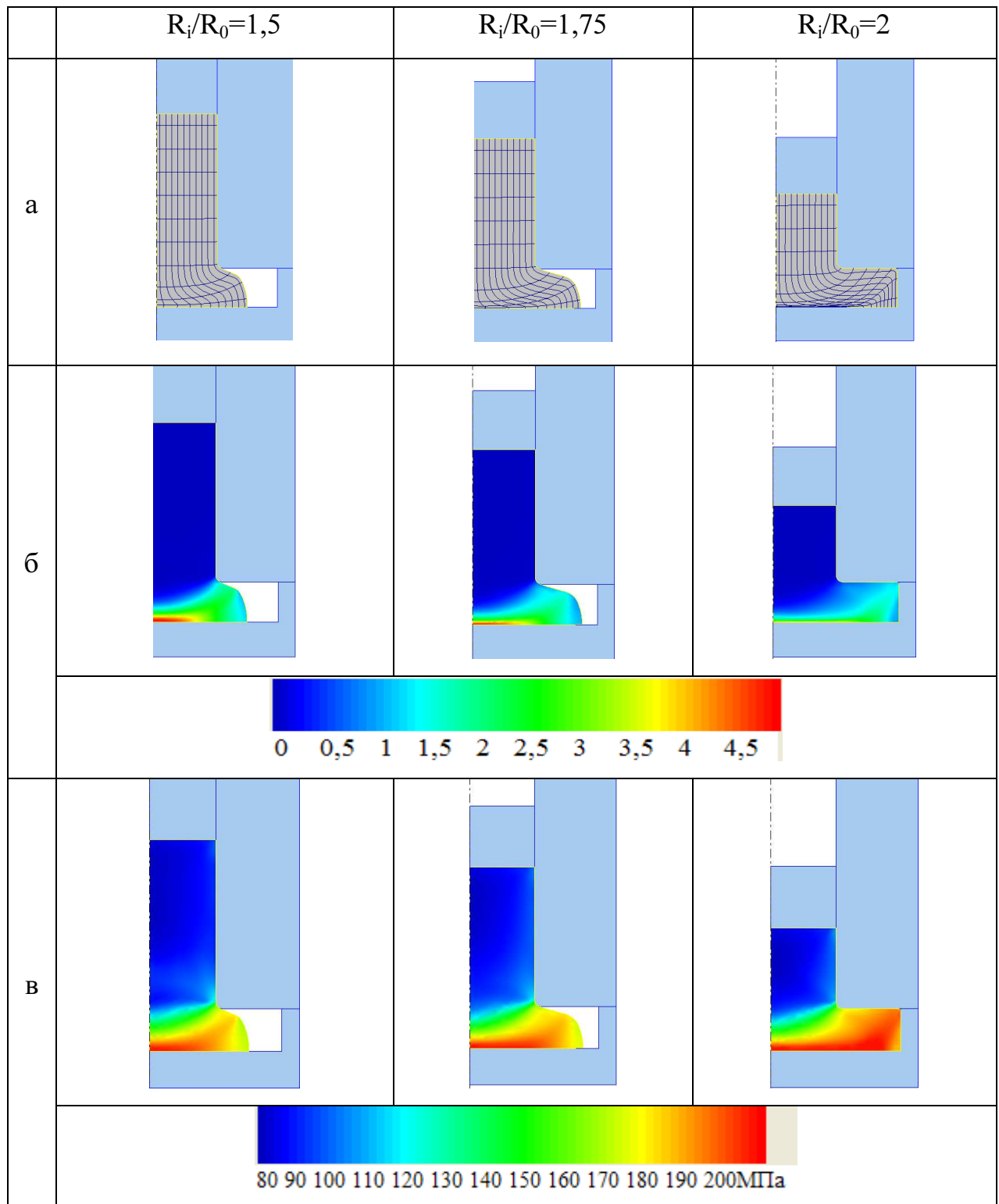


Рисунок Г.3 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при відносному радіусі фланця в процесі закритого радіального видавлювання на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $r=2$ мм и $\mu=0,08$

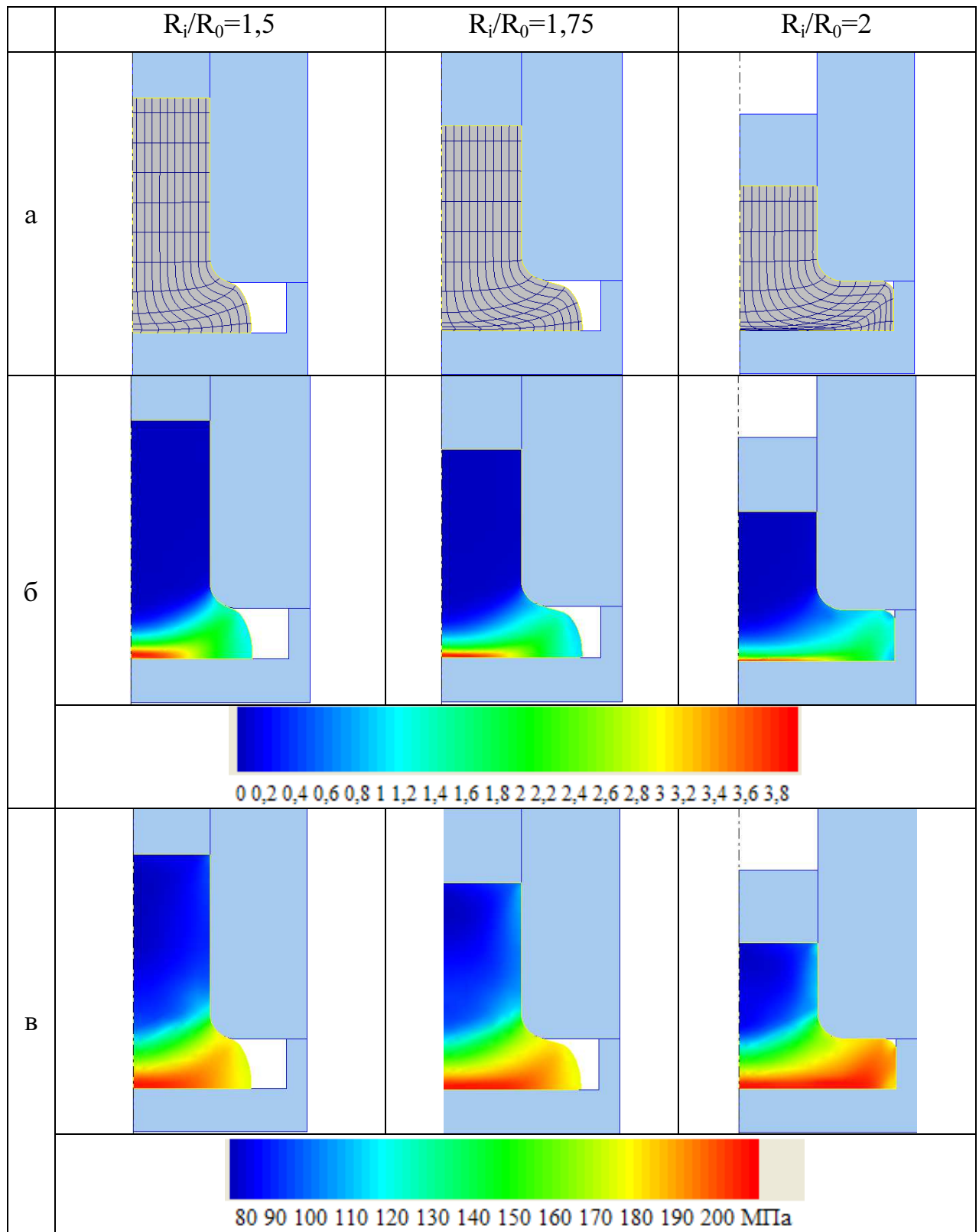


Рисунок Г.4 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $r=6$ мм і $\mu=0,08$

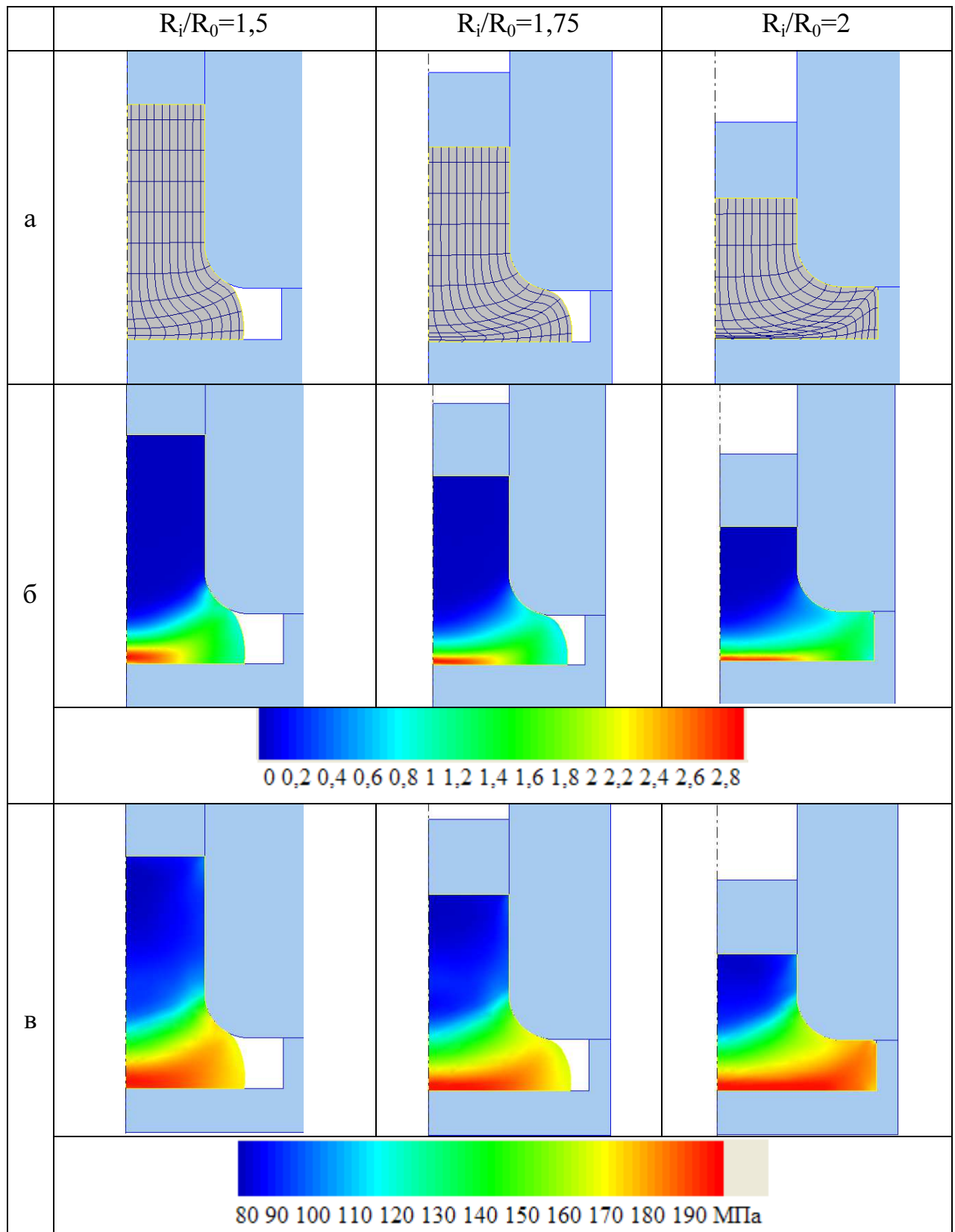


Рисунок Г.5 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $r=10$ мм и $\mu=0,08$

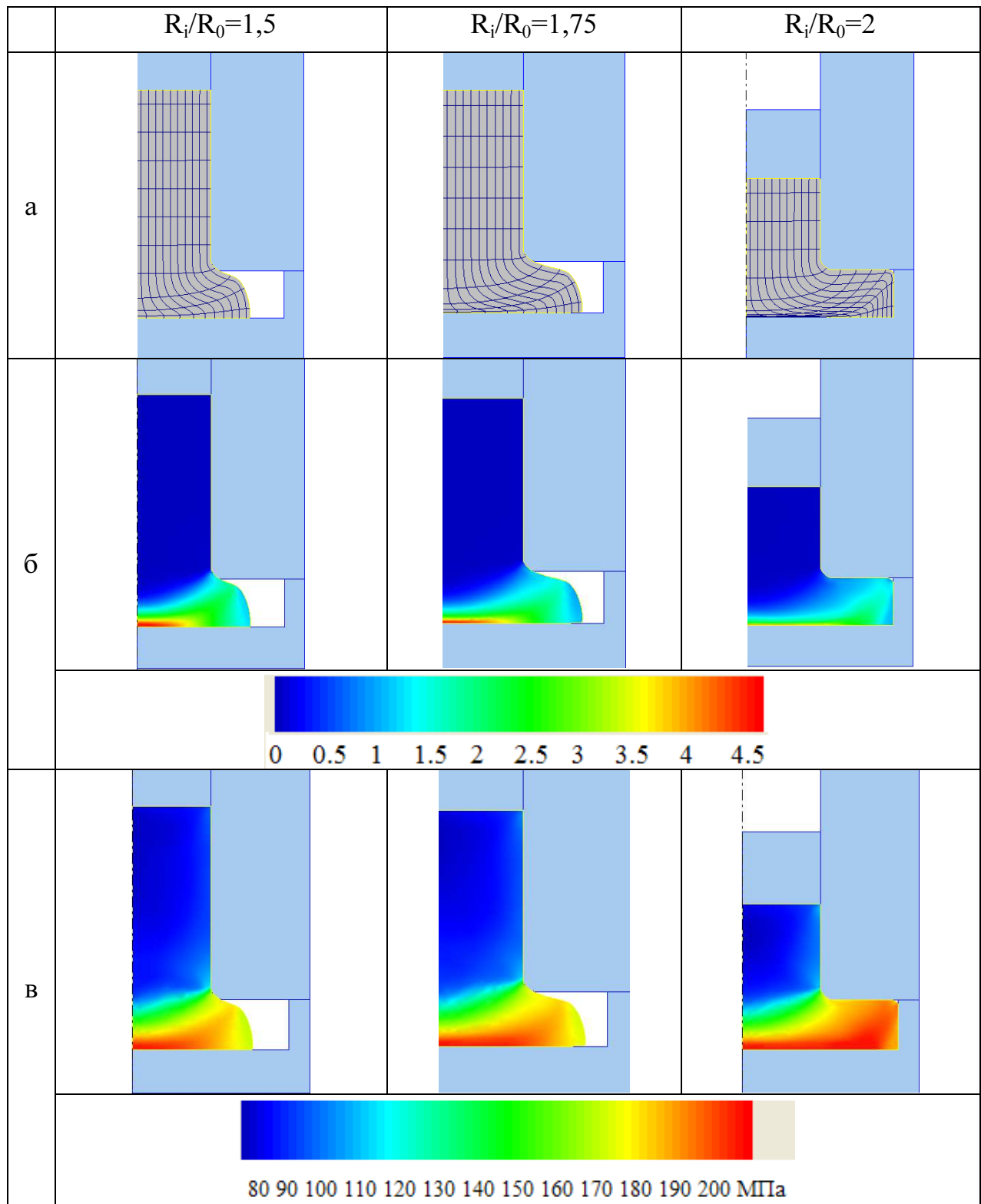


Рисунок Г.6 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $f=2$ мм и $\mu=0,08$

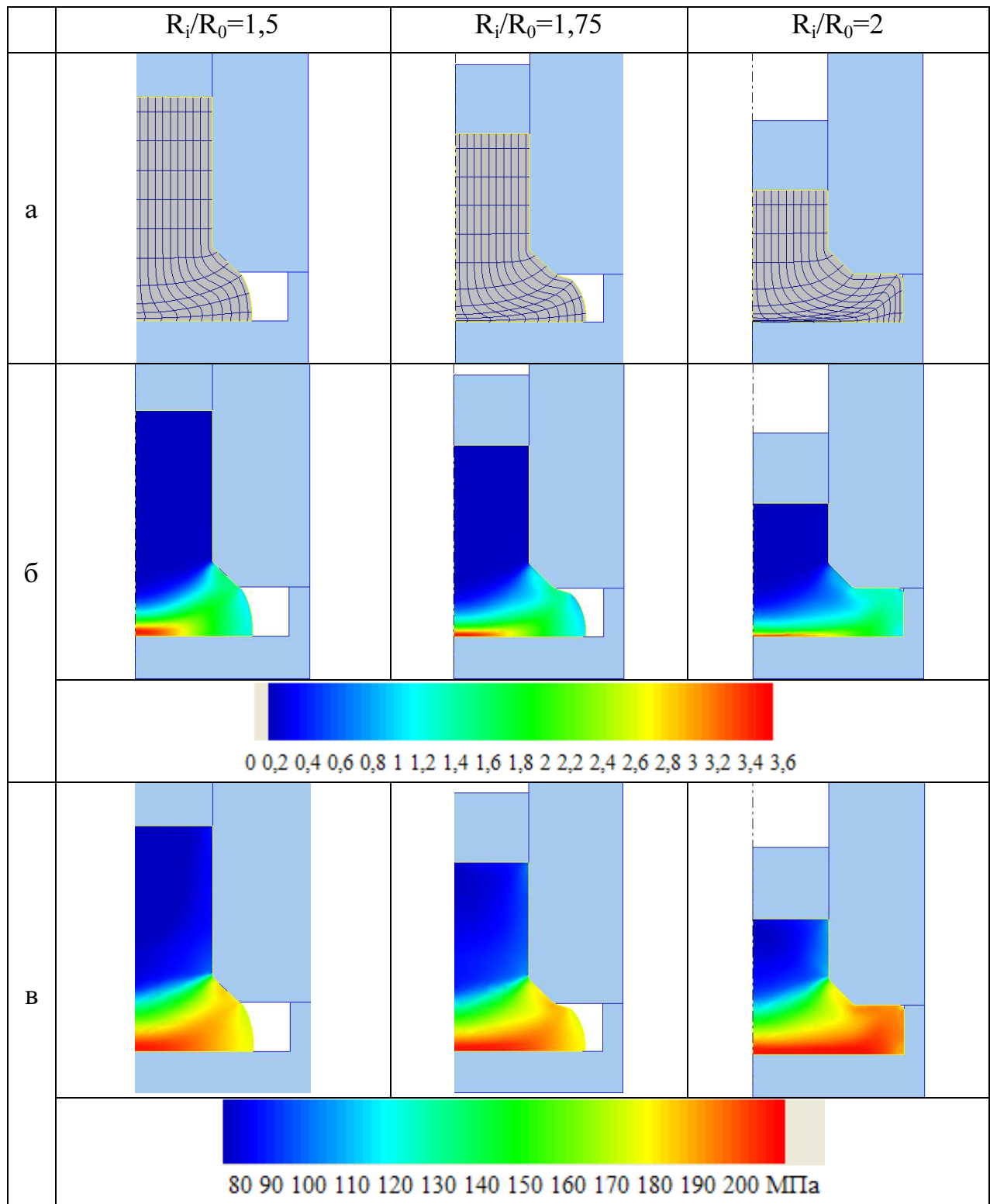


Рисунок Г.7 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $f=6$ мм и $\mu=0,08$

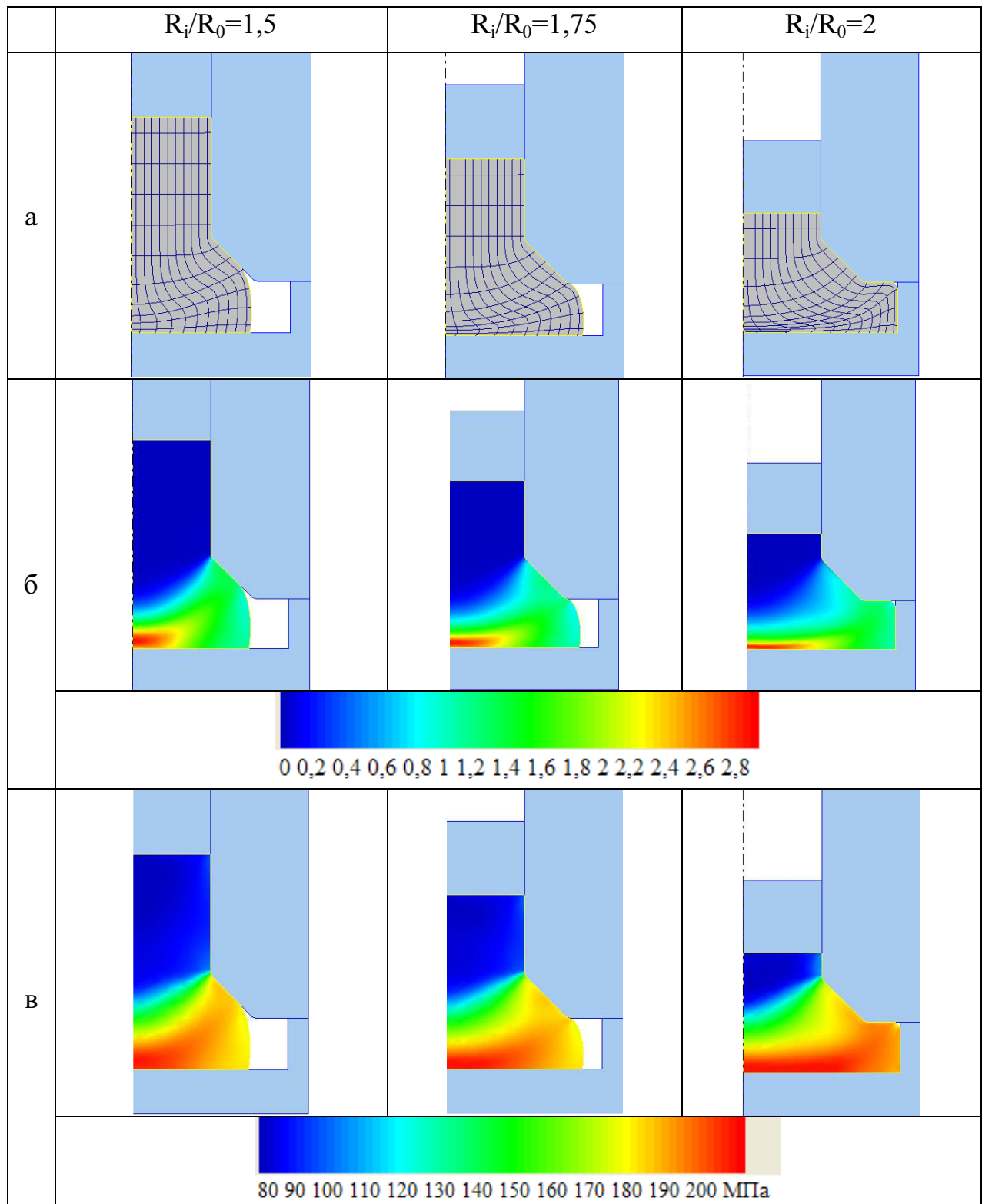
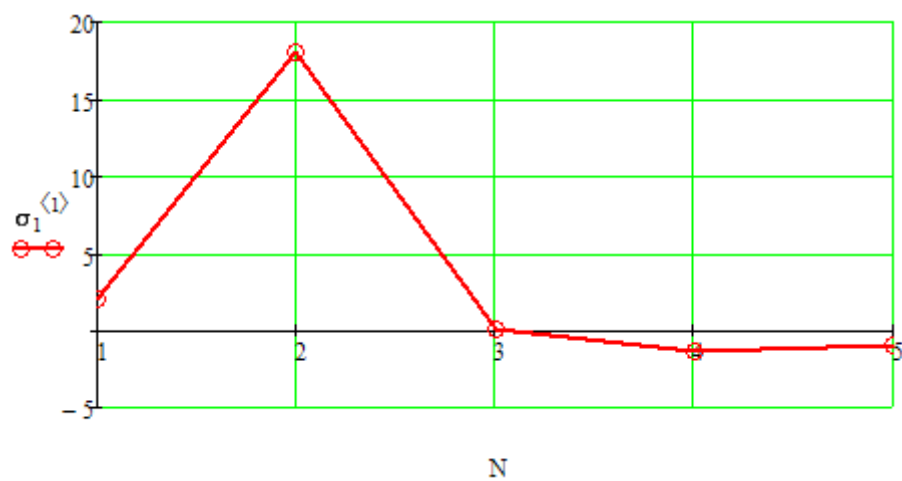
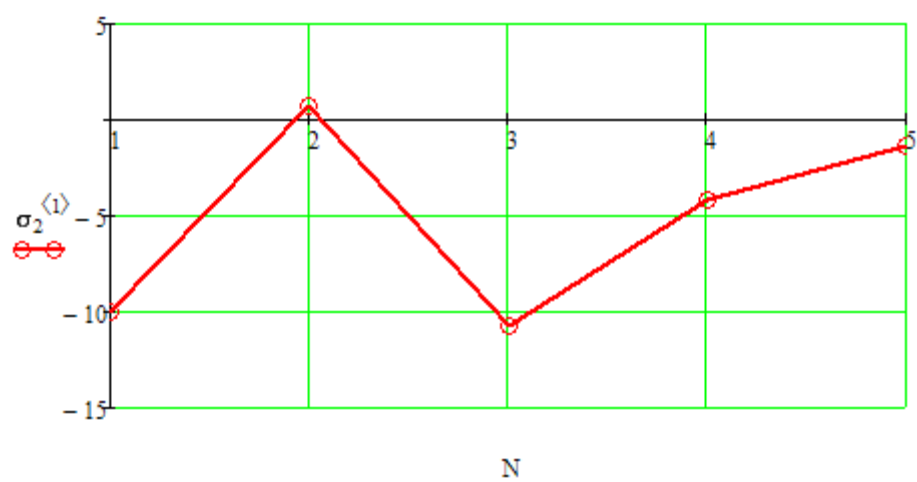


Рисунок Г.8 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні фланця на торці стрижня з односторонньою подачею при $h/R_0=0,65$, $f=10$ мм и $\mu=0,08$

а



б



в

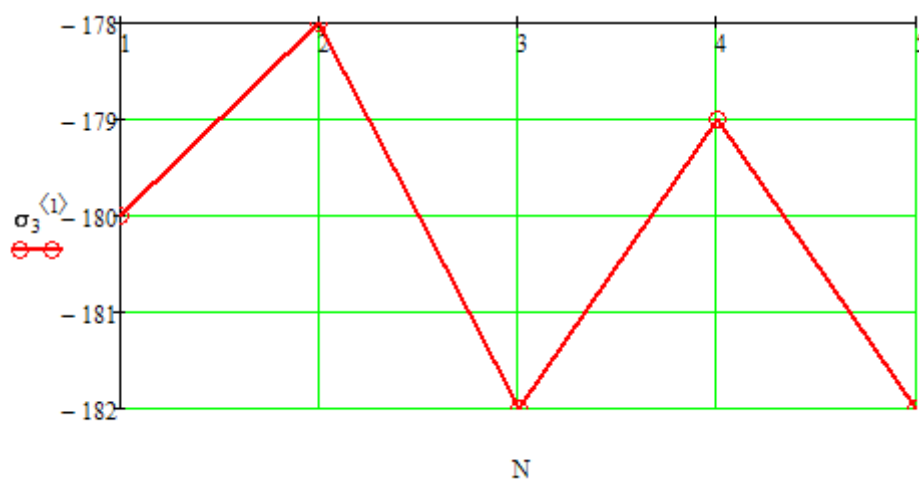
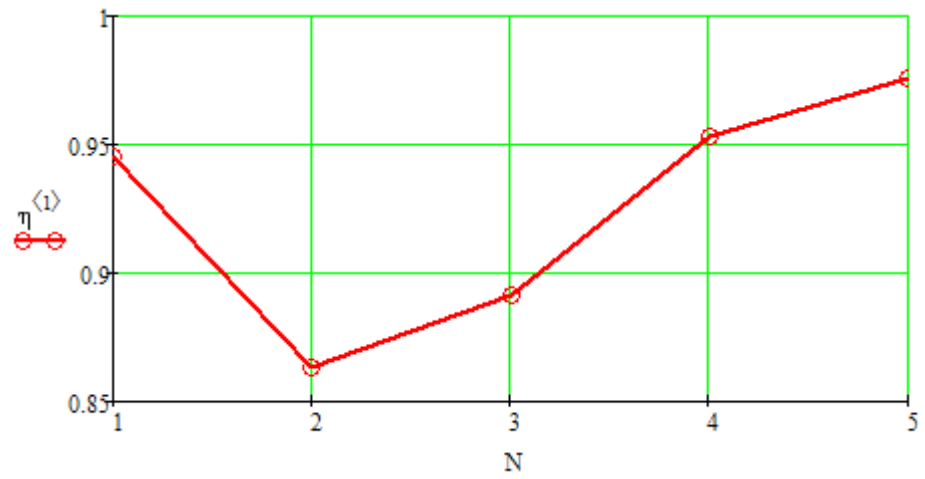
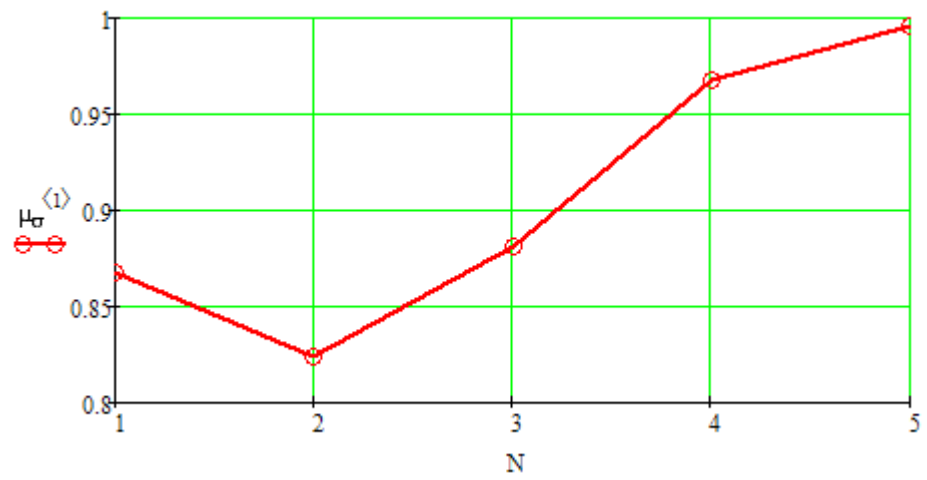


Рисунок Г.9 – Графіки розподілу головних напружень в залежності від положення трасованої точки: а – σ_1 , б – σ_2 , в – σ_3

а



б



в

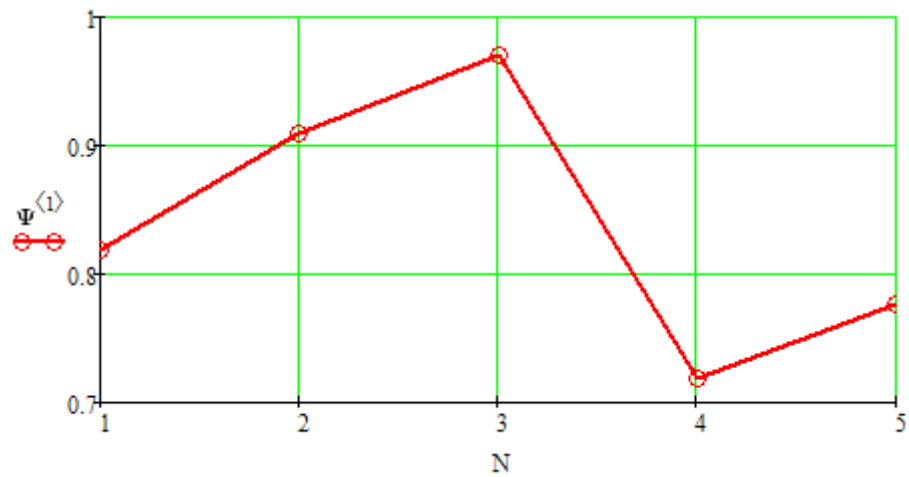


Рисунок Г.10 – Графіки розподілу показника жорсткості напруженого стану (а), показника Надаї-Лоде (б) і ресурсу пластичності (в) в залежності від положення трасованої точки

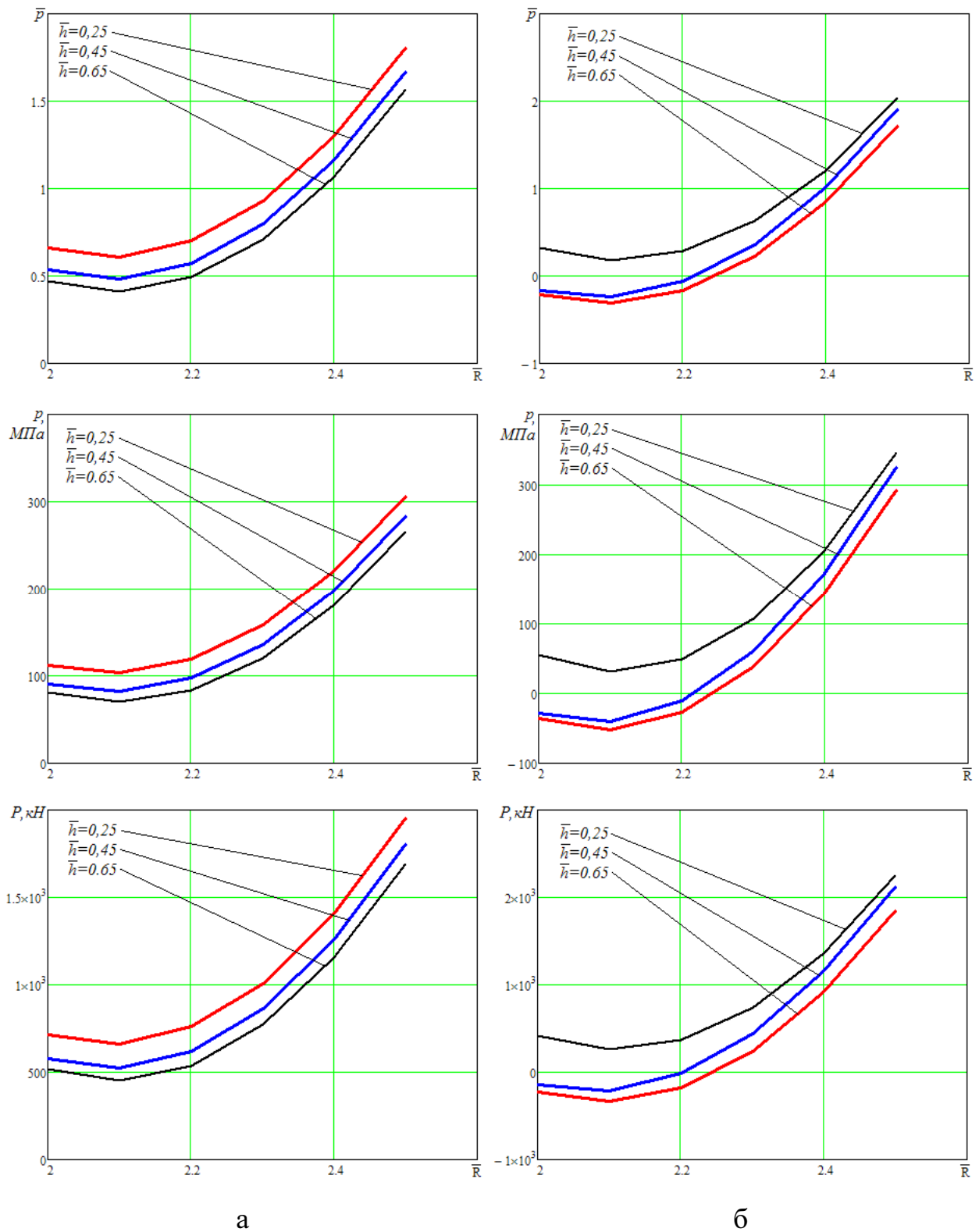


Рисунок Г.11 – Графіки залежності приведенного тиску, тиску та сили видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від відносного радіуса фланця при різних відносних висотах фланця

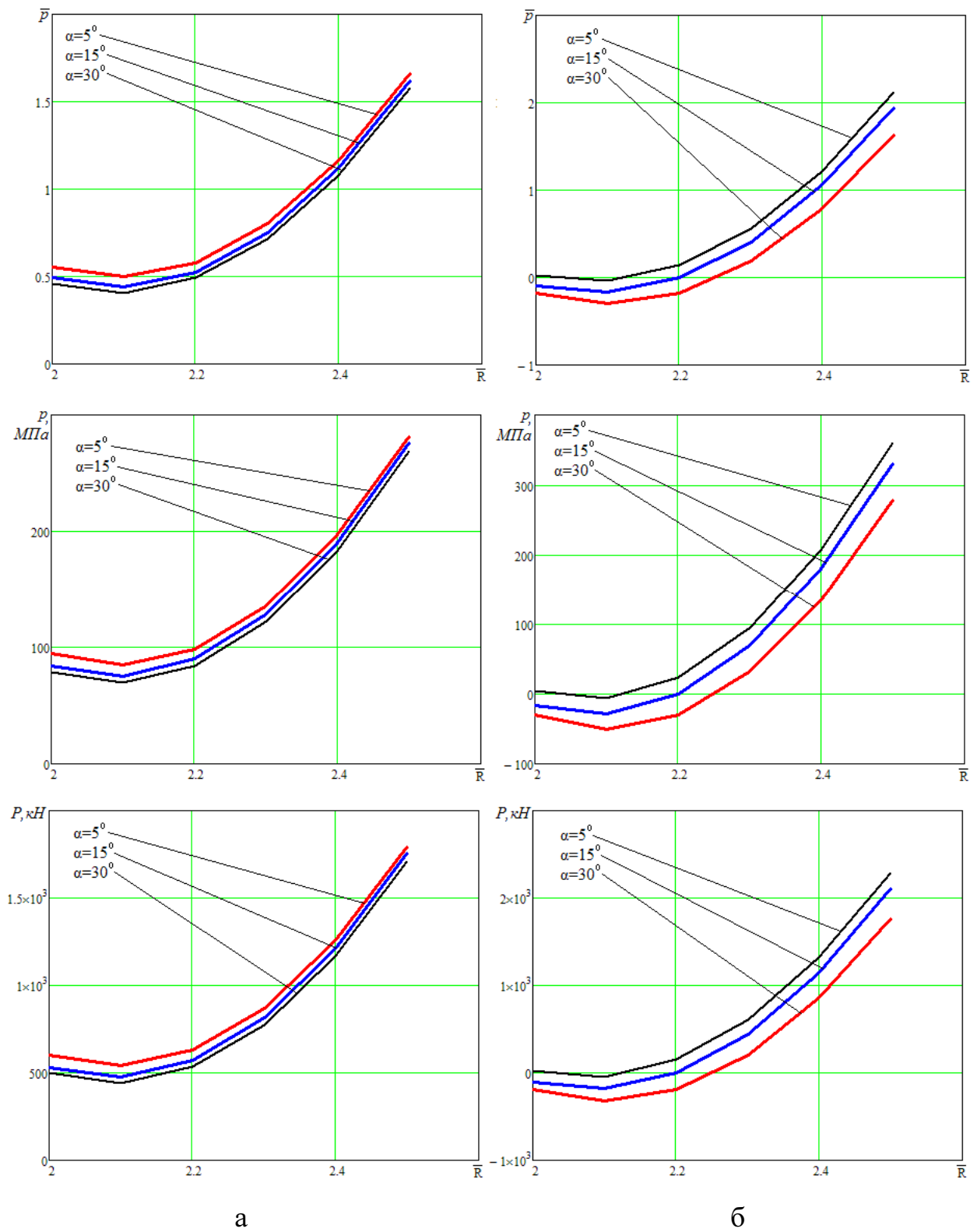


Рисунок Г.12 – Графіки залежності приведенного тиску, тиску та сили видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від відносного радіуса фланця при різних фасках на інструменті

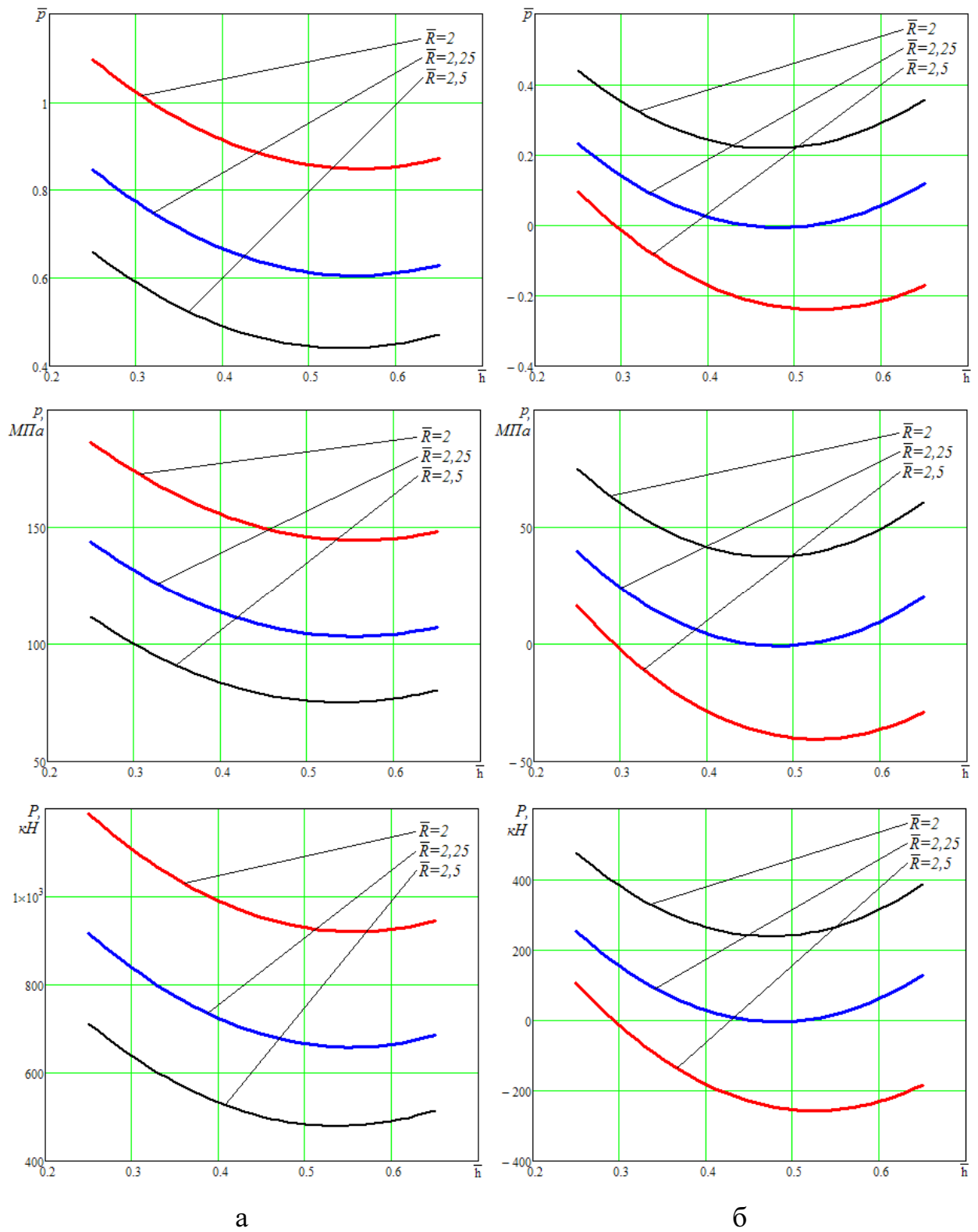


Рисунок Г.13 – Графіки залежності приведенного тиску, тиску та сили видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від відносної висоти фланця при різних відносних радіусах фланця

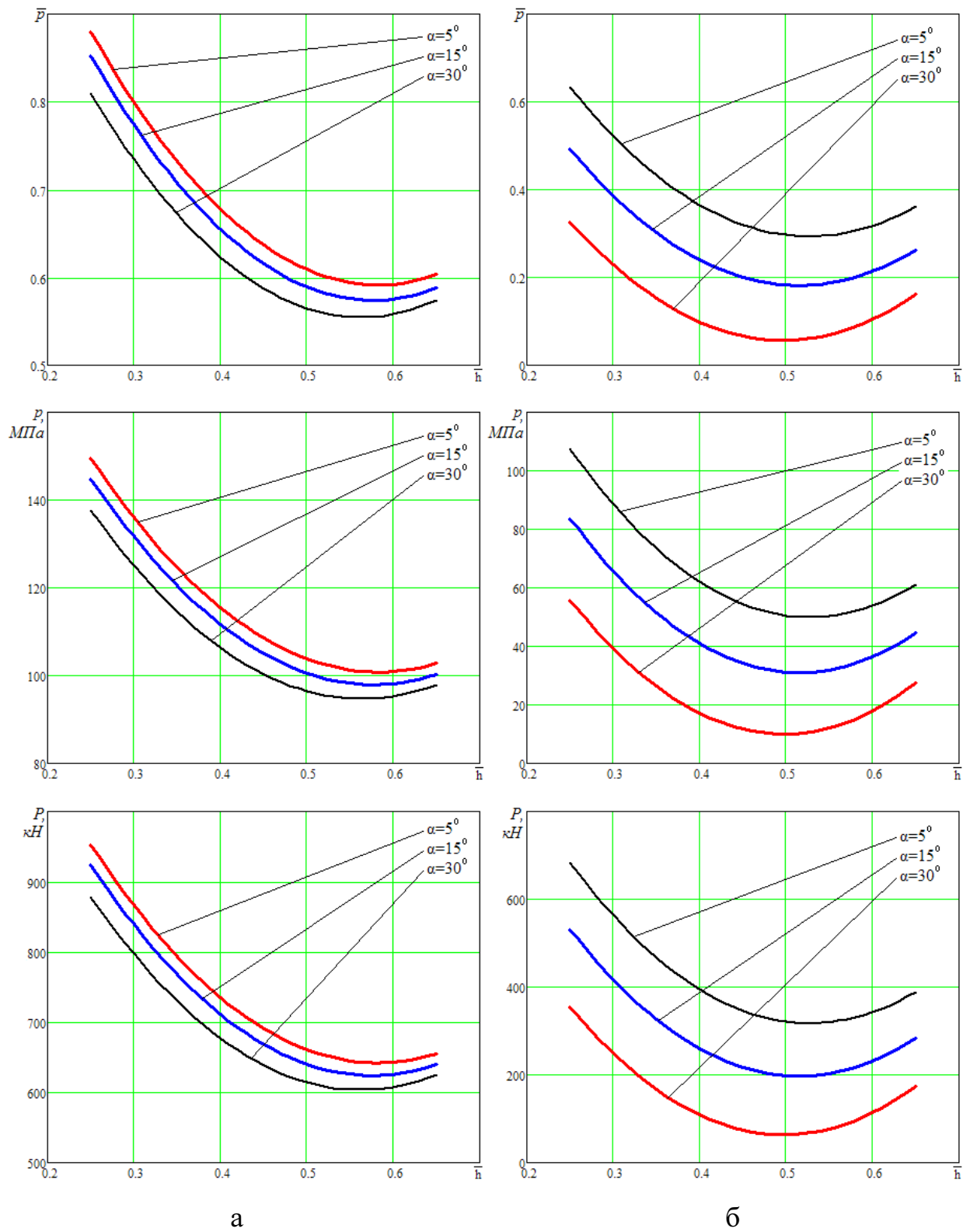


Рисунок Г.14 – Графіки залежності приведенного тиску, тиску та сили видавлювання (а) і розкриття матриці (б) від відносної висоти фланця при різних кутах на інструменті

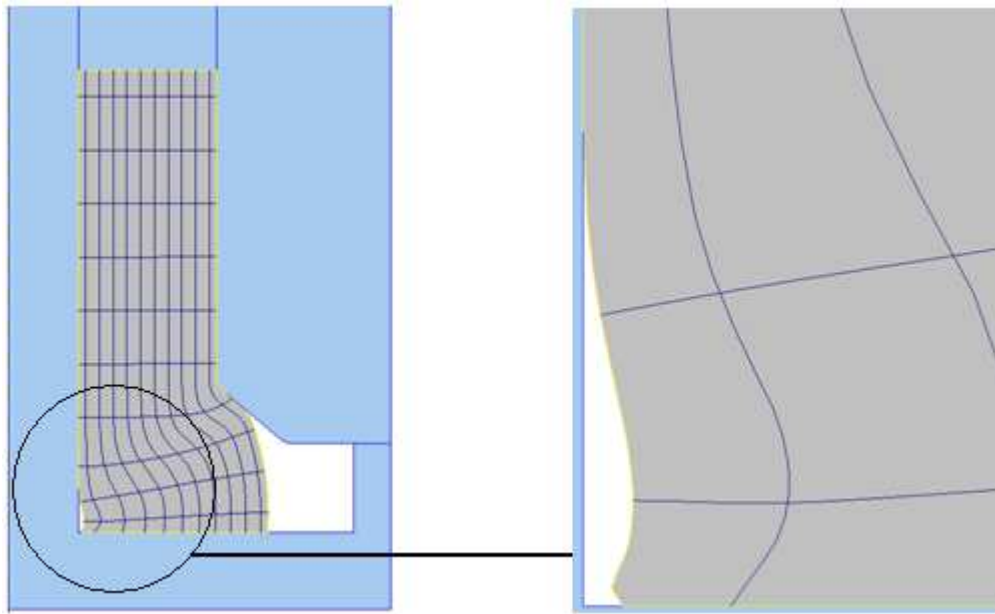


Рисунок Г.15 – Схема моделювання появи утягнення з кутом інструменту в середній частині фланця $\alpha=40^0$

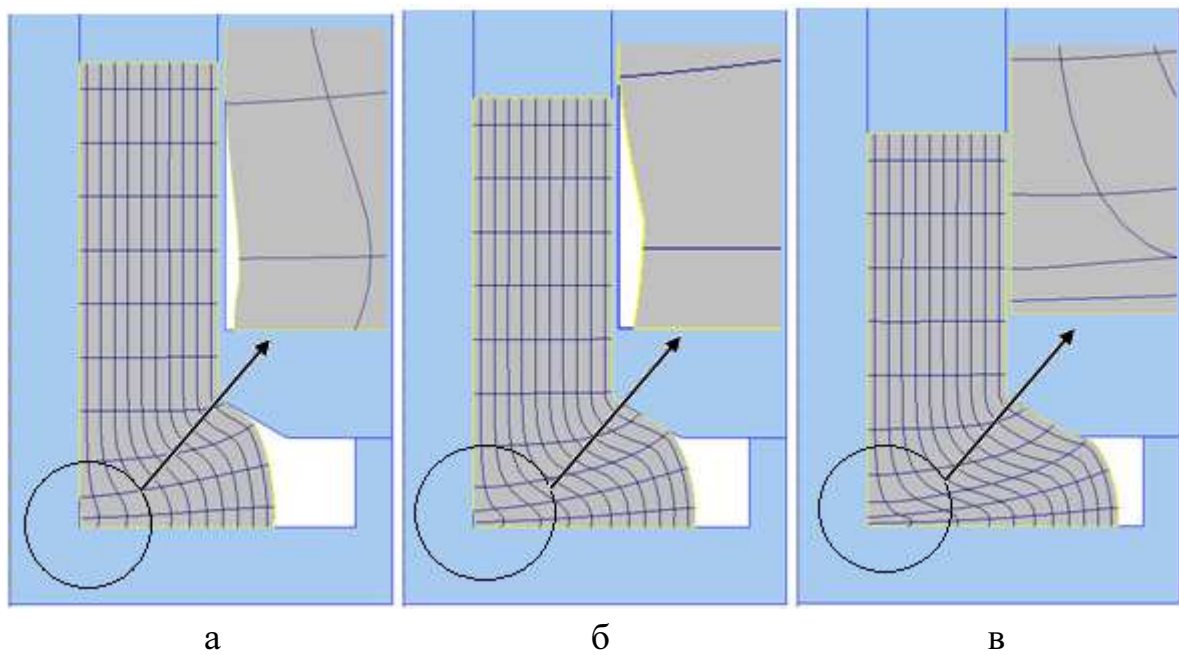


Рисунок Г.16 – Схема моделювання появи і заповнення утягнення з кутом інструменту в середній частині фланця $\alpha=30^0$: а – $\bar{S}=0,5$; б – $\bar{S}=0,75$; в – $\bar{S}=1,0$

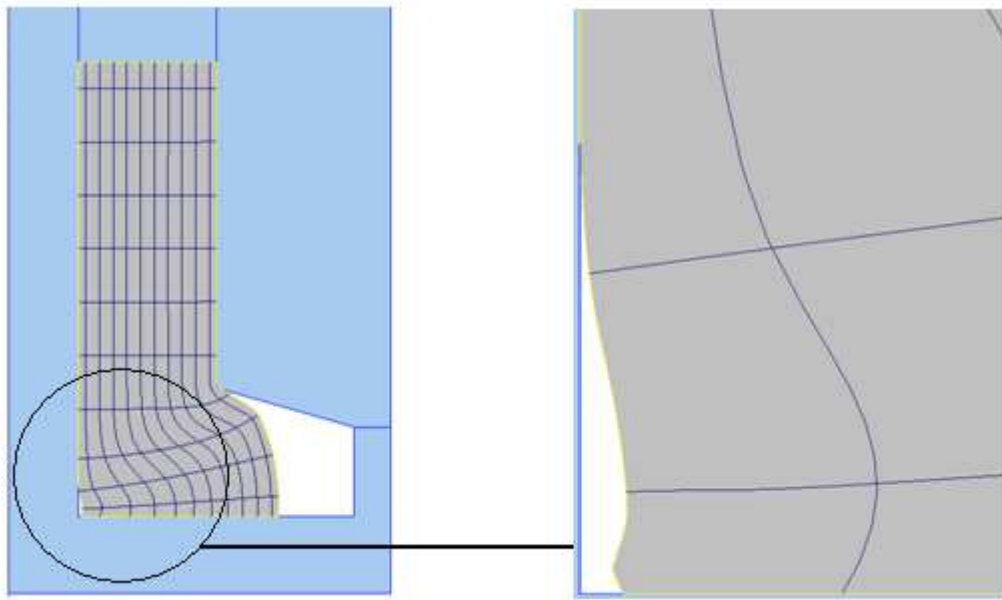


Рисунок Г.17 – Схема моделювання появи утягнення з кутом інструменту на торці фланця $\alpha=16^0$

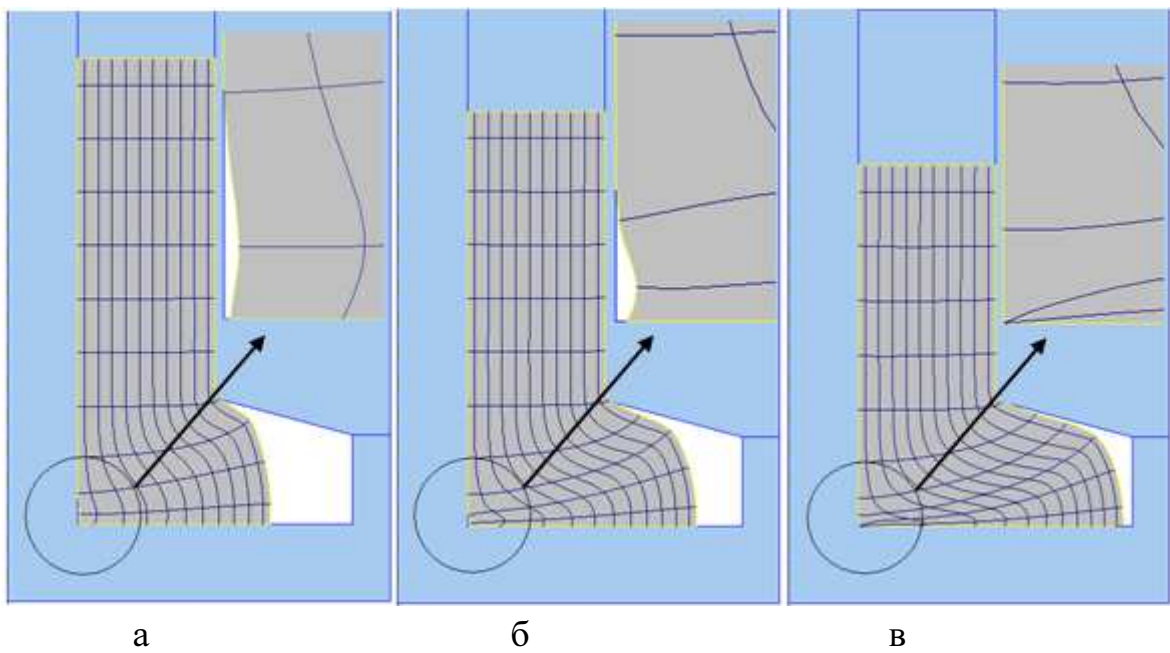


Рисунок Г.18 – Схема моделювання появи і заповнення утягнення з кутом інструменту на торці фланця $\alpha=15^0$: а – $\bar{S}=0,5$; б – $\bar{S}=0,875$; в – $\bar{S}=1,25$

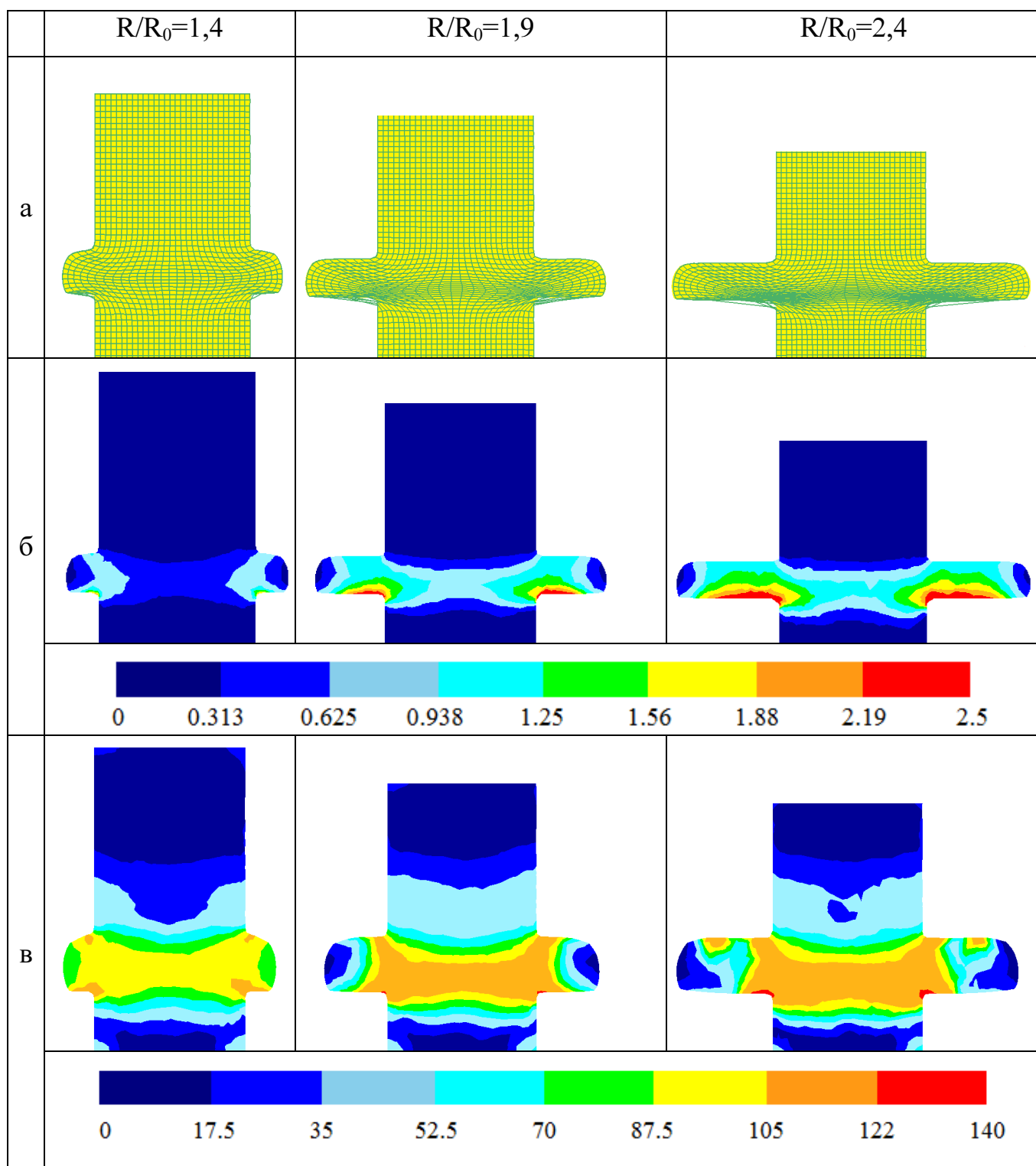


Рисунок Д.1 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні відростка з односторонньою подачею при $h/R_0=0,5$; $r=1$ мм; $h=7,5$ мм; $b=30$ мм; $\mu=0,08$

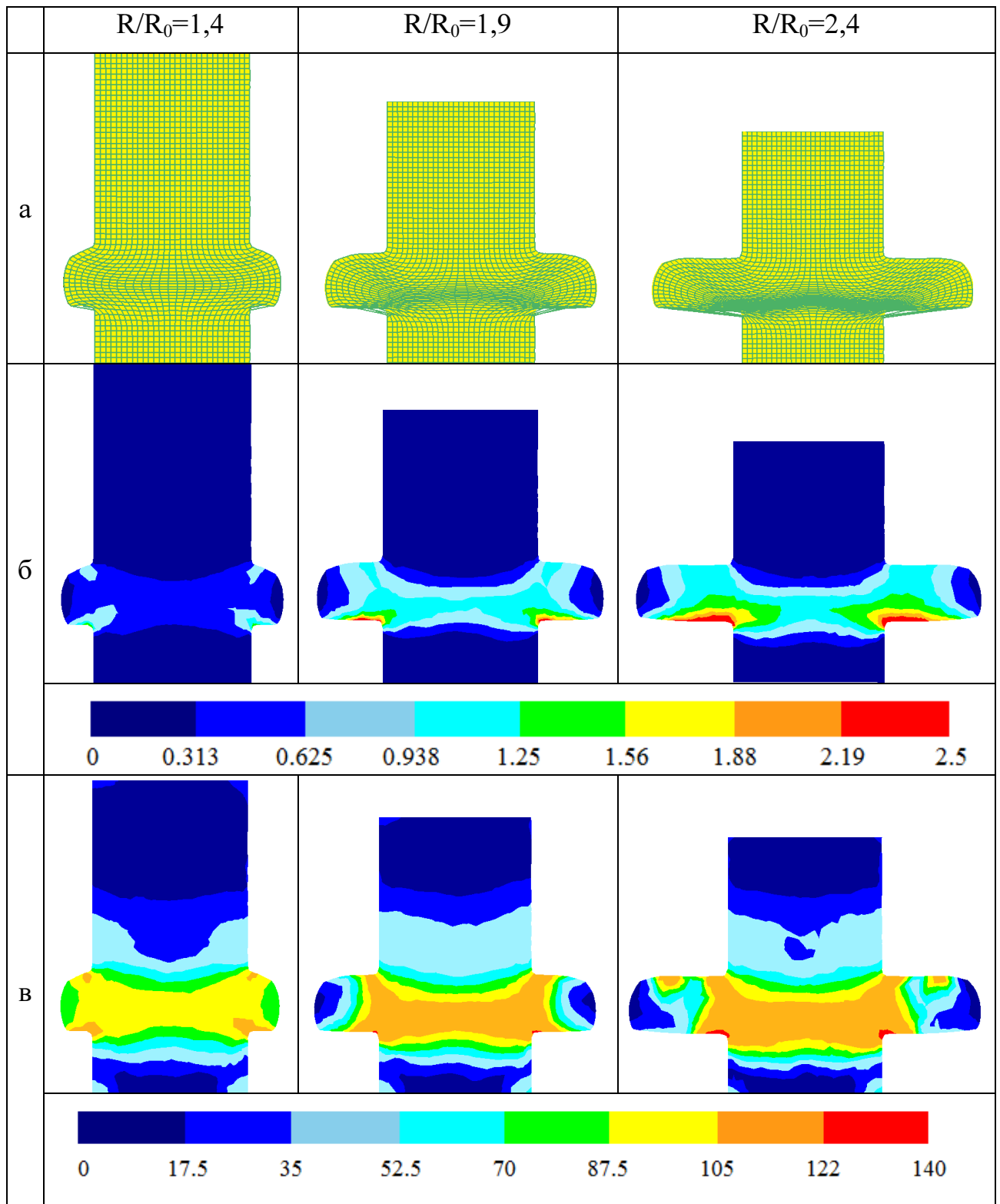


Рисунок Д.2 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні відростка з односторонньою подачею при $h/R_0=0,75$; $r=1$ мм; $h=11,25$ мм; $b=30$ мм; $\mu=0,08$

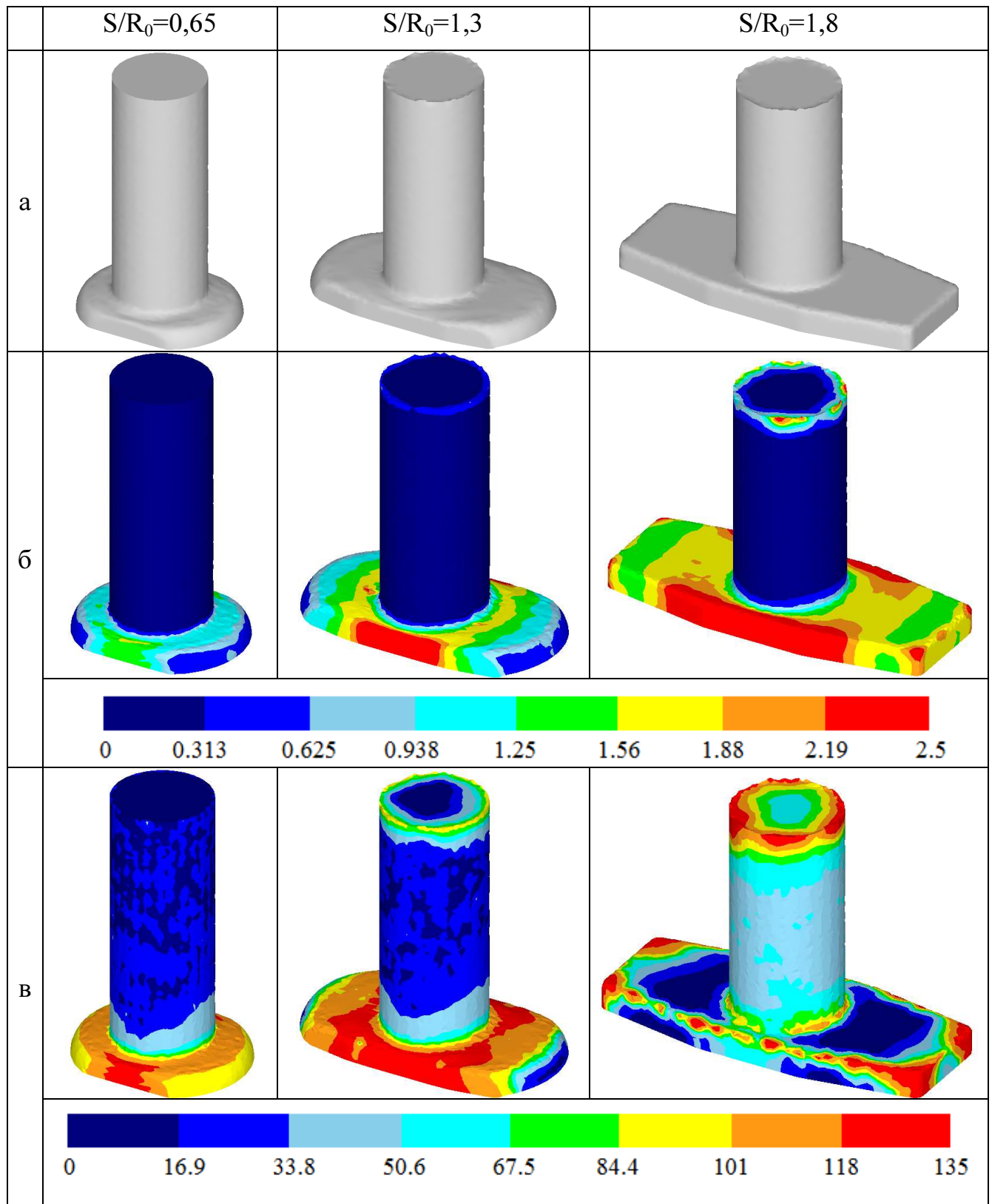


Рисунок Д.3 – Заготовка (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні відростків при $h/R_0=0,5$, $r=1$ мм, $\mu=0,08$ і $\alpha=10^\circ$

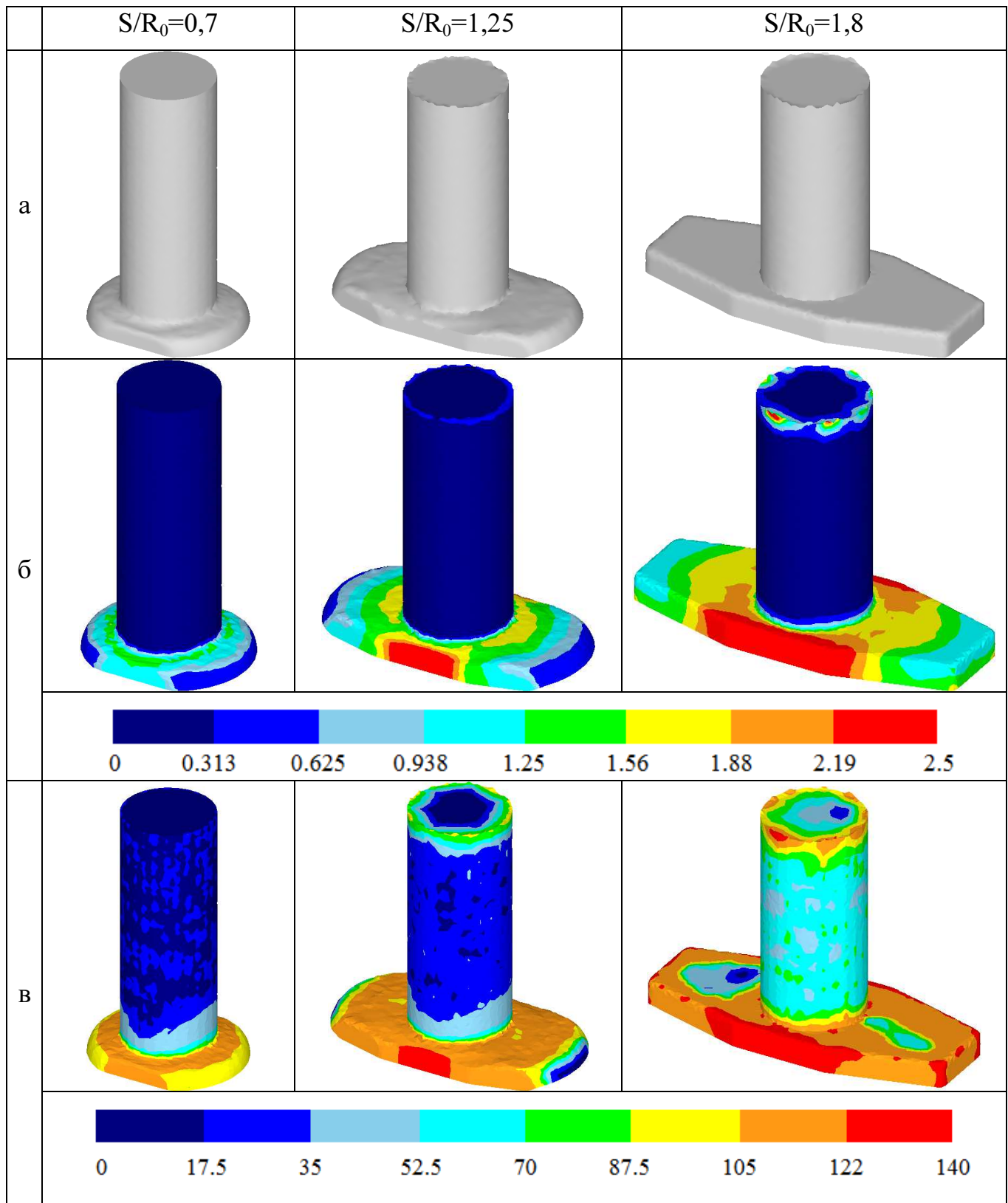


Рисунок Д.4 – Заготовка (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні відростків при $h/R_0=0,5$, $r=1$ мм, $\mu=0,08$ і $\alpha=15^\circ$

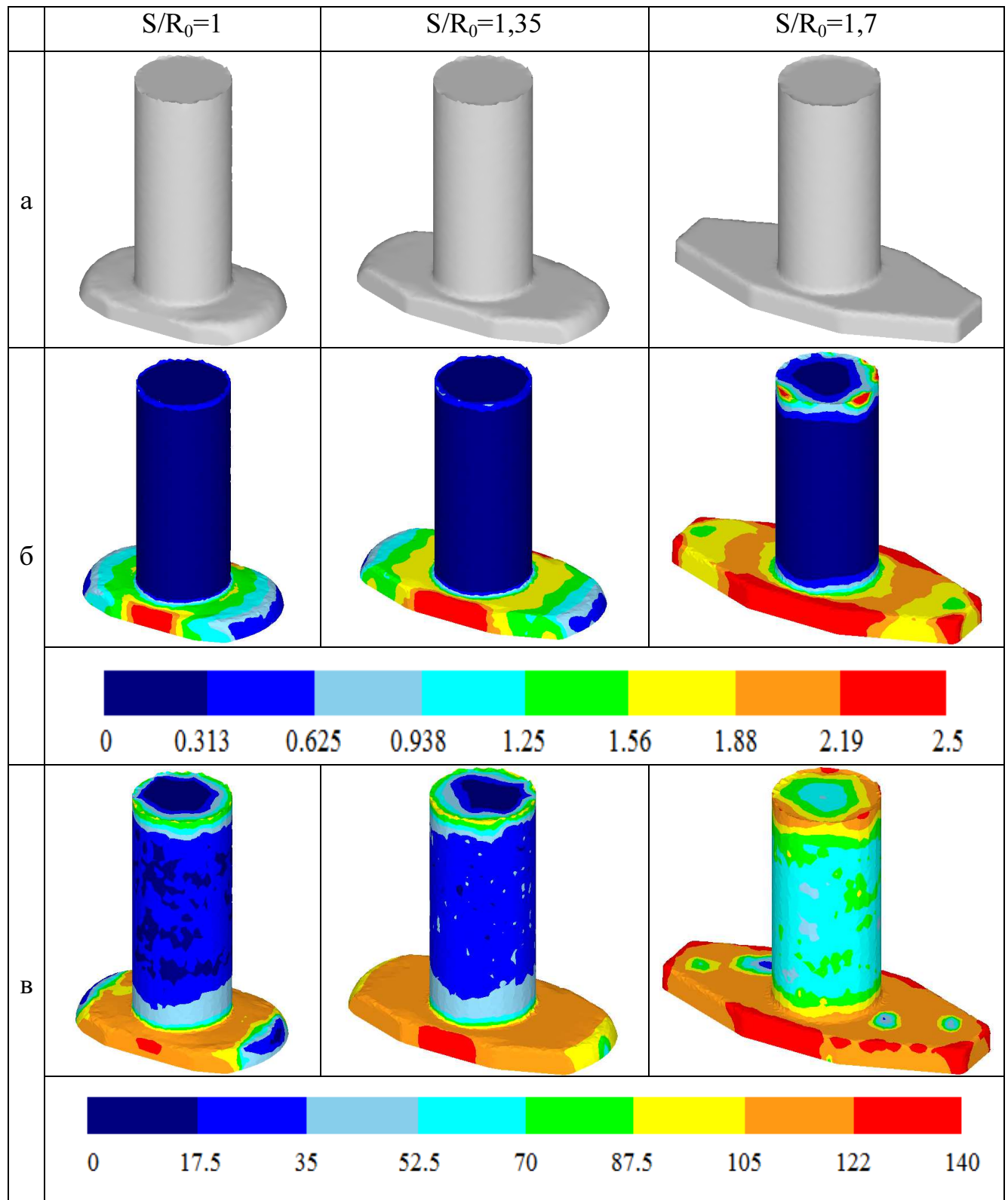


Рисунок Д.5 – Заготовка (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні відростків при $h/R_0=0,5$, $r=1$ мм, $\mu=0,08$ і $\alpha=20^\circ$

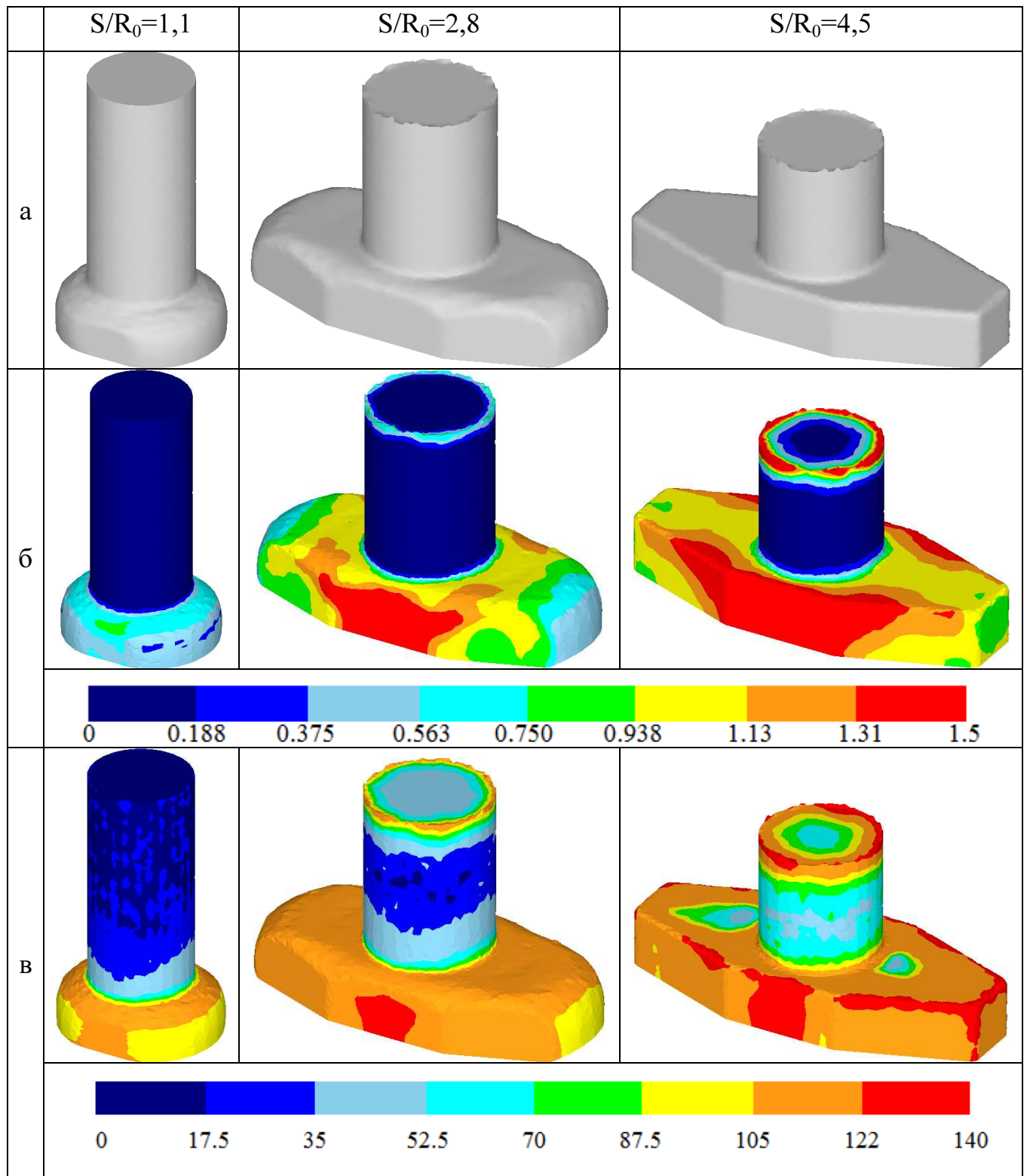


Рисунок Д.6 – Заготовка (а), розподіл інтенсивності деформацій σ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при радіальному видавлюванні відростків при $h/R_0=1$, $r=1$ мм, $\mu=0,08$ і $\alpha=20^\circ$

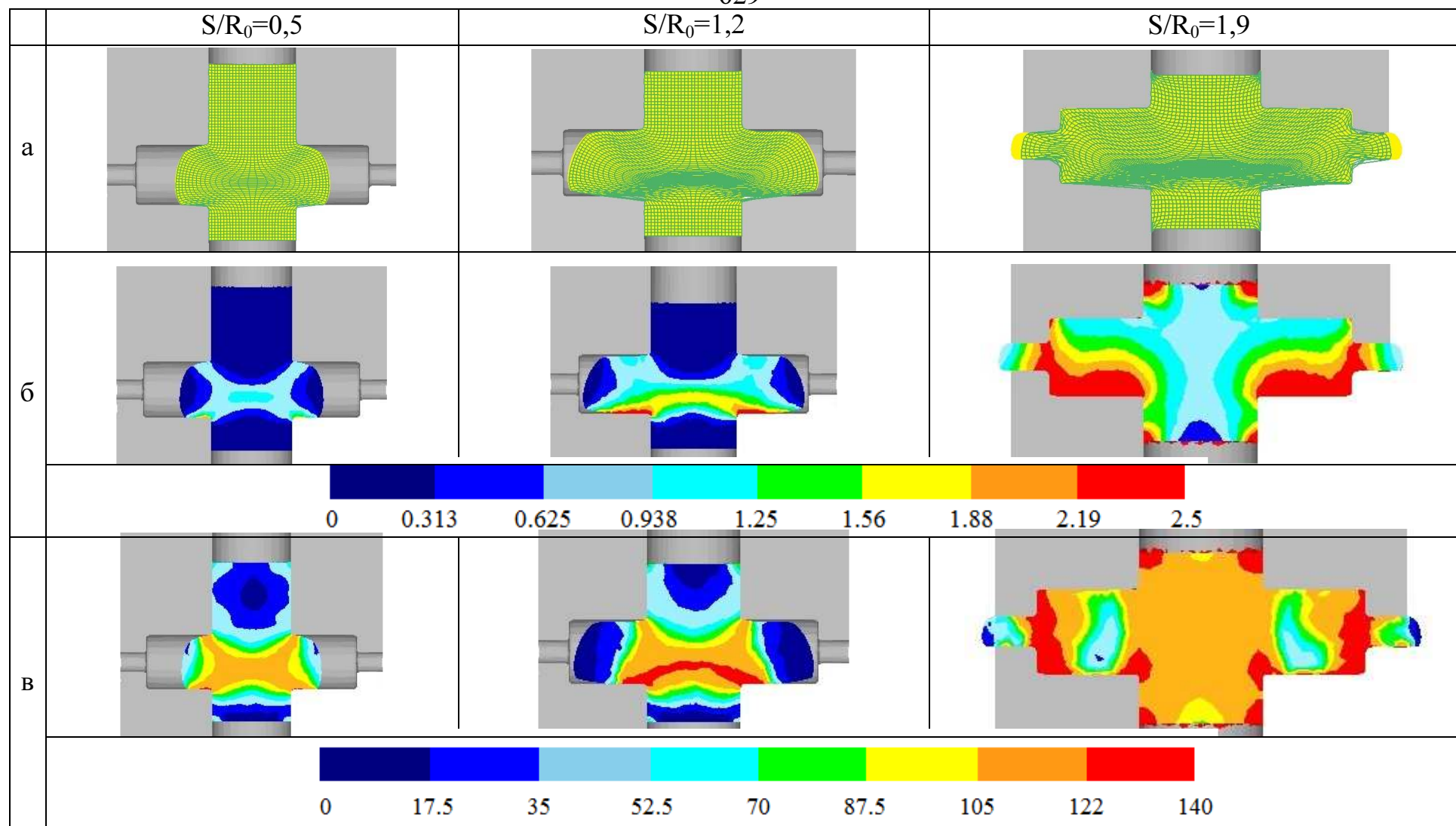


Рисунок Д.7 – Викривлення ділительної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні ступінчастих відростків при $d_1/R_0=0,5$; $r=1$ мм; $\mu=0,08$

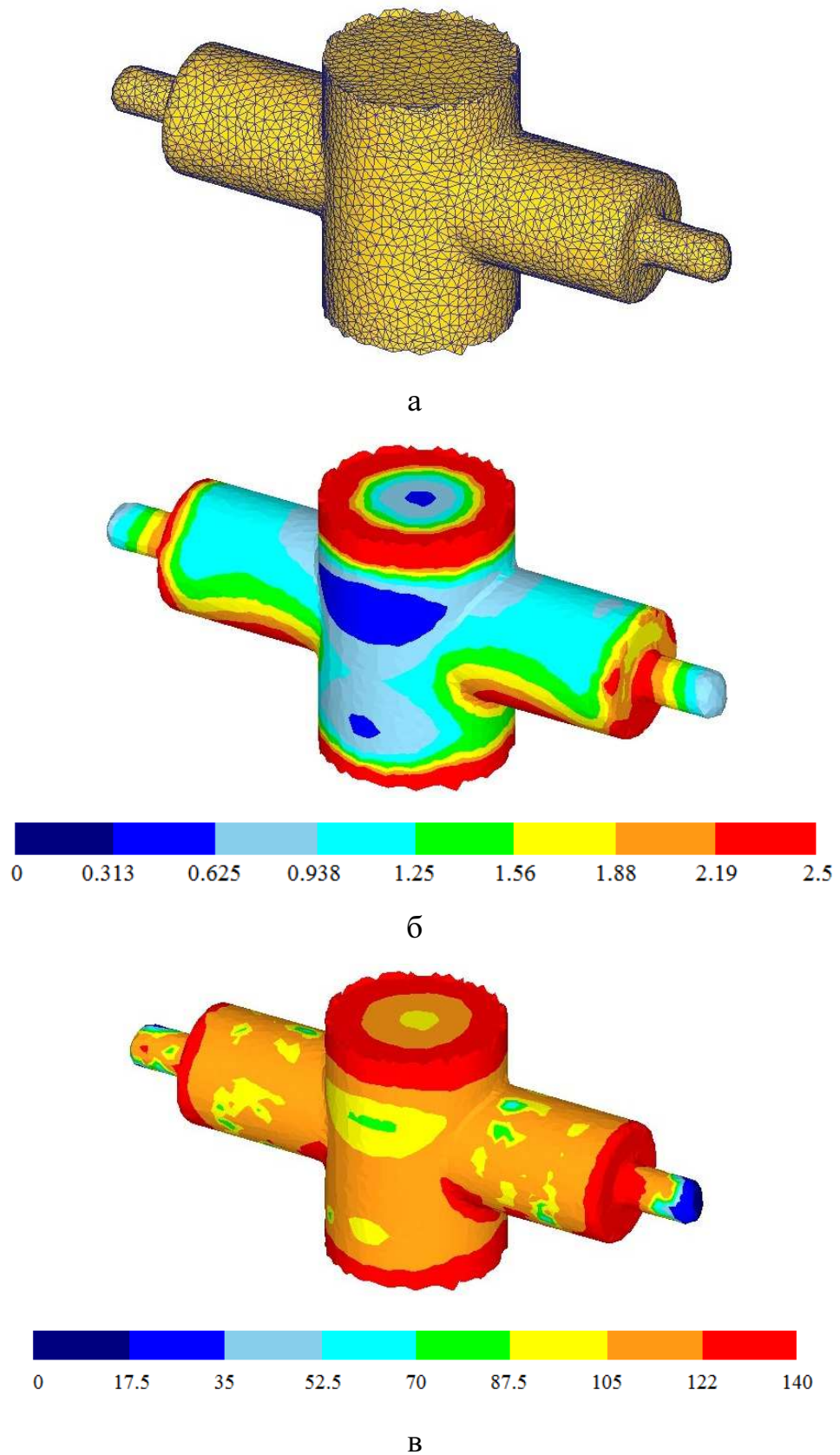


Рисунок Д.8 – Отримані напівфабрикати в 3D, а – ділильна сітка, б – розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i , в – розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа

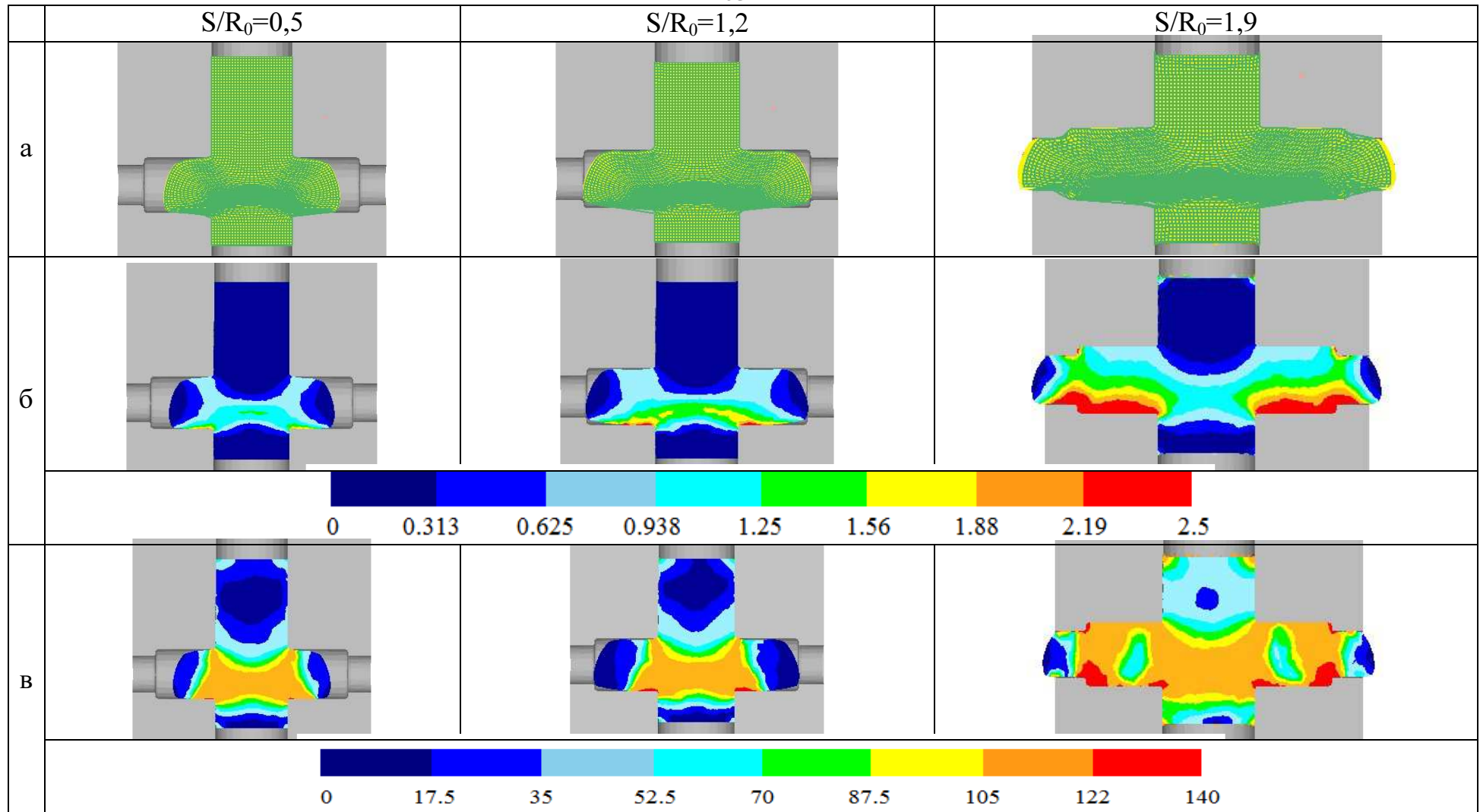
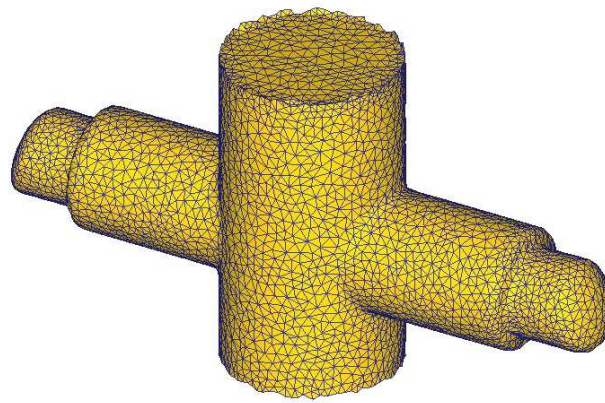
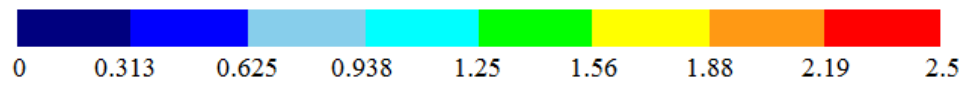
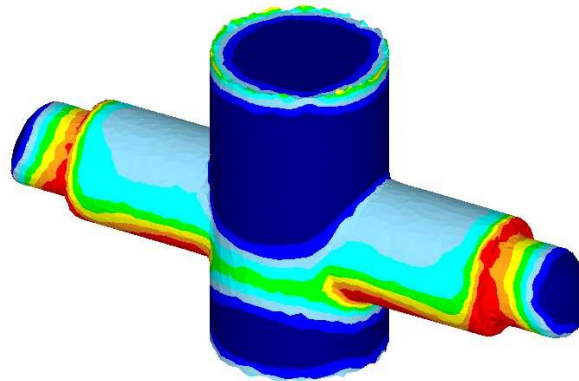


Рисунок Д.9 – Викривлення ділительної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в) по ходу деформування при боковому видавлюванні ступінчастих відростків при $d_1/R_0=1$; $r=1$ мм; $\mu=0,08$

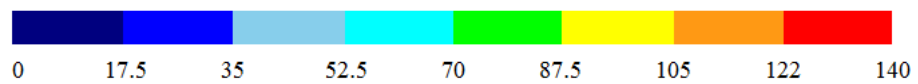
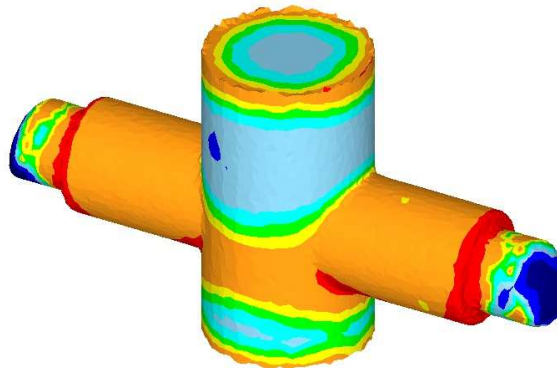
632



а



б



в

Рисунок Д.10 – Отримані напівфабрикати в 3D, а – ділильна сітка, б – розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i , в – розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа

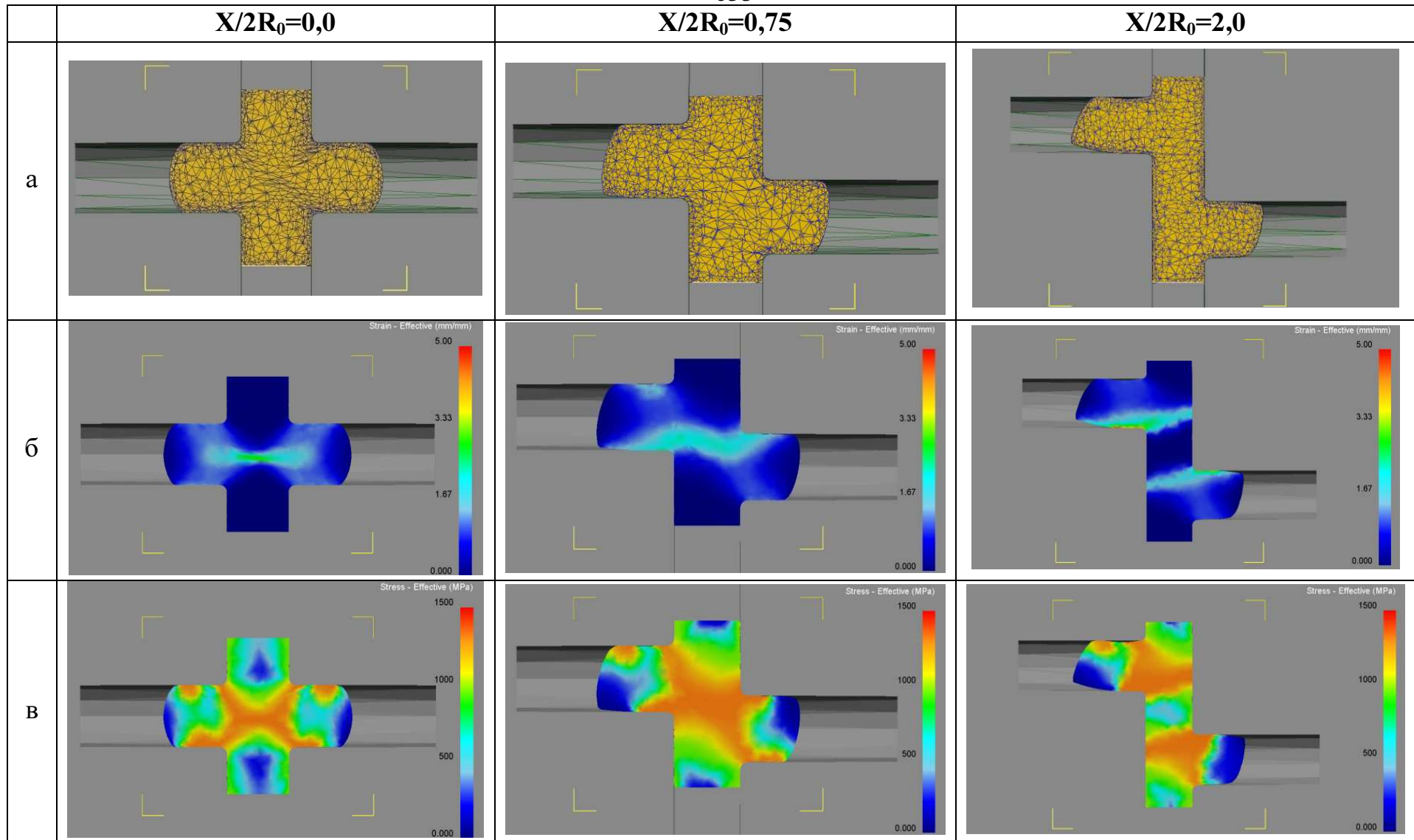


Рисунок Д.11 – Моделювання процесу бокового видавлювання при $V_2/V_1=0,75$: викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в)

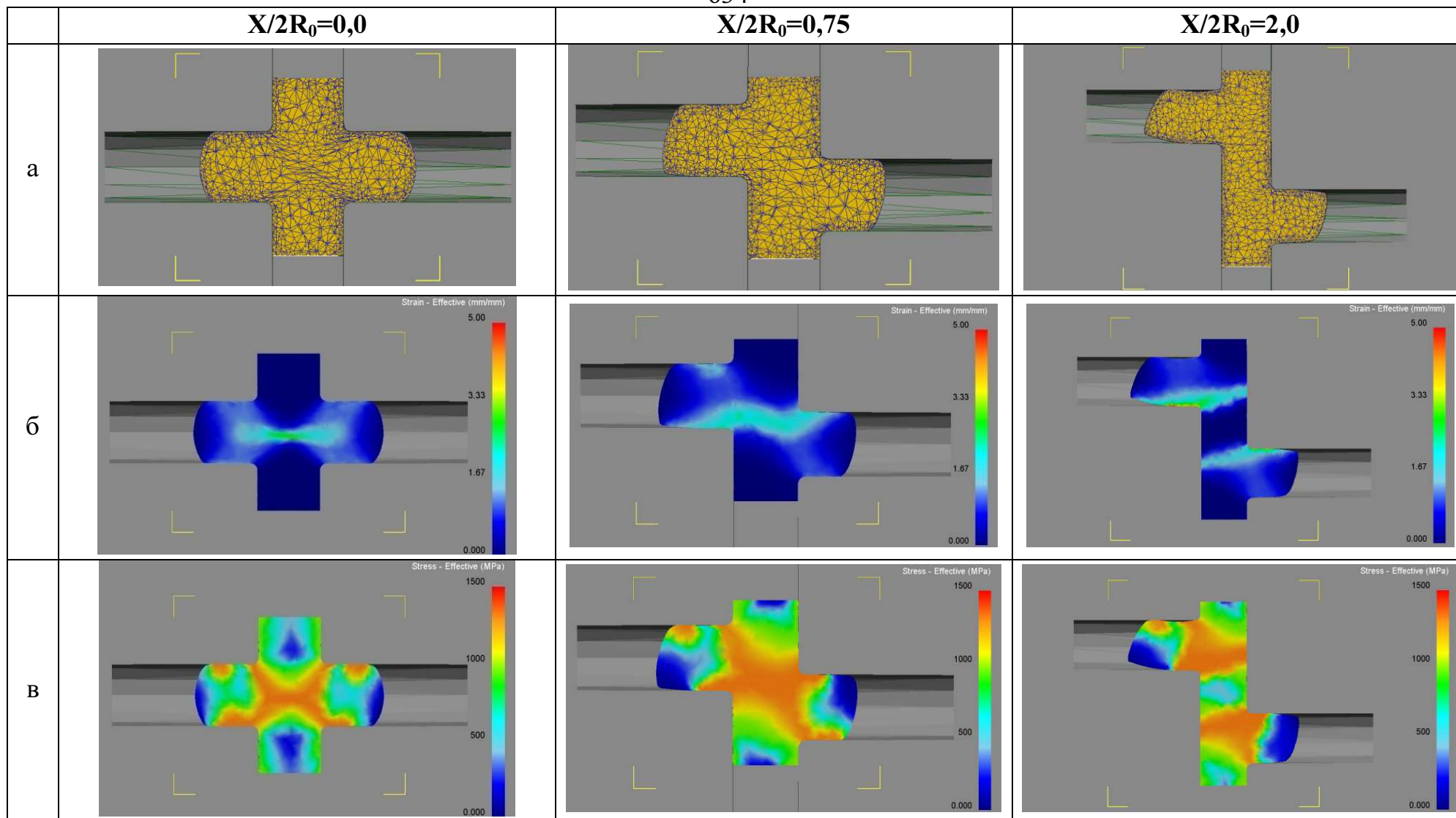


Рисунок Д.12 – Моделювання процесу бокового видавлювання при $V_2/V_1=0,5$: викривлення ділительної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в)

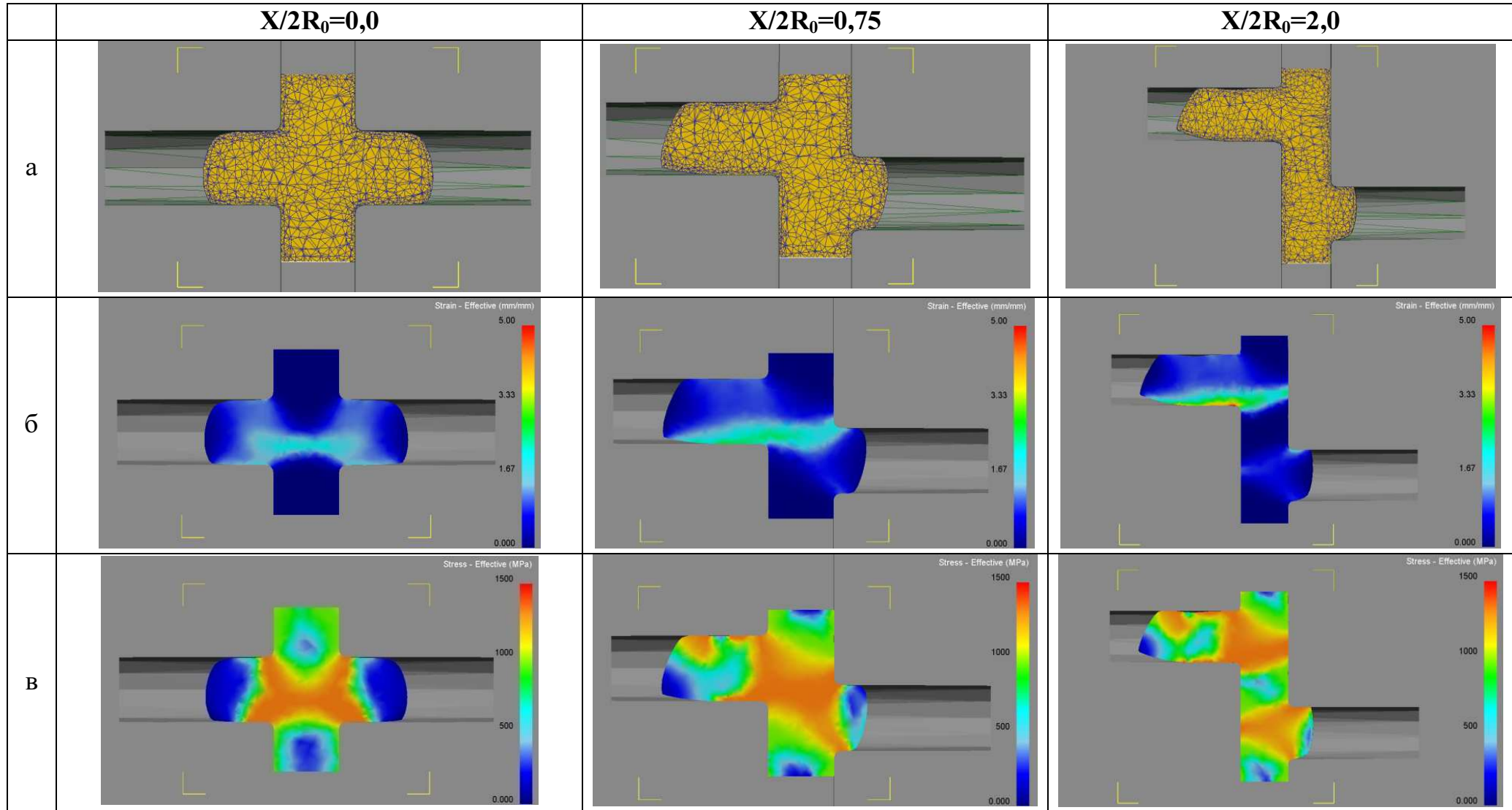


Рисунок Д.13 – Моделювання процесу бокового видавлювання при $V_2/V_1=0,25$: викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій ε_i (б), розподіл інтенсивності напружень σ_i , МПа (в)

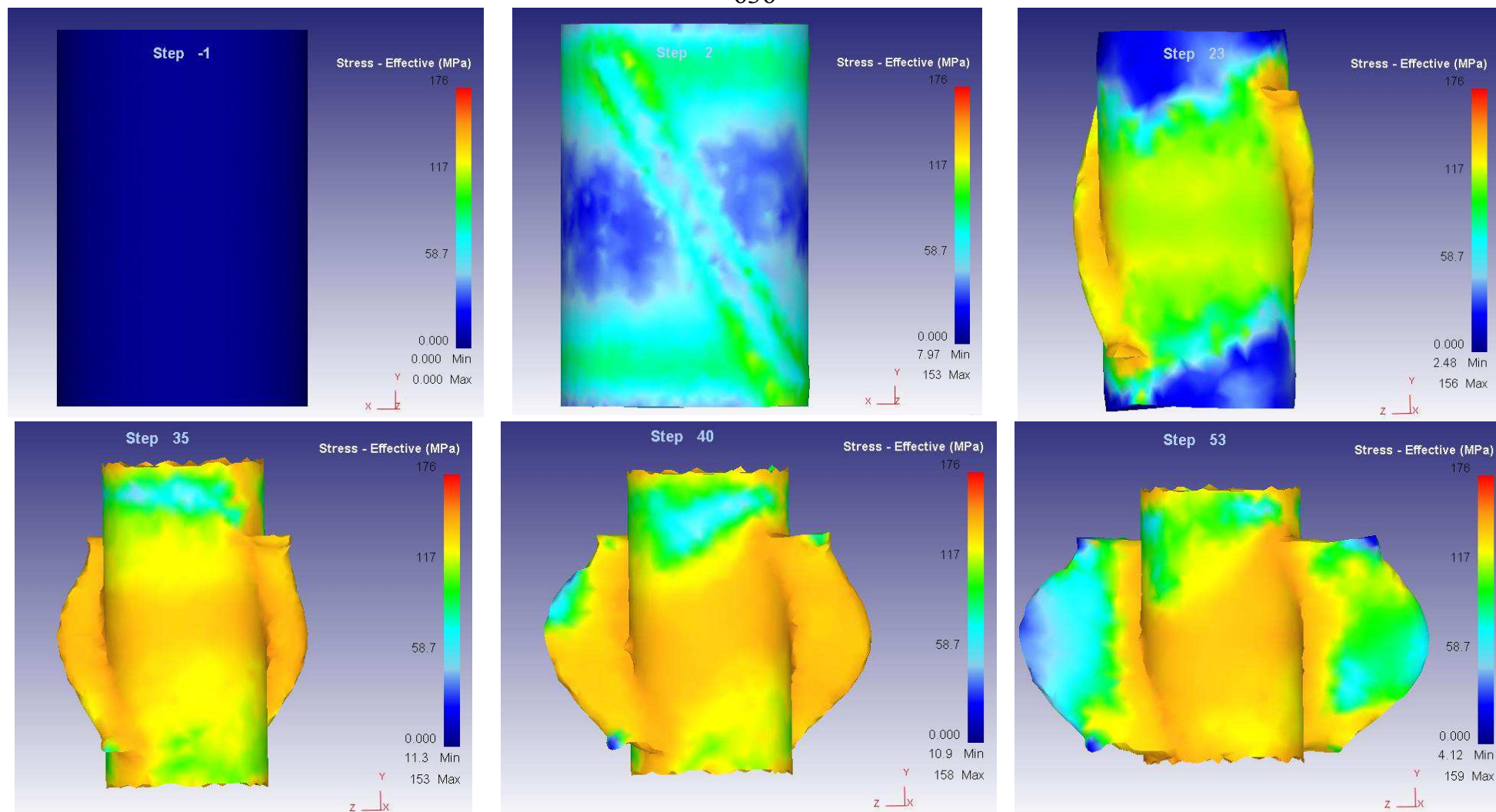


Рисунок Д.14 – Розподіл напружень для видавлювання поковки з двома перами в різних стадіях процесу

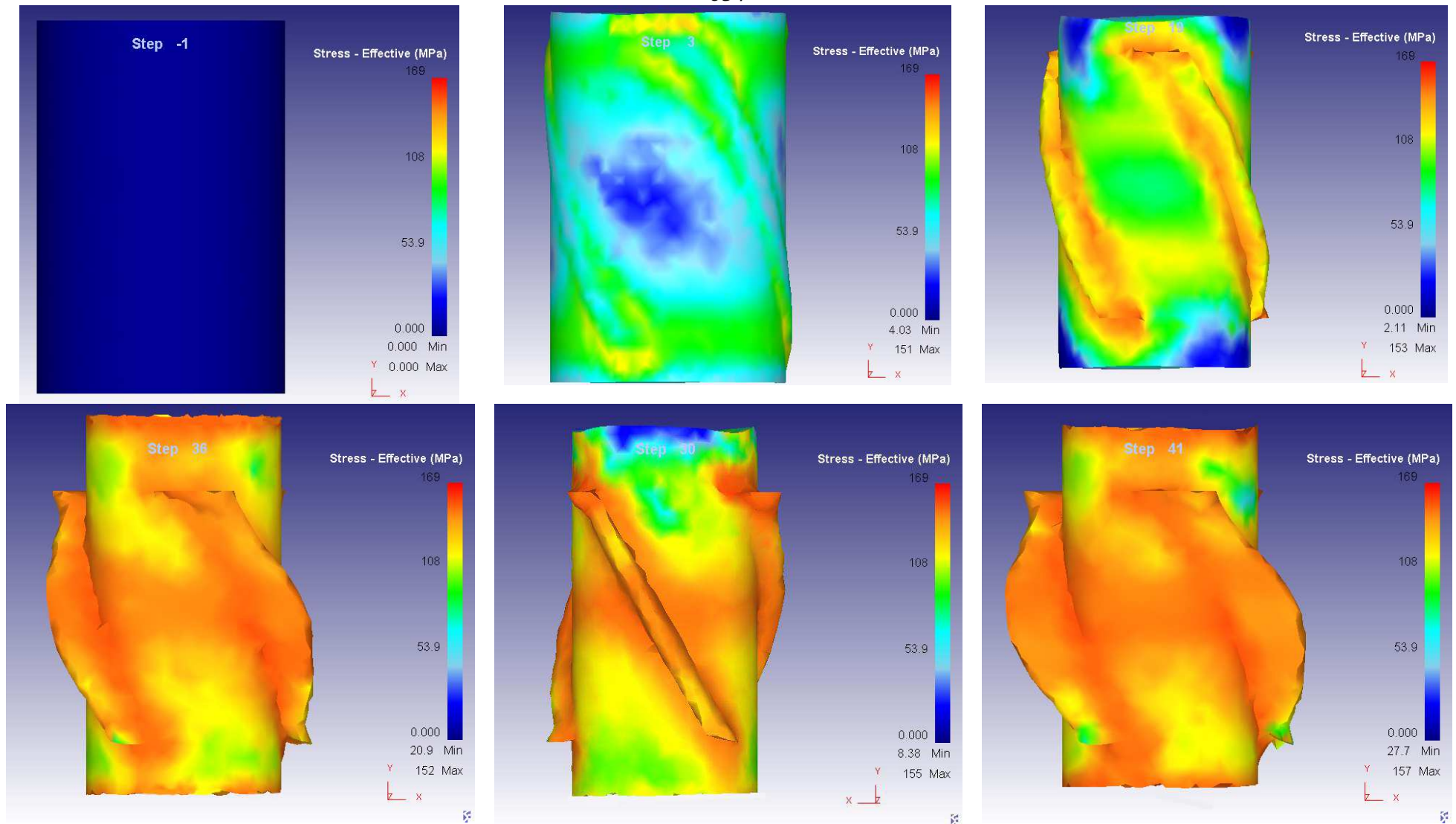


Рисунок Д.15 – Розподіл напружень для видавлювання поковки з трьома перами в різних стадіях процесу

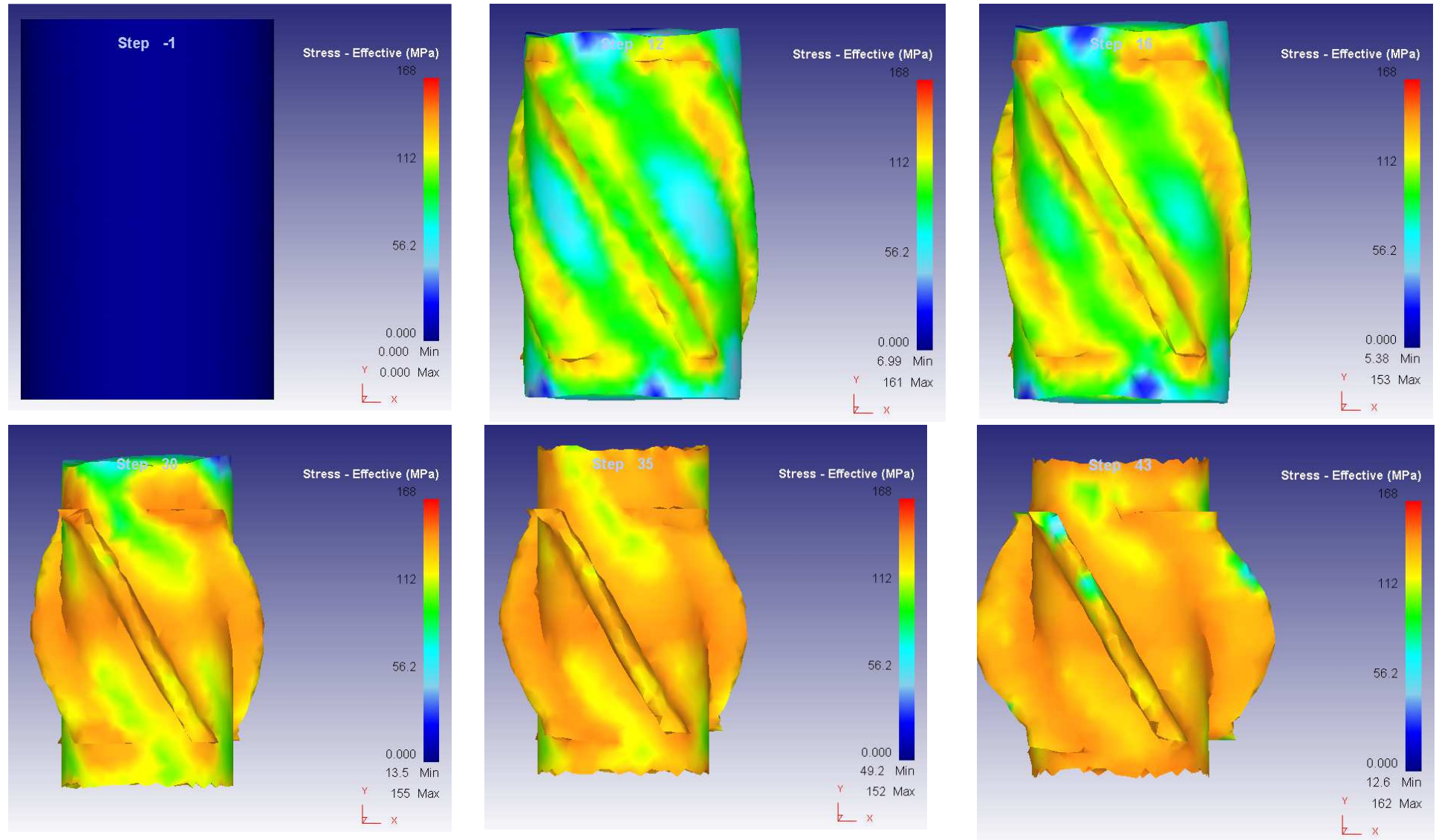


Рисунок Д.16 – Розподіл напружень для видавлювання поковки з чотирма перами в різних стадіях процесу

«УТВЕРЖДАЮ»:

Директор производства
металлургического и шахтно-
проходческого оборудования

ПАО «Новокраматорский
машиностроительный завод»

к.т.н. Титаренко И.



« 09 »

**Акт внедрения результатов комплекса научно-исследовательских
работ проведенных между ПАО «Новокраматорский
машиностроительный завод» и Донбасской государственной
машиностроительной академией**

В результате проведенных совместных научных исследований под руководством д.т.н., проф. Алиева И.С. внедрены на ПАО «НКМЗ» следующие результаты:

- методы расчета деформированного состояния заготовки в процессах пластического деформирования по схемам, обеспечивающим комбинирование кинематического и силового влияния инструмента на заготовку;
- методики расчета предельного формоизменения в процессах пластического деформирования, которые позволяют прогнозировать образование трещин в зависимости от термомеханического режима штамповки,ковки и прокатки;
- режимы пластического деформирования заготовок с неоднородным температурным полем, которые обеспечивают повышение качества конечного изделия за счет увеличения уровня

деформаций, которые возникают в центральной дефектной зоне исходной заготовки;

- новые схемы пластического деформирования, которые обеспечивают повышение уровня сдвиговых деформаций в заготовке и как следствие повышают качество конечного изделия.

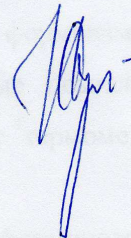
Новые технологические разработки обеспечили уменьшение себестоимости продукции ПАО «НКМЗ».

За счет снижения трудоемкости проектно-технологических работ, а также за счет расширения сортамента, повышения качества и увеличения выхода годного металлопродукции, экономический эффект составил 2 500 тыс. грн. по уровню цен 2013 года.

Настоящий акт предназначен для специализированных ученых советов по защите докторских и кандидатских диссертаций и не является основанием для предъявления финансовых требований.

Расчет экономического эффекта не приводится, так как содержит элементы коммерческой тайны ПАО «НКМЗ».

Главный конструктор производства
металлургического и шахтно-проходческого
оборудования



Ю.В. Сусь

Приватне акціонерне товариство
«ДРУЖКІВСЬКИЙ ЗАВОД МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ»

84205, м. Дружківка Донецької обл., вул. Соборна, 3
Р/р 26001500265450 ПАТ «Креди Агриколь Банк» МФО 300614
Р/р 2600224241 ПАТ «ПУМБ» МФО 334851
код ЄДРПОУ 00191052
Свідцтво № 100324942, ІПН 001910505109
e-mail: dmf@dmf.com.ua
тел./факс: (06267) 4-47-11



ДСТУ
ISO 9001-2009

Частное акционерное общество
«ДРУЖКОВСКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД»

84205, г. Дружковка Донецкой обл., ул. Соборная, 3
Р/с 26001500265450 ПАТ «Креди Агриколь Банк» МФО 300614
Р/с 2600224241 ПАТ «ПУМБ» МФО 334851
код ЄДРПОУ 00191052
Свидетельство № 100324942, ИНН 001910505109
e-mail: dmf@dmf.com.ua
тел./факс: (06267) 4-47-11

№ _____
На № _____ от _____



«Затверджую»
Технічний директор
С.С.Галицький

10.2016

Акт впровадження

Комісія у складі: головного технолога Шаповалов А.Л., начальника ЦЗЛ Ягупець Т.П., начальника ЦВК-1 Дедика Р.К. склало цей акт в тім, що за науково-технічними дослідженнями докторанта кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії Алієвої Л.І. (та творчого колективу під її керівництвом) впроваджено на ДМЗ наступні результати:

- рекомендації з розробки процесів та штампового оснащення на основі використання схем деформування комбінованим видавлюванням-висаджуванням в роз'ємних та рухомих матрицях;

- методики розрахунку силових режимів процесів деформування видавлюванням деталей в роз'ємних матрицях, що дозволяють розрахувати питоме навантаження на інструмент та його стійкість;

- методики технологічних іспитів на штампуємість металу, що деформується в холодному стану і розрахунку граничної деформівності на основі вичерпання ресурсу пластичності в процесах холодного об'ємного деформування;

- методики нанесення зносостійкого покриття на інструмент для холодного деформування на автоматах;

- маловідходні процеси радіального видавлювання-висаджування деталей типу шарових пальців та наскрізного прошивання втулок і кілець.

Нові технологічні рекомендації і процеси забезпечують розширення номенклатури деталей що виготовляються на ДМЗ, зменшення величини напусків та припусків на розміри деталей за рахунок підвищення їх точності.

Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво холодно-штампованих деталей на 12–16%.

Реальний економічний ефект становив 460 тис. грн. за рівнем цін 2016 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 950 тис. грн. за рівнем цін на 2016 рік.

Розрахунок економічного ефекту не наводиться, так як містить елементи комерційної таємниці ДМЗ.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту докторських та кандидатських дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

Головний технолог



А.Л.Шаповалов

Начальник ЦЗЛ



Т.П.Ягупець

Начальник ЦКВ



Р.К.Дедик

ЗАТВЕРДЖУЮ

Технічний директор
ПрАТ «Дружківський завод
металевих виробів»С.С.Галицький
20 18 р.

АКТ

впровадження технологічних розробок
науково-дослідної лабораторії іонно-плазмових технологій кафедри
наноелектроніки Сумського державного університету та кафедри обробки металів
тиском Донбаської державної машинобудівної академії

Цим актом підтверджується, що співробітники науково-дослідної лабораторії іонно-плазмових технологій кафедри наноелектроніки Сумського державного університету: д.ф.-м.н., г.н.с. Погребняк О.Д., д.ф.-м.н., г.н.с. Гончаров О.А., к.ф.-м.н., с.н.с. Юнда А.М., к.ф.-м.н., с.н.с. Лобода В.Б., аспірант, м.н.с. Шелест І.В., в рамках НДР «Технологічні основи синтезу наноструктурних нанокомпозитних та багат шарових покриттів тугоплавких сполук для застосування у машинобудуванні» номер д/р 0117U002247 (керівник д.ф.-м.н., доц. Гончаров О.А.) та «Фізичні основи формування складу та властивостей наноструктурних боридних, нітридних та боридонітридних плівок перехідних металів для застосування у машинобудуванні» номер д/р 0116U002621 (керівник д.ф.-м.н., проф. Погребняк О.Д.) та докторанти кафедри обробки металів тиском Донбаської державної машинобудівної академії: Алієва Л.І. та Абхари П. спільно з ПрАТ «Дружківський завод металевих виробів» провели роботи по збільшенню стійкості інструменту та оснащення для холодної об'ємного штампування (ХОШ) точних складнопрофільних заготовок:

Прийняті до практичного використання при проектуванні процесів ХОШ:

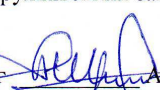
- методика підготовки поверхні інструменту перед нанесенням захисних покриттів;
- технологія нанесення зносостійкого покриття диборидів перехідних металів на інструмент і штампове оснащення холодної деформації;
- технологія випробування інструменту та оснащення з плівковим покриттям диборидів перехідних металів.
- методика розрахунку технологічних режимів і проектування процесів та штампів ХОШ.

Проведені дослідження дозволили удосконалити технологічний процес та оснащення для ХОШ.

Промислові випробування інструменту та оснащення для ХОШ показали високу стійкість робочого інструмента з плівковим покриттям і надійність техпроцесу.

Від ПрАТ «Дружківський завод металевих виробів»

Від Сумського державного університету

Гол. технолог  А.Л. Шаповалов

Проректор з НДР

А.М. Черноус

Нач. цеху  Р.К. Дедик

Керівник НДР

О.А. Гончаров

Керівник НДР

О.Д. Погребняк

Від ДДМА

Проректор з НДР

М.А. Турчанін

Затверджено

Директор виробництва
ТОВ «Укртехконтакт»

Зубов В.П.

2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що колектив наукових працівників у складі докторанта Абхарі Пеймана, докторанта Сивака Романа Івановича, аспіранта Корденко Марії Юріївни провели науково-дослідні роботи, що дозволило успішно впровадити наступні результати:

- розробка рекомендацій штапкового оснащення на основі використання схем деформування, які забезпечать зниження зусиль розтягнення важконавантажених інструментів штапа;
- розробка рекомендацій на основі енергетичного методу щодо вибору раціональних геометричних параметрів компенсаційної порожнини при проектуванні технологічних процесів;
- оцінка технологічної деформовності на основі енергетичного підходу, що дозволило встановити залежності граничного ступеня деформації пластичного деформування від шляху навантаження і отримати фізично обґрунтований критерій деформовності.

Впровадження отриманих результатів дозволило знизити собівартість отриманої продукції ТОВ «Укртехконтакт» за рахунок підвищення якості та збільшення виходу придатного металопродукції. Економічний ефект складає 300 тис. грн. за рівнем цін 2017 року.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту докторських та кандидатських дисертацій та не являється підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Розрахунки економічного ефекту не приводяться, тому що містять елементи комерційної таємниці ТОВ «Укртехконтакт».

Директор ТОВ «Укртехконтакт»

Зубов В.П.

«Затверджую»
Перший проректор ПАТ

А.М.Фесенко

« 10 »



ДОВІДКА

про пайову участь доцента к.т.н. Алієвої Лейли Іграмотдинівни, ст. викл., к. т. н. Жбанкова Ярослава Геннадійовича та ст. викл., к. т. н. Абхарі Пеймана в економічному ефекті від результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт Донбаської державної машинобудівної академії з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод».

Результати дисертаційної роботи докторанта доцента Алієвої Л.І. та докторанта ст. викл., к. т. н. Жбанкова Я. Г., а саме:

- методи розрахунку деформованого стану заготовки в процесах пластичного деформування за схемами, що забезпечують комбінований кінематичний та силовий вплив інструменту на заготовку;
- методики розрахунку граничної формозміни в процесах пластичного деформування, що дозволяють прогнозувати утворення тріщин в залежності від термомеханічного режиму штампування, кування та прокатки;
- нові схеми пластичного деформування, які забезпечують підвищення рівня деформацій зсуву в заготовці і як наслідок підвищують якість кінцевого виробу;

були використанні на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» у рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення технологій та обладнання для виробництва гарячекатаних та холоднодеформованих заготовок та виробів.

Економічний ефект становив 2500 тис. грн. за рівнем цін 2013 року.

Пайова участь виконавця роботи складає:

П.І.Б.	Відсоток, %	Економічний ефект, грн.
Алієва Л.І.	20 %	500 000
Жбанков Я. Г.	20 %	500 000
Абхарі П.	18 %	450 000

Керівник науково-дослідного сектору

О.Я. Белицька

«Затверджую»
Перший проректор ДДМА

А.М. Фесенко

« 14 »

18

02070789

ДОВІДКА

про пайову участь доцента к.т.н. докторанта **Алієвої Лейли Іграмотдинівни**,
доцента., к. т. н., докторанта **Абхарі Пеймана** та аспіранта **Картамишева Д.О.** в
економічному ефекті від результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт
Донбаської державної машинобудівної академії з
ПАТ «Дружківський машинобудівний завод металевих виробів» (ДЗМВ)

Результати дисертаційної роботи докторанта доцента, к.т.н. Алієвої Л.І. та докторанта
доцента, к. т. н. Абхарі П. та аспіранта Картамишева Д.О., а саме:

- рекомендації з розробки процесів та штампового оснащення на основі використання схем
деформування комбінованим видавлюванням-висаджуванням в роз'ємних та рухомих
матрицях;

- методики розрахунку силових режимів процесів деформування видавлюванням
деталей в роз'ємних матрицях, що дозволяють розрахувати питоме навантаження на
інструмент та його стійкість;

- методики технологічних іспитів на штампуємість металу, що деформується в
холодному стану і розрахунку граничної деформівності на основі вичерпання ресурсу
пластичності в процесах холодного об'ємного деформування;

- методики нанесення зносостійкого покриття на інструмент для холодного
деформування на автоматах;

- маловідходні процеси радіального видавлювання-висаджування деталей типу шарових
пальців та наскрізного прошивання втулок і кілець

були використанні на ПАТ «Дружківський машинобудівний завод металевих виробів» у
рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення технологій та обладнання для
виробництва холоднодеформованих металевих виробів.

Реальний економічний ефект становив 460 тис. грн. за рівнем цін 2016 року. Очікуваний
економічний ефект від впровадження складає 950 тис. грн. за рівнем цін на 2016 рік.

Пайова участь виконавця роботи складає:

П.І.Б.	Відсоток, %	Економічний ефект, грн.	Очікуваний економічний ефект, грн.
Алієва Л.І.	55 %	253 000	522 500
Абхарі П.	25 %	115 000	237 500
Картамишев Д.О.	20 %	92 000	190 000

Керівник науково-дослідного сектору

О.Я. Белицька

«Затверджую»
Проректор з наукової роботи, управління
розвитком та міжнародних зв'язків

М. А. Герчанів

« 25 » 2018



ДОВІДКА

про пайову участь доцента к.т.н. докторанта **Абхарі Пеймана**,
доцента, к. т. н., докторанта **Сивака Романа Івановича** та аспіранта **Корденко Марії**
Юрїївни в економічному ефекті від результатів впровадження спільних науково-
дослідних робіт
Донбаської державної машинобудівної академії з ТОВ «Укртехконтакт»

Результати дисертаційної роботи докторанта доцента, к.т.н. Абхарі П., докторанта ВНТУ доцента, к. т. н. Сивака Р. І. та аспіранта Корденко М. Ю., а саме:

– розробка рекомендацій штампового оснащення на основі використання схем деформування, які забезпечать зниження зусиль розтягнення важконавантажених інструментів штампа

– розробка рекомендацій на основі енергетичного методу щодо вибору раціональних геометричних параметрів компенсаційної порожнини при проектуванні технологічних процесів;

– оцінка технологічної деформовності на основі енергетичного підходу, що дозволило встановити залежності граничного ступеня деформації пластичного деформування від шляху навантаження і отримати фізично обґрунтований критерій деформовності.

були використанні на ТОВ «Укртехконтакт» у рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення технологій та обладнання для виробництва деформованих металевих виробів.

Реальний економічний ефект становив 300 тис. грн. за рівнем цін 2017 року.

Пайова участь виконавця роботи складає:

П.І.Б.	Відсоток, %	Економічний ефект, грн.
Абхарі П.	50 %	150 000
Сивак Р. І.	33 %	100 000
Корденко М. Ю.	17 %	50 000

Керівник науково-дослідної сектору

О.Я. Белицька

Затверджую:

Перший проректор Донбаської
державної машинобудівної академії

 « 10 » 12 2018 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Матеріали дисертаційної роботи, виконаної докторантом кафедри «Обробка металів тиском» Абхарі Пейманом на тему «Розвиток наукових основ і удосконалення процесів точного об'ємного штампування на основі регулювання кінематики пластичного формозмінення», що включають:

– аналіз напрямків, методів і рішень практичних і теоретичних завдань для створення і реалізації ресурсозберігаючих технологій ТОШ;

– розробку чисельних математичних моделей для розрахунку силового режиму, формозміни і напружено-деформованого стану заготовки в процесах осесиметричної і плоскої деформації в умовах закритого штампування в рухомих матрицях;

– аналіз закономірностей зміни напружено-деформованого стану, силового і деформаційного режиму з регулюванням кінематики пластичної течії на основі математичних моделей в залежності від геометричних та кінематичних параметрів технологічних процесів комбінованого та бокового видавлювання;

– розробку на основі теоретичних та експериментальних досліджень технологічних режимів процесів ТОШ

– систематизацію технологічних рекомендацій, які використовуються на кафедрі «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії у вигляді навчальних посібників, таких як «Теорія обробки металів тиском», «САПР технологій та оснастки» та лекційних матеріалів в рамках викладання наступних спеціальних дисциплін: «Теорія обробки металів тиском», «Основи методу скінченних елементів», «Теорія процесів ковальсько-штампувального виробництва. ХОШ», а також при виконанні курсових, дипломних проектів та магістерських дослідницьких робіт студентами та магістрами спеціальності 136 «Металургія».

Зав. каф. «Обробка металів тиском»
д-р техн. наук, проф.


 I. С. Алієв