ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

*Кваліфікаційна наукова*
*праця на правах рукопису*

**КОСІЛОВ МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 621.735.3

**ДИСЕРТАЦІЯ**

# УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КУВАННЯ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ СПОСОБОМ РОЗКОЧУВАННЯ СТУПІНЧАСТИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____( М. С. Косілов)

Науковий керівник
д. т. н., професор Марков Олег Євгенійович

Краматорськ – 2018

# АНОТАЦІЯ

*Косілов М. С.* Удосконалення технологій кування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки способом розкочування ступінчастим інструментом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена актуальному науково-технічному завданню з розширення можливостей процесів кування на гідравлічному пресі шляхом використання профільованого інструменту для підвищення ефективності виготовлення виробів з профільованою поверхнею шляхом наближення форми поковки до форми деталі. Робота спрямована на удосконалення процесу розкочування завдяки отриманню більш складної конфігурації форми пустотілих поковок, в результаті чого зменшується використання металу, підвищується якість продукції за рахунок спрямованої течії металу та розширюється номенклатура виробів.

Метою роботи є підвищення механічних властивостей та зниження витрат металу при виготовленні пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки шляхом розробки нових ресурсозаощаджувальних технологічних процесів деформування на основі застосування ступінчастого інструмента під час розкочування.

Під час розробки технологічного процесу кування форму пустотілих деталей зі змінним поперечним перерізом спрощують додаванням напуску, що призводить до збільшення витрат спеціальних сталей у відхід, а потрібний профіль виготовляють механічною обробкою. В результаті виготовлення конструктивних елементів механічною обробкою відбувається переріз волокон структури металу, яка утворюється у процесі деформування, що призводить до зниження міцності в цих ділянках. Зважаючи на це, у роботі досліджений та розроблений новий енерго- та ресурсозаощаджувальний технологічний процес

розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки, за допомогою використання спеціального профільованого інструменту. Також розроблені раціональні режими деформування, завдяки яким будуть вивчені закономірності та режими формозміни, а також деформований стан обичайок з однобічним виступом в процесі розкочування ступінчастим бойком.

На основі проведеного літературного аналізу визначено, що завдяки застосуванню профільованого інструменту при розкочуванні можна значно знизити витрати матеріалу та підвищити механічні властивості пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки. Аналіз наявних схем розкочування дозволив встановити, що основні обмеження застосування профільованого інструменту пов’язані зі складністю прогнозування формоутворення поковки при деформуванні. Використання теоретичних методів розрахунку, заснованих на рішенні методом скінчених елементів (МСЕ), дозволили визначати напружено-деформований стан (НДС) заготовки. Однак, певні особливості переміщення матеріалу обмежують застосування профільованого інструменту при розкочуванні пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки на практиці.

Нові способи деформування ступінчастих заготовок полягають у використанні спеціального профільованого деформувального інструменту (ступінчастого бойка). Для реалізації способу спроектовано спеціальне оснащення та розроблені методики досліджень процесів деформування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки. Проаналізовано досвід моделювання процесів розкочування профільованих заготовок, в яких використовувався відповідний інструмент. Це дозволило встановити, що використання спеціального деформувального інструменту чинить вплив на розподіл деформацій та напружень, що впливає на структуру металу, який деформується. Завдяки розробці скінченно-елементних моделей встановлено НДС та формозміну поковок різної геометрії при деформуванні їх профільованим інструментом. Запропоновані способи розкочування поковок зі змінною товщиною стінки дозволяють підвищити механічні властивості,

створити сприятливу внутрішню будову металу та знизити витрати енергії на їх виробництво.

Аналіз отриманих теоретичних результатів дозволяє обрати оптимальні способи розкочування зазначених заготовок, які сприяють виготовленню поковок з мінімальними напусками на механічну обробку та меншими витратами енергії. На основі цих способів будуть розроблені технологічні режими деформування ступінчастим інструментом. За результатами теоретичного дослідження встановлено, що:

– під час одночасного розкочування виступу та уступу ступінчастої заготовки уступ інтенсивніше збільшується у діаметрі, ніж виступ, через що поковка має конусну форму з більшим діаметром отвору з боку уступу. Це пояснюється нерівномірністю деформації, яку отримують виступ та уступ через різницю у товщині стінки. Для зменшення конусності при одночасному розкочуванні виступу та уступу пропонується додавати напуск з боку виступу;

– при розкочуванні на початковій стадії виступу, з наступним одночасним розкочуванням виступу та уступу утворюється конусна поковка з більшим діаметром з боку виступу. Це виникає через більшу деформацію виступу.

Отже, на основі МСЕ визначені геометричні параметри заготовки зі змінною товщиною стінки, які впливають на формоутворення під час розкочування ступінчастим інструментом, завдяки чому встановлені закономірності формування НДС пустотілої поковки зі змінною товщиною стінки.

При виконанні експериментальної частини встановлено параметри формозміни внаслідок варіювання розмірів заготовок. Для виконання експериментальних досліджень був застосований метод планування експерименту, а для отримання закономірностей формозміни заготовки застосований метод статистичної обробки факторного плану $З^3$. На основі результатів експерименту на свинцевих зразках за допомогою методів статистичного аналізу були отримані регресійні рівняння для відносного

діаметра виступу поковки, відносного діаметра уступу поковки та співвідношення діаметрів отвору з боку виступу та уступу поковки від відносного діаметра виступу заготовки, відносного діаметра уступу заготовки та ступеня деформації. Отримані регресійні моделі дійсні у діапазоні ступеня деформації 0,1…0,3 та при співвідношенні довжини виступу до загальної довжини 0,4…0,5.

Для встановлення механічних властивостей поковок, які розкочуються ступінчастим інструментом, були проведені експерименти на сталевих зразках. Куванням були отримані дві заготовки для розкочування, з яких було вирізано по одному поздовжньому зразку для дослідження. Показником механічних властивостей обрано твердість, яка замірялася на поздовжньому перерізі поковок. Вимірювання твердості проводилося за методом Роквелла, по шкалі b. Встановлено, що в уступі заготовки, яка деформувалася ступінчастим бойком, твердість на 4-6 одиниць більша, ніж в уступі заготовки, яка деформувалася плоским бойком для розкочування.

Також на отриманих поздовжніх зразках досліджувалися макроструктура та мікроструктура. За результатами дослідження макроструктури було встановлено, що завдяки застосуванню ступінчастого бойка отримана структура металу, волокна якої повторюють профіль кінцевого виробу. Мікроструктурний аналіз дозволив встановити, що зерна в уступі поковки, яка розкочувалася ступінчастим інструментом, більш подрібнені, ніж у випадку застосування плоского бойка. Для підтвердження цих результатів був виконаний аналіз балу зерна, для чого застосовувався метод підрахунку зерен.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблений новий науково обґрунтований спосіб деформування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки з використанням нового профільованого інструменту та оптимальних режимів деформування, які будуть сприяти підвищенню механічних властивостей поковок відповідального призначення та зниженню витрат енергії та металу на їх виготовлення. За результатами роботи розроблено алгоритм розрахунку заготовки для розкочування, карта

технологічного процесу та креслення спеціального ступінчастого деформувального бойка для реалізації нового енерго- та ресурсозаощаджувального методу виготовлення ступінчастих обичайок.

Методичні матеріали щодо проектування технологічного процесу кування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки та рекомендації з проектування ступінчастого бойка передані для промислового освоєння. Завдяки зміні форми поковки в цілому собівартість виготовлення пустотілих деталей з односторонніми виступами знизилася на 10-15% в умовах виробництва ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», що підтверджено актом впровадження. Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються студентами спеціальностей «Обробка металів тиском» (ОМТ) та «Механіка пластичного формування» (МПФ) при виконанні проектних та практичних робіт.

**Ключові слова:** кування, розкочування, пустотіла поковка, напуск, фланцева обичайка, конусність, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан, планування експерименту, ступінчастий бойок, заготовка.

# ABSTRACT

Kosilov M. S. Improvement of forging technology of the hollow forgings with variable wall thickness by step tool enlarging. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the candidate of technical science degree, specialty 05.03.05 – Processes and Machines of plastic working. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk. 2018.

The dissertation is devoted to the actual scientific and technical task of expanding the forging capabilities on a hydraulic press by using a profiled tool to increase the effectiveness of manufacturing products with a profiled surface by approaching the form of forging to the shape of the part. The work is aimed at improving the enlarging process due to the obtaining of a more complex configuration of the hollow forgings shape, which reduces the use of metal, improves the quality of products due to the direction of the metal flow, and expands the range of products.

The purpose of the work is to increase mechanical properties and reduce energy and metal costs in the manufacture of hollow forgings with variable wall thickness (such as flange shells) due to the development of new energy-saving technological processes of deformation.

During the working of the forging technological process, the shape of hollow parts with variable cross-section are simplified by addition of a fall-over, and the desired profile is made by machining. As a result the manufacture of these elements, the cutting of metal structure fibers formed by the deformation occurs during machining. It leads to decrease the strength in these areas, as well as an increase the cost of special steels in the waste. In this connection, new energy- and resource-saving technological processes for the fabrication of hollow forgings with variable wall thickness, using a special profiled tool and optimal deformation modes, have been researched and developed. Due to it, regularities and modes of form change

and the deformed state of the shell with a one-sided protrusion in the process of enlarging by a stepped die will be studied.

Based on the conducted literary analysis, it is possible to significantly reduce the material cost and improve the mechanical properties of hollow forgings with variable wall thickness due to the application of the profiled tool during enlarging. The analysis of existing enlarging schemes allowed to establish that the main limitation of the profiled instrument using was due to the prediction difficulties of forging shaping during deformation. The use of theoretical calculation methods, based on the decision of the finite element method, allows to determine the stress-strain state of the workpiece. However, certain features of material movement limit the use of the profile tool during enlarging of hollow forgings with variable wall thickness in practice.

New ways of deforming stepped blanks are to use a special profiled deforming tool (step die). In order to implement the method, special equipment was designed and techniques for investigating the deformation hollow forgings with variable wall thickness were developed. The experience of modeling the enlarging processes of profiled billets using the corresponding tool was studied, and it was found that the use of a special deforming tool influences the distribution of deformations and stresses, as well as the formation of macro-streams of deformed metal. Thanks to the development of finite-element models, the stress strain state of the workpiece and the shaping of the different geometry blanks is determined by deforming with a profiled tool. The proposed methods of rolling forgings with a variable wall thickness will improve mechanical properties, create a favorable internal structure of the metal and reduce the cost of energy for their production.

The analysis of the obtained results allows choosing the optimal methods of deformation of the mentioned forgings, which facilitate the manufacture of blanks with minimal mechanical fall-over and lower energy consumption. Based on these methods, technological regimes of deformation of the reactor blocks shells will be developed. According to the results of the theoretical study, it was established:

– during the simultaneous slipping of the salient and the ledge of the stepped workpiece, the ledge more intensively increases in diameter than the salient, through that the forging has a tapered shape with a larger hole diameter from the ledge. This is explained by the unevenness of the total deformation obtained by the ledge and ledge, due to the difference in the thickness of the wall. The perspective direction of the study is the addition of the fall-over from salient to eliminate the taper during simultaneously enlarging the salient and the ledge;

– during enlarging of the salient in the initial stage, followed by the simultaneous enlarging of the salient and the ledge, a conical forging with a larger diameter from the side of the projection is formed. This occurs due to a larger total deformation of the salient.

Thus, based on the finite element method, the geometric parameters of the workpiece with variable wall thickness are determined, which makes it possible to determine the regularities of stress strain state formation of the hollow forging with a variable wall thickness, which influence formation during the enlarging with a stepped tool.

The parameters of the shape change were determined by varying the size of the workpiece during realization the experimental part. In order to carry out experimental research, a method of planning was used, and a method of statistical processing for model $3^3$ was used to obtain the regularities of the shaping of the workpiece. Based on the results of the experiment on lead samples, using regression models, regression models were obtained for the relative diameter of the forging salient, the relative diameter of the forging ledge and the ratio of the diameters of the hole from the side of the salient and the ledge of the forging from the relative diameter salient of the workpiece, the relative diameter ledge of the workpiece and the deformation degree. The obtained regression models are valid in the range of the deformation degree of 0.1 ... 0.3 and with the ratio of the length of the ledge to the total length of 0.4…0.5.

Experiments on steel samples were carried out to determine the mechanical properties of forgings, which are enlarged by a stepped tool. Two forging pieces

were obtained forging, from which one longitudinal sample was cut for research. The index of mechanical properties is the hardness measured on the longitudinal section of forgings. Hardness measurements were performed using the Rockwell method, on the scale b. It was established that in the step of the workpiece, which was deformed by a stepped die, the hardness was 4-6 units greater than that in the ledge of the workpiece, which was deformed by a flat die for enlarging.

Also, on the obtained longitudinal samples, the macrostructure and microstructure were studied. According to the results of the study of the macrostructure, it was established that due to the use of step die a structure of the metal is obtained, the fiber of which repeats the profile of the final product. The microstructural analysis allowed to establish that the grains in the forging ledge, which was enlarged by a stepped tool, were more shredded than in the case of flat die. To confirm these results, a grain score analysis was performed, which was used for the method of counting grains.

Thus, on the basis of experimental studies of enlarging hollow forgings by the stepped deforming tool, the regularities of changing the workpiece size during deformation are established. A regression model allowed to calculate the relative dimensions of the stepped workpiece for rolling was received. Also, on the basis of experimental studies of hollow forging enlarging, the profiled tool has determined dangerous zones that contribute to the formation of defects, which has changed the working surface of the tool and reduced the probability of the formation of clamps.

Based on theoretical and experimental researches, new scientifically formed methods of deformation of hollow forgings with variable wall thickness using new profiled tools and optimal deformation modes have been developed. It will help to increase the mechanical properties of the forgings of responsible assignment and reduce the energy and metal cost. According to the work results, algorithm for calculating the workpiece for enlarging, a map of the technological process and a drawing of a special profiled deforming tool for the implementation of a new energy- and resource-saving method for the production of stepped lining has been developed.

Methodical materials to the design of the technological process of forging hollow forgings with variable wall thickness and recommendations for the design of the stepped die transmitted for industrial developing. Due to the change in the forging type, the cost of manufacturing hollow parts with one-sided projections has decreased by 10-15% in the production of Private Joint Stock Company "Novokramatorsky mashinostroitelny zavod", which is confirmed by the act of implementation. Results of theoretical and experimental researches are used by students of the metal forming department and metal forming machinery department in carrying out design and practical work.

**Keywords:** forging, enlarging, hollow forging, fall-over, stepped shell, taper, finite element method, stress-strain state, experimental planning, stepped tool, blank.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА


1. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state / O. E. Markov, A. V. Perig, M. S. Kosilov [et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2017. – №39. – P. 4649–4665. – https://doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y

2. Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування / О. Є. Марков, М. С. Косілов, О. В. Герасіменко, С. О. Шевцов // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №3. – С. 47–53. – http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.115224

3. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2. – С. 85–91. – DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575

4. Аналіз формозміни та деформованого стану тонкостінної трубної заготовки за новим способом деформування / О. Є. Марков, А. О. Шарун, О. В. Герасіменко, М. С. Косілов // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – №1 (82). – С. 28–33. – http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.112353

5. Дослідження формозміни та деформованого стану східчастих заготовок під час розкочування профільованим бойком / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, Є. В. Інчаков // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2017. – №5. – С. 82–88.

6. Дефектоутворення на обичайках з одностороннім уступом під час розкочування профільованим східчастим інструментом / М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. Є. Марков, А. С. Хващинський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2018. – №2(109). – С. 41-47.– DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.p1.41-47

7. Моделювання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Вісник НТУ «ХПІ». Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків, 2017. – № 35. – С. 25–29.

8. Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми / О. Є. Марков, М. С. Косілов, В. Ю. Станков, П. І. Різак // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – №40. – С. 130–137.

9. Влияние угла клиновых бойков 160° на схему напряженного состояния поковки в процессе протяжки / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, П. И. Ризак // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2016. – №2 (43). – С. 51–56.

10. Современные тенденции изготовления тонкостенных пустотелых поковок для энергетической промышленности / О. Е. Марков, А. И. Лобанов, М. С. Косилов [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – №1(40). – С. 5–10.

11. Разработка новых заготовок для поковок ответственного назначения / О. Е. Марков, А. В. Герасименко, М. С. Косилов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – №2(41). – С. 124–130.

12. Пат. 122773 Україна, МПК (2006) B 21 J 5 / 00. Спосіб кування кільцевих поковок зі ступінчастою поверхнею / О. Є. Марков, О. І. Лобанов, М. С. Косілов, А. О. Шарун, Є. В. Інчаков, заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201707819; заявл. 25.07.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

13. Пат. 117176 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб кування опорних валків / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, М. С. Косілов, А. В. Коляденко; заявник та власник патенту Донбаська державна

машинобудівна академія. – № u201609278; заявл. 05.09.2016; опубл. 26.06.2017, бюл. № 12.

14. Пат. 118042 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб кування криволінійних плит / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, М. С. Косілов, А. О. Шарун; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612114; заявл. 29.11.2016; опубл. 25.07.2017, бюл. № 14.

15. Косилов М. С. Способы получения пустотелых поковок для энергетической промышленности / М. С. Косилов, Е. В. Инчаков // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2017»: сб. тезисов докладов в 3-х томах. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017 – С. 174–175.

16. Дослідження процесів кування пустотілих поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, А. О. Шарун, М. С. Косілов, К. В. Орлик // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.) – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – С. 267–269.

17. Розробка нових заготовок для поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, О. В. Герасименко, М. С. Косілов, С. О. Шевцов // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 88.

18. Косілов М. С. Дослідження деформованого стану та формоутворення ступінчастої поковки під час розкочування / М. С. Косілов, О. В. Герасименко // Ресурсозбереженя та енергоефективність процесів і обладнання обробки металів тиском у машинобудуванні та металургії : матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції, 22–24 листопада 2017 р. – Харків, 2017. – С. 35.

19. Косілов М. С. Аналіз формозміни обичайок з виступом при розкочуванні профільованим бойком / М. С. Косілов, О. В. Герасіменко // Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції студентів,

аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25 – 26 квітня 2018 р. – Кременчук, 2018. – С. 75–76.

*Додатково наукові результати відображені в роботах:*

20. Использование выпуклых бойков для повышения качества крупных плит / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, Н. И. Нагиев // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2016. – № 1 (19Е). – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2016_1_10

21. Современные способы получения тонкостенных деталей ответственного назначения / О. Е. Марков, А. О. Шарун, М. С. Косилов, Е. В. Инчаков // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2017. – №1(44). – С. 115–122.

22. Разработка нового способа ковки днищ / О. Е. Марков, В. Ю. Станков, М. С. Косилов [и др.] // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2017. – №2(45). – С. 63–66.

23. Пат. 118099 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб протягування заготівок з карбідних сталей / П. П. Кальченко, В. М. Олешко, О. Є. Марков, В. В. Антонов, М. С. Косілов, А. О. Шарун; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201700269; заявл. 10.01.2017; опубл. 25.07.2017, бюл. № 14.

ЗМІСТ

ВСТУП 19
1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК 26
1.1 Злитки для виготовлення пустотілих поковок 26
1.2 Методи виготовлення обичайок 35
1.3 Інструмент для розкочування 41
1.4 Дослідження процесів кування крупних кільцевих поковок 57
Висновки 61
Список використаних джерел 63
2 МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗКОЧУВАННЯ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ 74
2.1 Вибір напрямку дослідження розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки 74
2.2 Методика теоретичних досліджень розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки 78
2.3 Методика проведення експериментальних досліджень розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки 83
2.4 Метод визначення формозміни пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки під час розкочування ступінчастим бойком 92
Висновки 97
Список використаних джерел 98
3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕНЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ 102
3.1 Моделювання процесу розкочування пустотілої поковки МСЕ 102
3.2 Аналіз формоутворення поковки при одночасному деформуванні виступу та уступу на початковій стадії розкочування 105

3.3 Способи зменшення конусності при одночасному деформуванні виступу та уступу на початковій стадії розкочування 110
3.4 Аналіз формоутворення поковки при деформуванні виступу на початковій стадії розкочування 117
3.5 Аналіз формоутворення поковки при зменшені розмірів виступу 124
3.5.1 Вплив зміни довжини виступу на формоутворення поковки зі змінною товщиною стінки 124
3.5.2 Вплив зміни зовнішнього діаметра виступу на формоутворення поковки зі змінною товщиною стінки 126
Висновки 129
Список використаних джерел 130
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ 133
4.1 Розкочування заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{cp} = 2,05$ 133
4.2 Розкочування заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{cp} = 1,85$ 141
4.3 Розкочування заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{cp} = 1,65$ 147
4.4 Регресійна модель процесу розкочування ступінчастих обичайок 154
4.5 Дослідження механічних властивостей та структури металу на сталевих зразках 157
Висновки 162
Список використаних джерел 165
5 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ ОБИЧАЙОК З ФЛАНЦЕМ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО КОНСТРУЮВАННЯ СТУПІНЧАСТОГО БОЙКА ДЛЯ РОЗКОЧУВАННЯ 166
5.1 Методика проектування технологічних процесів розкочування обичайок з фланцем та загальні рекомендації 166
5.2 Розширення технологічних можливостей отримання кільцевих поковок 175

5.3 Рекомендації щодо конструювання інструменту для розкочування обичайок з фланцем 178
5.4 Розробка промислової технології кування обичайок з фланцем 182
Висновки 190
Список використаних джерел 191
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 194
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача: 198
ДОДАТОК Б Апробація результатів дисертаційної роботи на Міжнародних конференціях 203
ДОДАТОК В Програма для визначення коефіцієнтів рівнянь регресії та статичної обробки експериментальних даних для співвідношення діаметрів отвору $d_{п.в}/d_{п.у}$ : 204
ДОДАТОК Г Програма для визначення коефіцієнтів рівнянь регресії та статичної обробки експериментальних даних для відносного діаметра уступу $D_{п.у}/d_{п.у}$ : 207
ДОДАТОК Ґ Програма для визначення коефіцієнтів рівнянь регресії та статичної обробки експериментальних даних для відносного діаметра уступу $D_{п.в}/d_{п.в}$ : 210
ДОДАТОК Д Порівняння даних, розрахованих за регресійними моделями, та даних, отриманих з експериментів на свинці 213
ДОДАТОК Е Результати мікроаналізу структури металу поковок 216
ДОДАТОК Є Акти впровадження результатів дисертаційної роботи 220

# ВСТУП

**Актуальність теми.** Машинобудування України є високотехнологічною галуззю машинобудівного комплексу, яка охоплює сукупність підприємств-виробників, проектно-конструкторських і науково-дослідних організацій. Сучасні економічні умови ставлять перед Україною потребу в пошуку нових ринків збуту енергетичного обладнання. У зв'язку з цим постає питання виготовлення продукції машинобудування з забезпеченням прийнятної ціни при високій якості та надійності.

Одним з видів продукції, яку виготовляють вітчизняні машинобудівні підприємства, є вироби для АЕС, зокрема елементи корпусу реактора, які мають профільовану поверхню. До таких виробів найчастіше належать обичайки з однобічними виступами, у яких змінюється товщина стінки. Традиційний виробничий шлях виготовлення таких деталей полягає у куванні обичайки з гладкими поверхнями (внутрішньою та зовнішньою) та подальшій механічній обробці до потрібних розмірів та форми. Недоліки такого способу полягають у необхідності додаткової механічної обробки для надання необхідної форми, що призводить до збільшення загального часу виготовлення деталі. Проте під час механічної обробки значна кількість металу йде у відходи, що призводить до збільшення собівартості виробництва. Крім того, надання необхідної форми шляхом механічної обробки призводить до перерізу волокон металу у місці зміни товщини стінки, що зменшує строк експлуатації виробу.

Одним з напрямків удосконалення технологічних процесів деформування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки є використання інструменту з профільованою поверхнею. Застосування подібного інструменту дозволяє змінити напружено-деформований стан (НДС) заготовки в процесі деформування, що підвищує якість виробу, наближує форму поковки до деталі, завдяки чому зменшуються напуски та утворюється волокниста структура, яка повторює профіль деталі. Крім того, наближення

форми поковки до профілю деталі дозволить зменшити переріз волокон під час подальшої механічної обробки, знизити витрати енергії, загальний час та собівартість виготовлення.

Всупереч перевагам використання в технологічних циклах кування операції розкочування інструментом з профільованою поверхнею, вона вимагає точного вибору режиму деформування з урахуванням параметрів заготовки для розкочування, ступеня деформації та геометрії робочого інструмента. Тому кожне нове застосування таких способів вимагає ретельних попередніх досліджень, які б полегшували проектування технологічних карт кування та використання інструмента з профільованою поверхнею на практиці. В іншому випадку налагодження і застосування технологій на виробництві потребує часу, а процес супроводжується появою дефектів. Розв'язання цих питань пов'язане з подальшим проведенням теоретичних та експериментальних досліджень для створення рекомендацій та методики проектування процесів та конструювання інструменту для розкочування. На сьогодні немає рекомендацій з геометричних параметрів робочого інструменту та розмірів пустотілої заготовки перед розкочуванням, які б дозволили виготовляти поковки типу «обичайка з виступом», покращити пропрацювання литої структури та отримати задані розміри поковок.

Виходячи з вищевикладеного, тема дисертаційної роботи, яка присвячена удосконаленню технологій кування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки способом розкочування ступінчастим інструментом, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні «Нові речовини і матеріали» (Закон України №2519-IV від 9 вересня 2010 року) і науковому напрямку «Розвиток ресурсозаощаджувальних процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методики аналізу і закономірностей пластичного деформування» наукової школи кафедр «Механіка пластичного формування» (МПФ) та «Обробка

металів тиском» (ОМТ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА). Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), передбачених планами Міністерства освіти і науки України на кафедрі МПФ ДДМА (№ держреєстрації 0114U002536, 0116U003614, 0118U003047). Автор був відповідальним виконавцем при виконанні держбюджетної теми № 0118U003047 та виконавцем в інших.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення механічних властивостей та зниження витрат енергії та металу при виготовленні поковок зі змінною товщиною стінки шляхом розробки нових енерго- та ресурсозаощаджувальних технологічних процесів деформування на основі застосування ступінчастого інструмента під час розкочування.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі основні завдання:

– виконати аналіз наявних тенденцій та шляхів удосконалення процесів розкочування обичайок профільованим інструментом;

– обрати методи, програмне забезпечення та розробити загальну методику для дослідження процесів розкочування обичайок зі змінною товщиною стінки;

– виконати теоретичний аналіз НДС та формозміни заготовки при розкочуванні ступінчастим бойком, встановити фактори, що впливають на параметри формозміни;

– виконати експериментальні дослідження розкочування обичайок зі змінною товщиною стінки та на їх основі отримати закономірності параметрів формозміни заготовки від ступеня деформування та математичну модель, встановити межі її застосування;

– провести металографічне дослідження та визначити базові механічні властивості поковок, які отримані за базовою та за новою технологіями;

– розробити методику та надати рекомендації щодо виготовлення куванням пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки, на їх основі

розробити технологічні процеси розкочування та запропонувати конструкцію профільованого деформувального інструменту.

**Об’єкт дослідження.** Процес розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки.

**Предмет дослідження.** Закономірності та режими формозміни, деформований стан та показники якості пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки в процесі розкочування ступінчастим бойком.

**Методи дослідження.** В основу теоретичних досліджень НДС, зміни геометричних параметрів, які впливають на формоутворення, покладено метод скінченних елементів (МСЕ).

Експериментальні дослідження процесу проводилися з використанням методів фізичного моделювання на свинцевих та сталевих моделях. Для зменшення кількості експериментів та отримання достатньої кількості даних застосовувався метод планування експерименту. Для визначення показників якості була досліджена структура сталевих зразків, шляхом метода підрахунку зерен визначено бал зерна, за методом Роквелла виміряна твердість.

Для обробки масиву даних, який отримано під час експериментальних досліджень, використовувалися методи математичної статистики, завдяки яким отримані регресійні рівняння формозміни заготовки в процесі розкочування.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше на основі методу скінченних елементів отримані кількісні оцінки напружено-деформованого стану кільцевої поковки з однобічним виступом, яка розкочується, в залежності від геометричних параметрів заготовки, ступеня деформації та схем деформування, що дозволило встановити раціональні режими реалізації досліджуваних процесів розкочування, які відрізняються кількістю зон в осередку деформації;

– вперше на основі регресійного аналізу експериментальних досліджень процесу розкочування кільцевих поковок зі змінною товщиною стінки ступінчастим інструментом встановлені залежності для визначення розмірів

вихідної профільованої заготовки від розмірів поковки, ступеня та схеми деформування, які дозволяють встановити раціональні розміри і форму заготовки для розкочування, що підвищує точність розмірів та форми поковок, які виготовляються;

– вперше на основі теоретичного та експериментального аналізу процесу розкочування профільованим інструментом визначено характер поетапної зміни НДС кільцевої поковки з однобічним виступом в залежності від різниці між діаметрами виступу та уступу та встановлена небезпечна перехідна зона біля основи виступу, яка може призвести до утворення кільцевого затиску, для усунення якого запропонована форма робочого інструменту з раціональним кутом ступінчастого переходу;

– отримали подальший розвиток уявлення про закономірності зміни деформованого стану пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки при розкочуванні, які відрізняються від наявних підвищенням рівномірності розподілу деформацій шляхом використання ступінчастого інструменту для розкочування, що дозволило удосконалити технологічні режими кування, підвищити точність та знизити металомісткість процесу виготовлення.

**Практичне значення отриманих результатів:**

– запропоновано спосіб розкочування обичайок з однобічним виступом, який підвищує якість великогабаритних пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки внаслідок спрямованої течії металу та створення сприятливої волокнистої структури. На спосіб отримано патент;

– розроблено рекомендації для проектування технологічних процесів розкочування обичайок з фланцем, які дозволяють знизити витрати металу на 20…30 % внаслідок зменшення напусків;

– розроблено методику проектування технологічного процесу кування, яка дозволяє розрахувати геометричні параметри профільованої заготовки перед розкочуванням для отримання конічних або циліндричних поковок;

– розроблено універсальну конструкцію профільованого інструменту для розкочування та раціональну його геометрію, яка забезпечує керовану течію металу та дозволяє уникнути виникнення дефектів;

– спроектовано новий технологічний процес деформування обичайки з фланцем, який передбачає отримання профільованої заготовки і її розкочування ступінчастим бойком.

**Особистий внесок здобувача.** Внесок автора у процесі виконання роботи полягає в обґрунтуванні та вирішенні теоретичних завдань з визначення НДС заготовки під час її формозміни, розробці нових технологій і практичних рекомендацій для розкочування кільцевих виробів зі змінною товщиною стінки. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані у співавторстві, автору належить вибір і розробка методів досліджень, проведення теоретичного аналізу процесів розкочування ступінчастим бойком, підготовка та проведення експериментів, аналіз і узагальнення отриманих результатів. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

**Публікації.** Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 23 роботах з наукової тематики, з них 7 статей у спеціалізованих виданнях (з яких 5 статей, що входять до міжнародних наукових баз даних), 6 робіт у збірниках за матеріалами науково-технічних конференцій. Отримано 4 патенти України на корисну модель (додаток А).

**Апробація роботи.** Основні результати дисертації доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК):

XIX – XXI МНТК «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» 2016 – 2018 р., м. Краматорськ; V МНТК молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 17-18 листопада 2016 року, м. Тернопіль; МНТК «Університетська наука – 2017» 18-19 травня 2017р., м. Маріуполь; VI МНТК «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» 25-28 вересня 2017р., м. Краматорськ;

IX МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» 22-24 листопада 2017 р., м. Харків; XXV МНТК студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» 25-26 квітня 2018 р., м. Кременчук; IX МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» 28 травня – 1 червня 2018 р., м. Київ – м. Херсон., а також на щорічних наукових конференціях ДДМА (2015 – 2018 рр.) і об'єднаному науковому семінарі з МПФ ДДМА (2018 р.) (додаток Б).

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, п’яти розділів з опціональним формуванням списку використаних джерел (загалом 145 джерел) та восьми додатків. Загальний обсяг роботи 222 сторінки, в тому числі 14 сторінок анотації, 135 сторінок основного тексту, 22 рисунка на окремих сторінках, 3 таблиці на окремих сторінках, список використаних джерел та 8 додатків на 48 сторінках.

# 1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК

## 1.1 Злитки для виготовлення пустотілих поковок

В останні роки кількість крупних поковок відповідального призначення зростає, що пов'язано зі збільшенням потужностей та кількості енергетичних установок та важких машин. Серед виробів заводів важкого та енергетичного машинобудування значну кількість представляють обичайки та кільця. Такі поковки відносяться до відповідальних і до них висуваються високі вимоги за ізотропністю механічних властивостей, внутрішньої структури та ін. Технологічні процеси кування таких поковок передбачають застосування операції розкочування.

Серед вчених багато розробок щодо виготовлення поковок відповідального призначення для енергетичного машинобудування з використанням профільованого інструменту належить вітчизняним та закордонним дослідникам, таким як: Алієв І. С., Жбанков Я. Г., Злигорєв В. М., Кальченко П. П., Марков О. Є., Соколов Л. М., Чухліб В. Л., Aso K., Barbelet M., Costes F., Enami T., Giardin G., Jaouen O., Jobard D., Ohashi N., Lasne P., Perdriset F., Sato I., Suzuki K., Wanaka H., та іншим.

У зв’язку зі збільшенням потужності енергетичної промисловості удосконалюються технології виробництва елементів реакторів, а саме корпусів реакторних блоків, які складаються з обичайок змінюваної товщини. Зростають вимоги щодо якості отримуваних виробів, а разом з цим і якості злитків, з яких вони куються. Що стосується таких кованих деталей, як великогабаритні кільця або обичайки для судин під тиском, то для їх виготовлення відливаються унікальні злитки масою від 100 до 400 т. Найбільші з відлитих для кування обичайок злитки мали вагу понад 600 т [1.1].

Ковані корпуси можуть бути виготовлені як зі звичайних злитків (рис. 1.1, а) з застосуванням технологічної операції прошивання, так і з

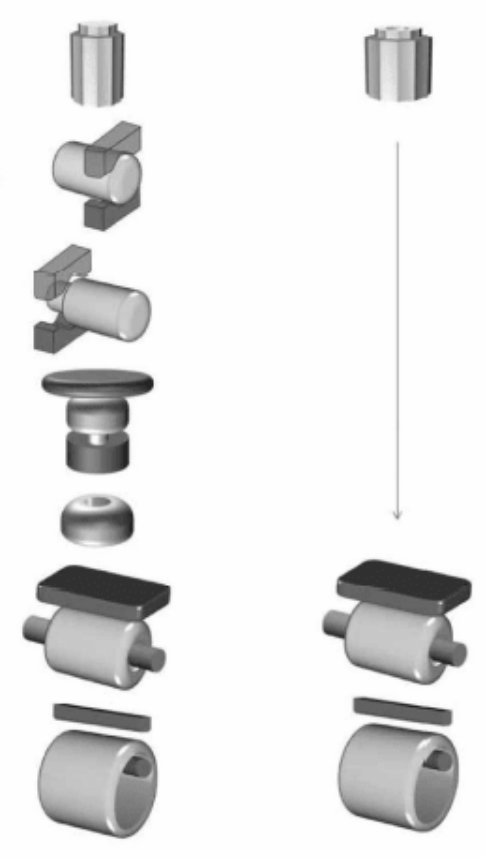
пустотілих (рис. 1.1, б) [1.2, 1.3]. Через необхідність осаджування та прошивання звичайного злитка необхідна більша кількість матеріальних та енергетичних ресурсів, що є достатньо неефективним методом виробництва таких деталей. Для зниження витрат металу та ваги злитків, які йдуть на виготовлення кільцевих поковок, був розроблений пустотілий злиток, завдяки якому значно спрощується послідовність кування та зменшується кількості нагрівань (рис. 1.1, б) [1.4].

Під час кристалізації звичайного злитка, після лиття, з'являються пустотні дефекти, такі як пористість, усадкові раковини, газові порожнини. Аналіз результат поздовжнього [1.5 – 1.7] та поперечного [1.2] розрізу показав пустоти та тріщині в центрі злитка (рис. 1.1 а), які повинні бути усунуті в процесі кування.

Одним з найбільш типових дефектів звичайних злитків є осьова усадкова пористість, яка супроводжується включеннями та макроліквaціями, що чітко проявляється на розрізі 100 тонного злитка марки 30Cr2Ni4MoV [1.8]. Такий злиток був розділений по осі, після чого поверхню розрізу було досліджено для встановлення розподілу і розмірів усадкової пористості. За отриманими даними було зроблено 3D моделювання, яке дозволило встановити оптимальні температуру та швидкість кристалізації для зменшення осьового дефекту.

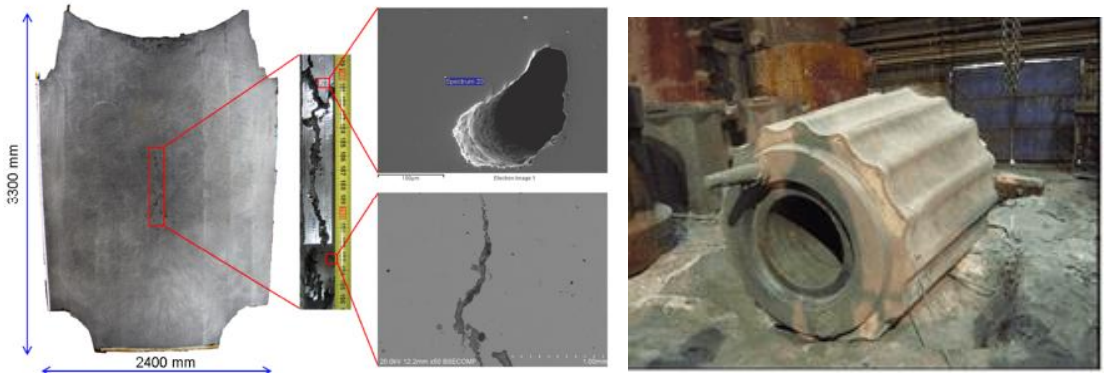
У роботах Колодкіна М. В., Шамрея В. А., Гаманюка С. Б. та інших [1.9 – 1.11] встановлено, що застосування охолоджувальної прибуткової надставки для злитків зі зворотною конусністю збільшує глибину розташування усадкової раковини у тіло злитка та концентрує її вздовж осі, що у свою чергу збільшує КВП на 7% для виробництва порожніх заготовок і зменшує ступінь неоднорідності хімічного складу злитку. Загальна ліквація вуглецю в такому злитку в три рази нижче, ніж у звичайному злитку.

У роботі Shinozaki T. та інших [1.12] описано виготовлення корпусу реактора зі звичайного злитка масою 190 т з модифікованої сталі 9Cr-1Mo-V. Технологія передбачала осадження і прошивання. Далі заготовка була протягнута на оправці до потрібної довжини та розкатана за допомогою дорна



а) б)

Рисунок 1.1 – Схематичне зображення технології кування пустотілої поковки зі звичайного злитка (а) та з пустотілого злитка (б)




а) б)

Рисунок 1.2 – Зображення злитків для виготовлення пустотілих деталей: а – укорочений злиток з дефектами на осі, б – пустотілий злиток

та бойка для розкочування. Отримана поковка мала наступні розміри зовнішній діаметр 4550 мм, висота – 2640 мм, а товщина стінки – 310 мм. Наведена у статті технологія кування зі звичайного злитка передбачала два

нагрівання для осаджування та для прошивання, що призводить до суттєвого підвищення витрат енергоносіїв на виробництво. Доцільно було б використовувати пустотілий злиток для отримання подібної поковки. До того ж у роботі відсутні рекомендації щодо ступеня деформації, який робився за коло розкочування, що є доволі важливим при виготовленні тонкостінних поковок.

На початкової стадії кування звичайного злитка необхідно дефекти, які утворені при кристалізації та гомогенізації, сконцентрувати у центрі злитка, про що йдеться у роботі Tanaka Y. [1.13]. Після цього злиток осаджується, щоб зменшити висоту і збільшити діаметр. Це покращує однорідність розподілу деформацій і збільшує пророблення структури. Щоб сконцентрувати дефекти крупного злитка, ефект від кування має поширюватися до центру злитка, це вимагає розвитку і застосування процесів, в яких будуть оптимізовані температура кування, форма та розміри інструменту. Завдяки удосконаленню технологічного процесу кування компанія JWS виготовила зі злитка масою 350 т обичайку з фланцем та зоною патрубків.

У роботі Jaouen O. та інших [1.14] зазначається, що поковка виготовлена з пустотілого злитка, має певні переваги. В пустотілому злитку відсутні осьові дефекти, які виникають при кристалізації звичайного злитка. Наявність отвору в центрі злитка значно спрощує технологічний процес виготовлення пустотілої поковки. Застосування пустотілих злитків для виготовлення поковок з отвором, поряд з підвищенням якості виробів, забезпечує скорочення витрати металу на 25 – 30%, про що зазначається у роботах Казачкова Є. О. та Скобло С. Я. [1.15, 1.16].

Основним завданням розвитку машинобудування є висування його на принципово нові ресурсозаощаджувальні технології, які забезпечують підвищення продуктивності праці, економію матеріальних і енергетичних ресурсів. В значній мірі вирішення цих завдань сприяє впровадженню в промисловість прогресивних технологій кування пустотілих поковок [1.17]. Критеріями оптимальності в даному випадку служать висока якість і

прийнятна собівартість деталей відповідального призначення. Аналіз технологічних процесів виготовлення великих поковок обробкою тиском дозволив встановити, що 80...90% всіх технологічних процесів кування припускають застосування енергомісткої операції осаджування. Цю операцію призначають для збільшення площі поперечного перерізу заготовки та можливості отримання необхідних розмірів деталей. Оптимізація технологічних процесів виготовлення великих заготовок полягає у виключенні або в заміні неефективних енергомістких операцій такими, які не призводять до збільшення витрат, і водночас гарантують отримання заданої якості [1.18]. Виключити операцію осадження можна застосовуючи пустотілі злитки. Через те що пустотілий злиток не потрібно осаджувати та прошивати, ці операції виключаються, не потрібне енергомістке та тривале нагрівання злитка. Це значно заощаджує енергоресурси, скорочує загальний цикл виготовлення виробів і знижує нормо-години та в цілому сприяє зниженню собівартості виробу та підвищенню конкурентоспроможності продукції.

Промисловість вже має досвід виготовлення пустотілих деталей з пустотілих злитків. Він мав значний успіх, про що ідеться нижче. Як зазначено у роботі Бережко Б. І. та інших [1.19], з метою підвищення якості поковок відповідального призначення, для забезпечення нових перспективних енергоустановок підвищеної (до 1800 МВт) потужності ЦНДІ КМ «Прометей» спільно з ВАТ «Іжорські заводи» розробили технологію виробництва великогабаритних обичайок з пустотілих масивних злитків. Розроблена технологія виробництва заготовок корпусів атомних реакторів з ковальських злитків вагою до 360 т передбачає цілий ряд заходів для зниження ліквації легувальних елементів. Розв’язанням цієї проблеми є отримання сталі з особливо низьким вмістом шкідливих домішок, що не призводить до ліквації.

Sheffield Forgemasters International Ltd. ввела пустотілі злитки в номенклатуру своєї продукції [1.20]. За останні 25 років як у Франції, так і в Японії була проведена велика робота з вивчення процесу виникнення дефектів у пустотілому злитку та можливості їх усунення. В даний час пустотілі деталі

для атомної промисловості повинні мати дрібнозернисту мікроструктуру та високі показники механічних властивостей. В роботі пропонується удосконалювати процеси лиття та кристалізації та гарантувати такий рівень щільності, який задовольняє вимоги сучасного енергетичного машинобудування. У роботі пропонується змістити центр кристалізації у середину стінки злитка, змінюючи співвідношення злитка $D_{зовн}/D_{внутр}$ Рекомендацій для вибору цього параметру у роботі не наведено, не вказано яким чином він впливає на механічні властивості виробу, також відсутні режими деформування, при яких отримуються зазначені властивості поковки.

Для застосування процесу зварювання при високій температурі компанією Creusot-Loirc-lndustrie був встановлений вплив дефекту типу «вуса» на холодне утворення тріщин і тріщин, що виникають при повторному нагріванні [1.21, 1.22]. Використання поковок, що вироблені з таких пустотілих злитків, у яких відсутні ліквації на внутрішній поверхні та під поверхневим шаром, сприяє більшій надійності поковок, призначених для атомної енергетики. Для обичайок і кілець ефективним рішенням є використання пустотілих злитків з контролем розташування ліквації. Для досягнення металургійної однорідності пропонується керувати швидкістю застигання, що передбачає використання оптимальної форми злитка. Щоб контролювати швидкість кристалізації, необхідно регулювати газовий потік, який використовується для примусового теплообміну всередині пустотілої оправки, розташованої в центрі виливки. Однак автори роботи не наводять результатів досліджень та не дають рекомендацій щодо змінюваних параметрів. Особливо корисною була б інформація щодо оптимальної форми злитка, яка зменшує неоднорідність хімічного складу та кількість мікротріщин.

У роботі Бережко Б. І. та інших [1.23] проведена оцінка технічних та економічних переваг виробництва великогабаритних обичайок для атомної та нафтохімічної промисловості з пустотілих особливо великих злитків на основі вітчизняного та закордонного досвіду. Розглянуто можливість виготовлення

обичайок корпусів атомних реакторів з пустотілих зливків. З досвіду фірм Японії та Франції встановлено, що у порожніх злитках значно менше розвинені позацентрова та осьова ліквації внаслідок прискореної кристалізації розплавленого металу. Пустотілі злитки мають більш однорідний хімічний склад (в тому числі по сірці, фосфору, вуглецю), що забезпечує підвищену ізотропність механічних властивостей. В умовах чинного виробництва пустотілі злитки рекомендується відливати сифонним способом. Для формування внутрішньої порожнини в злитках запропоновано використовувати коаксіальні сталеві обичайки з вогнетривким шаром між ними. Охолодження внутрішньої порожнини злитка має здійснюватися стисненим повітрям. У роботі не зрозуміло, з якою швидкістю потрібно проводити охолодження, щоб досягти однорідного хімічного складу.

У роботі [1.24] з метою заощадження при виготовленні пустотілих деталей і збільшенням виробничого виходу була удосконалена технологія відливання пустотілих злитків. Встановлено, що заливання злитка сифонним способом через два вхідних отвори та охолодження з подвійною трубою та піском дають кращі результати, ніж через три та чотири отвори зі стандартним охолодженням. Проведене моделювання заливання та застигання пустотілого злитка, відлитого першим способом, вказало на меншу кількість смуг сегрегації та меншу глибину усадки як в порівнянні з пустотілими злитками, так і в порівнянні зі звичайним злитком. За результатами моделювання були спроектовані оптимальні форми виливниць для пустотілих злитків та відлито два злитки вагою 37 і 60 т. Вироблені обичайки мали зовнішній діаметр 1750 мм і 3000 мм, кількість дефектів була мінімальною. Однак, у роботі не досліджується ліквація отриманих злитків та відсутні механічні властивості отриманих обичайок.

У роботі N. Ohashi та інших [1.25] вказано, що для виготовлення обичайки корпусу реактора потужністю 1300 МВт була розроблена технологія лиття 200 тонного пустотілого злитка, яка включала кисневе очищення та вакуумну дегазацію. Охолоджувальна подвійна труба мала спеціальне

вогнетривке наповнення. Завдяки таким вдосконаленням був отриманий злиток з поліпшеною структурою, який мав меншу ліквацію легувальних елементів. Отримана поковка мала високі показники якості внутрішніх властивостей – розтягувальних, втомних та тріщиноутворювальних. Також була отримана чиста внутрішня поверхня злитка. Однак, у роботі не вказана послідовність технологічних операцій кування та те, яким чином вони вплинули на отримані механічні властивості поковки.

Аналіз досвіду застосування звичайного злитка та пустотілого дозволив встановити, що при виготовленні крупних пустотілих поковок з застосуванням звичайного злитка усі дефекти осьової частини не вдається усунути за допомогою операції прошивання. У роботі Girardin G. вказано, що при контрольному огляді поковки, виготовленої зі звичайного злитка, на внутрішній поверхні виявлені дефекти. Уникнути цих дефектів розробникам вдалося, розробивши та застосувавши пустотілий злиток. Цей злиток мав зміщений центр кристалізації, ближчій до стінки, і після виготовлення деталі вона не мала дефектів на внутрішньому діаметрі [1.21]. Завдяки удосконаленням дефект «вуса» розташовувався у середині стінки пустотілого злитка, що сприяло його зменшенню у процесі кування, але не вказані механічні властивості отриманих обичайок у місцях дефекту.

В роботі Скрипника С. В. [1.26] викладено основні характеристики процесу відцентрової електрошлакової виплавки (ВЕШЛ) пустотілих злитків Ø 600/350 мм, Н = 290 мм, масою 0,4 т з конструкційної сталі 20Х2Н4А. Приведено відомості про хімічний склад, структуру і механічні властивості цих злитків. Показано, що злитки ВЕШЛ характеризуються високою хімічною і фізичною однорідністю, високим рівнем механічних властивостей та ізотропністю, можуть застосовуватися як в литому, так і деформованому стані для розкатаних кілець і обичайок. Зазначено, що злитки ВЕШЛ можуть використовуватися без попередньої механічної обробки, що спрощує процес виготовлення і знижує вартість розкатаних кілець. Однак у роботі не зазначена

можливість використання даної технології для отримання крупних злитків вагою понад 100 т та можливість кування з цих злитків великогабаритних обичайок.

У ВАТ НВО «ЦНИИТМАШ» розробили технологічну дорожню карту з впровадження технології електрошлакового переплавляння (ЕШП) для атомного енергетичного машинобудування (АЕМ), в рамках першого етапу якої реалізована технологія виробництва порожніх заготовок ЕШП зі сталі 10ГН2МФА для трубних заготовок. За результатами досліджень встановлена можливість і доцільність застосування пустотілих заготовок ЕШП у литому стані або з оптимізованим ступенем уковування для виробів АЕМ [1.27, 1.28]. Однак у роботі не зазначена можливість застосування даних злитків для виробів з профільованою поверхнею.

Використання пустотілого злитка як напівфабрикату для виробництва пустотілих поковок є не тільки економічно-ефективним, але дає кращі параметри якості поковок. Властивості поковок є більш однорідними в усіх напрямках, а розміри макроліквацій значно нижчі, ніж в разі використання звичайного злитка. Поковки можуть бути використані для більш високих потреб, наприклад в атомній енергетиці, через їх кращу якість [1.29]. Однак у роботі не вказані результати аналізу ліквації та внутрішніх дефектів для злитків вагою понад 150 т.

Використання пустотілих злитків замість звичайних злитків має також безпосередній вплив на продуктивність виробництва:

• термін виготовлення скорочується до 3-х разів через меншу кількість операцій кування при отриманні великогабаритних корпусів в порівнянні з виготовленням зі звичайних злитків, які потребують більшої кількості довгих нагрівань для осаджування та прошивання;

• підвищується вихід придатного металу (внаслідок наявності отвору на початковій стадії кування знижується вага злитка на 35%);

• покращуються екологічні переваги та зменшуються енергетичні витрати (скорочення викидів $CO_2$ газу до 50% у зв’язку зі зменшенням операцій кування і зниженням ваги) [1.21].

## 1.2 Методи виготовлення обичайок

Більшість простих обичайок, з профілем поперечного перерізу у вигляді прямокутника, і складних розкочуються звичайним, стандартним методом, тобто в робочому просторі пресу, між колонами, розташовується оснащення для деформування. Даний спосіб дозволяє розкочувати поковки, які не перевищують за діаметром розмірів робочого простору пресу. Але сьогодні зростає попит на габаритні пустотілі поковки, які одночасно і за довжиною, і за діаметром значно перевищують габарити робочого простору наявних пресів. Будівництво нових пресів для збільшення розмірів робочого простору є нерентабельним. Операція розкочування не потребує потужного обладнання, навпаки, при зменшенні товщини стінки сила деформування зменшується і преси, які існують сьогодні, можуть забезпечувати необхідну силу.

Одним з напрямків удосконалення технологічного процесу кування є застосування інструменту з профільованою поверхнею. Профілювання заготовки дозволяє змінити НДС заготовки в процесі розкочування та отримати спрямовану волокнисту структуру, яка повторює профіль деталі. Завдяки цьому зменшується переріз волокон під час подальшої механічної обробки, знижується кількість застосовуваного металу та загальний час виготовлення деталі.

Попит на великі кільця з діаметром до 10 метрів і висотою до 6 метрів обумовлений розвитком атомних електростанцій, про що ідеться у роботі Раза К. [1.30]. Виробництво кілець таких розмірів дозволяє змінювати конструкцію реактора, але їх виготовлення неможливе на звичайному гідравлічному кувальному пресі. Щоб виробляти кільця з зазначеними розмірами, необхідно створити спеціальне обладнання для зовнішнього розкочування. Такий розкочувальний пристрій повинен також співпрацювати з гідравлічним ковальським пресом. Однак подібне оснащення має менші можливості тому, що воно буде робити тільки операції розкочування.

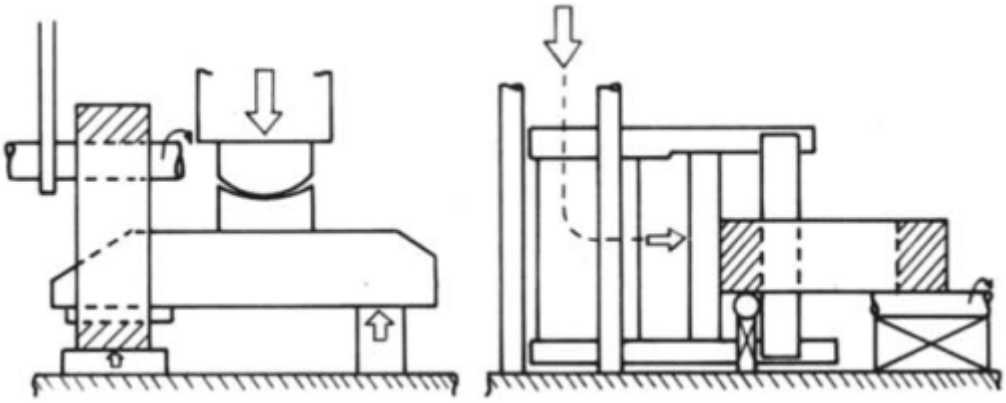
Суть способу, описаного у роботі Cechura M. [1.31] та зображеного на рисунку 1.3 а, полягає в установці спеціальної перекладини, яка виконує роль бойка. Сила передається між рухомою поперечиною преса і цією перекладиною. Між нижнім інструментом і перекладиною формується кільце з заданою товщиною стінки, яке тримається та провертається за допомогою оправки. Спеціальними прокладками можна регулювати розміри інструменту залежно від товщини кільця, яке розкочується. Таким способом на пресі з робочою силою 100 МН був виготовлений корпус, який мав у діаметрі близько 8 метрів [1.32]. Але в роботі не вказано, які розміри заготовки були отримані перед розкочуванням та з яким ступенем деформації за коло воно виконувалося.

Суть способу, зображеного на рисунку 1.3 б, полягає в установці додаткового гідравлічного механізму [1.33]. Рухома перекладина штовхає бойок додаткового механізму. Це призводить до збільшення тиску та руху вихідного елементу, який формує кільце. У цьому варіанті немає меж максимального діаметра кільця. В даному способі не вказано, як уникнути торцевої сферичності.

У роботі Раза К. [1.30] описано метод зовнішнього розкочування (рис. 1.4), що являє собою комбінацію кування та розкочування кільця. За допомогою гідравлічного преса отримується кільце з максимальними розмірами, які можна виготовити на пресі. Після цього кільце з дорном переноситься на розкочувальне обладнання. Ковальська оправка має необхідну форму для установки на розкочувальне обладнання. Остаточна форма кільця створюється шляхом розкочування. Цей пристрій розташований поряд з гідравлічним пресом.

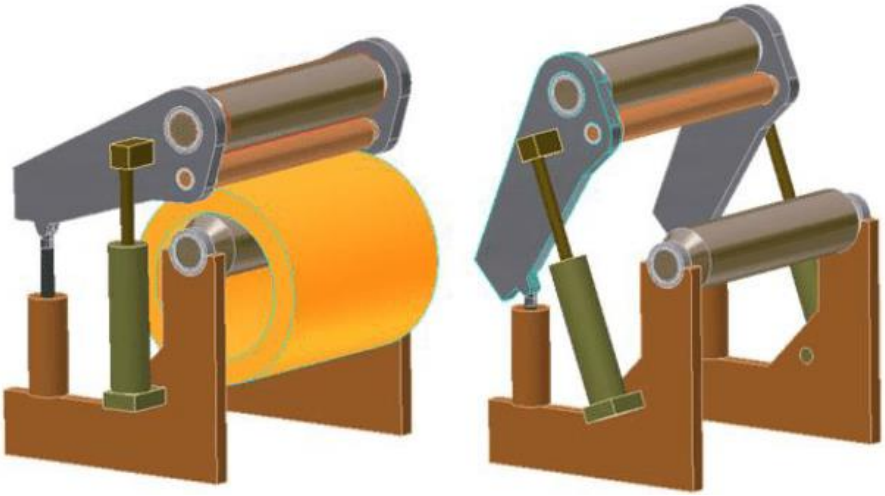
В наведених роботах відсутній ретельний опис роботи оснащення для зовнішнього розкочування та немає рекомендацій щодо параметрів заготовки, яка потрібна для розкочування, та параметрів процесу розкочування, таких як ступінь деформації та товщини стінки, до якої можливо проводити розкочування, щоб поковка не деформувалася під своєю вагою.

Для звичайного розкочування, під пресом, також створені спеціальні прилади, які дозволяють отримувати кільця, що перевищують за діаметром робочі габарити пресу.



а) б)

Рисунок 1.3 – Способи зовнішнього кування пустотілої поковки з застосуванням деформувальної перекладини (а) або додаткового гідравлічного механізму (б)



а) б)

Рисунок 1.4 – Пристрій для розкочування у робочому положенні (а) та у розкритому положенні (б)

У роботі Кальченко П. П. [1.34] зазначено, що розширити розмірний діапазон розкатаних поковок при незмінних параметрах обладнання можливо внаслідок використання пристрою, в якому оправка жорстко зв’язана за допомогою тяг з рухомою траверсою преса і розташована своєю поздовжньою

віссю в площині вирізу бойка, водночас бойок нерухомо змонтований на столі преса. До столу преса кріпиться нижній вирізний бойок, розташований більшою стороною паралельно поздовжній осі преса (рис. 1.5). Попередньо розкатану заготовку встановлюють зовнішнім діаметром на нижній вирізний бойок. Після цього в отвір заготовки заводять оправку. При переміщенні столу преса оправку поєднують з поздовжньою віссю тяг і притискають її хомутами. За такої умови заготовка розташовується між тягами. При опусканні траверси преса, через тяги та оправку, сила передається на заготовку з боку внутрішнього діаметра. При підійманні траверси заготовку за допомогою маніпулятора або кувального крана повертають навколо її осі для подальшого робочого ходу. Не зовсім зрозуміло розташування поковки під пресом, як вона буде діставатися з під пресу та як вона повертається навколо своєї осі за допомогою маніпулятора або кувального крана.

Точність є однією з головних вимог кування. Вона суттєво впливає на припуски готової поковки, від яких залежать витрати металу. Для підвищення точності кування пустотілих поковок розроблений спеціальний пристрій для розкочування (рис. 1.6), про що йдеться у роботі Маркова О. Є. [1.35]. Встановлена обичайка при підійманні траверси спирається на оправку, розташовану на відстані від вертикальної осі преса. У такому разі виникає ексцентриситет. Знизу пристрою встановлено бойок для розкочування та нижній бойок з увігнутою радіусною поверхнею. При опусканні траверси пресу повернута обичайка встановлюється на радіусний бойок та скочується на його середину. У такий спосіб під бойком розташовується ділянка для деформування. Недоліком є те, що поковка після провертання на оправці не встановлюється посередині нижнього бойка, а скочується на неї, також відсутні параметри відстані від вертикальної осі преса, завдяки яким виникає ексцентриситет.

У роботі Ареф’єва В. Д. [1.36] зазначено, що з метою підвищення коефіцієнта використання металу і зниження трудомісткості виготовлення шляхом зменшення величини напусків на поковки, запропоновано застосовувати

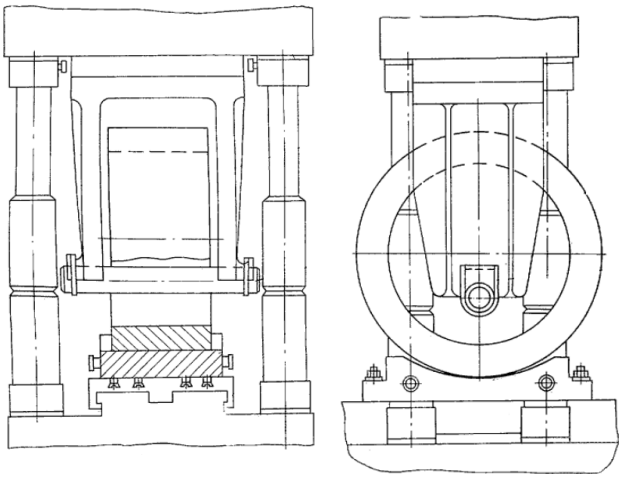


Рисунок 1.5 – Пристрій для розкочування обичайок з зовнішнім поворотом (маніпулятором або краном)

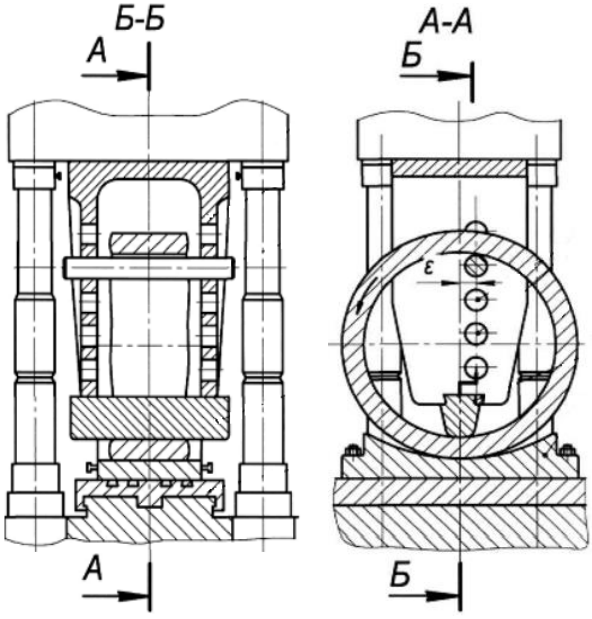



Рисунок 1.6 – Пристрій для розкочування обичайок з поворотом внаслідок ексцентриситету

бандаж для обмеження зовнішнього діаметра заготовки та обмежувачі ширини заготовки. Бандаж складається з двох частин (рис. 1.7), площина роз'єму яких розташована паралельно торцевим поверхням бандажа. Частини з'єднані між собою стрижнями за допомогою клинів. Внутрішня поверхня бандажа виконана за формою перерізу поковки з уступом і утворює робочу порожнину. Оправка виконана складної форми та має виступ по середині, на якому

виконується розкочування. Однак для реалізації цього способу необхідно застосовувати декілька бандажів, для розширення номенклатури отримуваних виробів. Також відсутні параметри використовуваної заготовки, отримуваної поковки та ступінь деформації. Також не зовсім зрозуміло з'єднання клином, судячи зі схеми він може випасти.

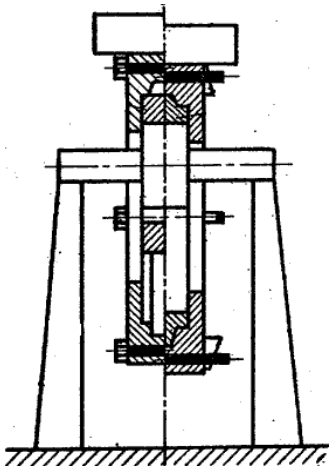


Рисунок 1.7 – Спосіб кування кільцевої поковки з зовнішнім виступом [1.36]

Однією з проблем при розкочуванні є те, що цей процес супроводжується виникненням прогинання дорну під дією деформувальної сили [1.37]. Через цей прогин поковка має всередині більшу товщину стінки, ніж по краях. В результаті виникає неправильний перерозподіл металу, який призводить до неоднорідності пластичної деформації та викривлення форми поковки. З метою усунення цих недоліків пропонується застосовувати дорн з встановленим на ньому бандажем з циліндричною робочою поверхнею і посадковою поверхнею обертання. Посадкова поверхня обертання бандажа виконана з криволінійною твірною, яка відповідає лінії на циліндричній осі, яка зігнута під дією деформувальної сили. Діаметр посадкової поверхні бандажа в найбільш вузькій частині менше або дорівнює діаметру циліндричної осі. В результаті забезпечується рівномірна товщина стінки поковки по висоті та рівномірне деформаційне пророблення металу. Запропонована конструкція є складною і потребує додаткових конструктивних

елементів, з цього приводу більш практичним розв'язання проблеми прогину дорна є його зміна на більший за діаметром.

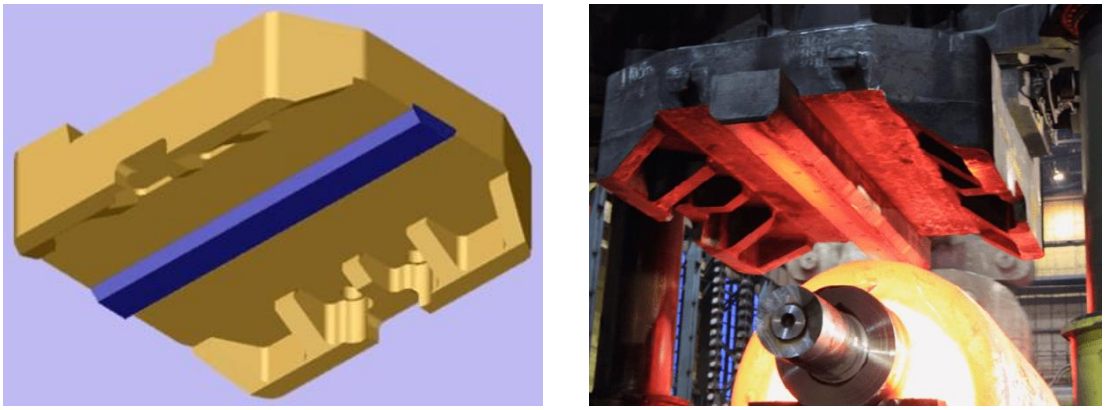
### 1.3 Інструмент для розкочування

Енергетичне машинобудування розвивається шляхом підвищення надійності та терміну служби реакторних установок, а також технологічності використовуваних конструкцій [1.38]. Більшість конструкцій установок АЕС являють собою пустотілі вироби, основними способами виготовлення яких є кування шляхом розкочування, для чого інженерами технологами розробляються технологічні процеси.

Розробка технологічного процесу кування починається з розробки креслення поковки. Під час розробки креслення поковки на чистові розміри виробу призначаються необхідні припуски на механічну обробку і допустимі відхилення. Коли розглядається технологічна можливість виготовлення тієї чи іншої поковки для деталі з профільованою поверхнею, то вдаються до призначення ковальського напуску, який спрощує форму поковки [1.39, 1.40]. Однак, використання напусків, з одного боку, призводить до спрощення форми поковки, але з іншого – збільшується металомісткість виготовлення і, як наслідок, вартість виробу. Тому максимальне спрощення деталі не завжди рентабельне. До того ж під час механічної обробки волокниста структура спрощеної поковки перерізається, що призводить до зниження механічних властивостей. Зважаючи не ці недоліки розробляються спеціальні інструменти для розкочування, завдяки яким отримана поковка повторює форму деталі.

Розкочування великогабаритних обичайок потребує особливої конструкції ковальського розкочувального бойка, тому що збільшення його довжини призводить до зменшення жорсткості та збільшення прогинів на кінцях. Збільшення товщини бойка недоцільне через невеликі величини просвіту між траверсою та обичайкою [1.41]. Розв'язання цієї проблеми було знайдено внаслідок створення ребер жорсткості (рис. 1.8), розташованих поза

зоною деформувальної частини бойка, про що ідеться у роботі Уткіна О. О. [1.42]. Для проектування був виконаний розрахунок деформації бойка в процесі розкочування шляхом моделювання в програмному середовищі «DEFORM» при максимальному тиску робочих циліндрів пресу. Завдяки такій конструкції бойка під час розкочування обичайки з діаметром понад 4,5 м та висотою понад 5,5 м до товщини стінки 270 мм прогин на краях бойка склав 6 мм, що цілком допустимо для поковок таких розмірів. Подібну конструкцію бойка можна було б застосовувати при куванні кільцевих поковок типу обичайка з фланцем змінивши плоску деформувальну частину на ступінчасту.



а) б)

Рисунок 1.8 – Геометрична модель (а) та промисловий прототип (б) бойка для розкочування [1.41]

Одним з рішень для уникнення нерівномірної сферичності є використання пристрою (рис. 1.9), який складається з оправки та змінних буртів, про що зазначають Орленко В. М. та інші [1.43]. Роль одного з буртів виконує втулка з дном. Така втулка має можливість пересуватися вздовж оправки, що дає можливість регулювати довжину отримуваної поковки. У такий спосіб досягається поліпшення якості бічної поверхні поковок шляхом забезпечення можливості отримання більш точних розмірів по їх висоті та ширині. Але цей спосіб доволі важко реалізувати на практиці, через можливість заклинювання механізму, який регулює відстань між буртами.

Інший спосіб уникнення нерівномірної сферичності запропоновано у роботі Кальченко П. П. та інших [1.44], в якій зазначено, що при розкочуванні крупних пустотілих деталей частина металу плине в осьовому напрямі, що призводить до утворення нерівномірної сферичності на торцях поковки – бахроми. Через це збільшуються норми витрат металу і трудомісткість механічної обробки виробів. Для розв'язання цієї проблеми авторами пропонується обкочувати заготовку до 0,85 – 0,9 зовнішнього діаметра, присаджуванні її по торцях та виконувати остаточне обкочування при температурі 1000-1050˚С. Даний спосіб дозволяє значно підвищити точність виготовлення циліндричних обичайок, також його можна було б застосовувати при куванні кільцевих поковок з профільованою поверхнею, однак це потребує додаткових досліджень.

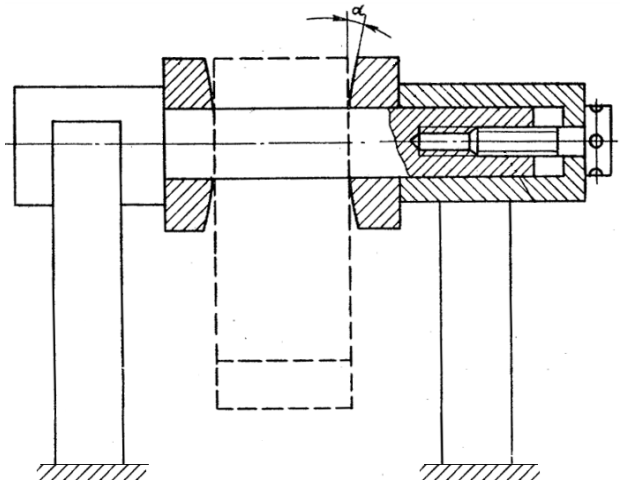


Рисунок 1.9 – Пристрій для усунення сферичності [1.43]

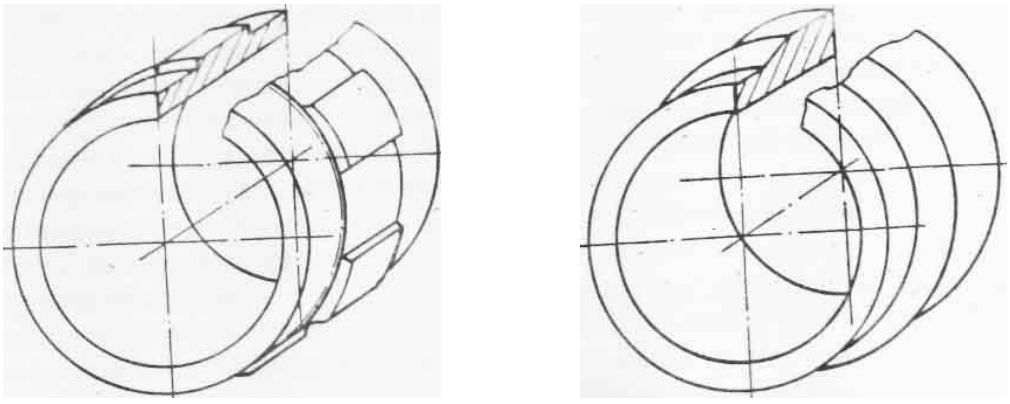
У роботі Jha A. K. [1.45] зазначено, що під час виготовлення кільця по традиційній технології кування зі звичайного злитка були розглянуті різні емпіричні співвідношення між висотою кілець H і зовнішнім діаметром D (H / D ≈ 0,16 … 0,80), внутрішнім діаметром d і зовнішнім діаметром D (d / D ≈ 0,35 … 0,86) і товщиною стінки S і зовнішнім діаметром D (S / D ≈ 0,07 … 0,33). Ці рекомендації були запропоновані для належного контролю форми під час кування кілець на оправці. Для отримання тонкостінного кільця (S / D ≈ 0,05) ці рекомендації підвищують коефіцієнт

використання матеріалу до ≈ 3,5…4,0 у порівнянні з ≈ 1,8…2,0 у разі традиційного кільцевого розкочування. У процесі протягування на оправці та при подальшому розкочуванні значно зменшується товщина стінки пустотілої заготовки. Дефекти, які наявні у середині цієї стінки, заварюються, а готова деталь має високу якість. З роботи не зрозуміло, що мається на увазі під показниками якості, відсутня інформація про умови дослідження та розміри отриманих поковок.

Зниження матеріальних витрат є одним з найбільш пріоритетних напрямків розвитку технології кування. Це, в першу чергу, стосується технологій отримання пустотілих поковок. Одним зі способів зниження витрат металу є використання інструменту за формою, наближеною до форми заданої деталі. Це значно економить матеріал через зменшення напусків, а також час виготовлення, через зменшення часу механічної обробки.

У роботі Ельфмана І. [1.46] вказано, що безшовне кільце для котлів високого тиску та резервуару парогенератора ядерного реактора з водяним охолодженням є одним з виробів, які виготовляють методом вільного кування. З огляду на профіль, його виробляють з великими припусками для розкочування на дорні так само, як і поковки кілець, що мають прямокутний переріз. Недоліком цього методу є значні витрати металу, оскільки прямокутну форму перерізу кільця потрібно обирати у такий спосіб, щоб з нього за допомогою подальшої механічної обробки можна було отримати кінцеву профільовану форму кільця. Цей недолік усувається за допомогою винаходу, який дозволяє виробляти штуцерні й інші кільця, що мають фасонний профіль, методом вільного кування кільця з прямокутним поперечним перерізом та подальшим калібруванням профільованим бойком. Вироби фасонного профілю з уступами на обох кінцях або з однобічним уступом, призначеного для виробництва штуцерних кілець котлів високого тиску, представлені на рисунку 1.10 а та б. Зі злитка спочатку отримують поковки круглого перерізу (білет), відсікають прибуткову і донну частини, потім отриманий блок осаджують, прошивають і розкочують на дорні плоским

бойком, надаючи форму кільця з прямокутним перерізом. За такої умови кільцеву заготовку встановлюють на дорн, діаметр якого становить 0,8–1,0 величини внутрішнього діаметра заготовки, і виконують попереднє кування у такий спосіб, що висота кільця становить 0,8–1,0 кінцевої висоти, а товщина стінки кільця у 2–4 рази перевищує його кінцеву товщину. Далі проводять кування профільованим бойком, робоча поверхня якого відповідає зовнішньому контуру поковки. Недоліком способів є складність прогнозування формоутворення під час остаточного розкочування. У роботі не наведені параметри заготовки перед розкочуванням та допустимі ступені деформації при застосуванні профільованого бойка.

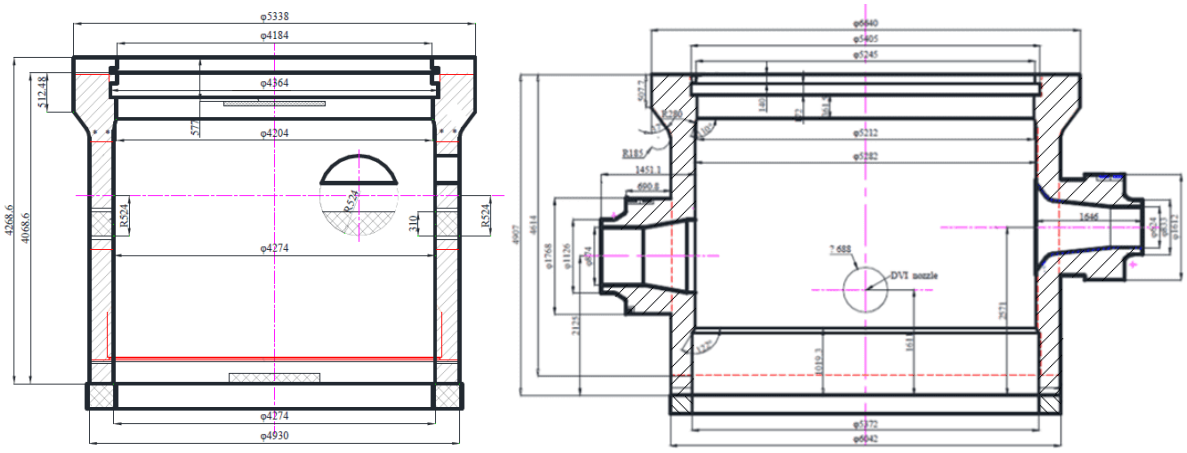


а) б)

Рисунок 1.10 – Профільовані кільця для виготовлення котлів високого тиску [1.46]

Для реактора CAP1400 було викувано дві подібні обичайки. Одна з зовнішнім фланцем (рис. 1.11, а), інша з зовнішнім фланцем та боковими патрубками (рис. 1.11, б), які були отримані штампуванням. Особливістю способу є те, що обичайки з фланцем кувалися з застосуванням ступінчастого верхнього бойка [1.47 – 1.49]. У такий спосіб, для атомного реактора, розробленого компанією AREVA, були виготовлені поковку зони патрубків, поєднану з фланцем. В роботах відсутні рекомендації щодо співвідношень розмірів заготовки, яка була використана для розкочування, та параметри щодо робочої поверхні інструменту.

Злиток масою 500 тонн потребувався для виготовлення поковки, яка була першою великогабаритною поковкою, виготовленою на пресі з максимальною силою 140 МН, встановленому на JSW у 2003 році, про що ідеться у роботі Бергера та інших [1.50]. Послідовність кувальних операцій зображена на рисунку 1.12. Прибуткова та донна частини були відрубані для забезпечення потрібного об'єму поковки, потім блок був осаджений, прошитий, протягнутий на оправці та розкочений, щоб отримати необхідну форму, яка включала уступ на ділянці між фланцем і зоною патрубків. Зона патрубків і фланець мали товщину близько 700 мм. Але не зрозуміло, чому для виготовлення такої габаритної поковки не засовувався пустотілий злиток.



а) б)

Рисунок 1.11 – Зображення виготовлених обичайок для реактора CAP1400: з фланцем (а) та з фланцем і патрубками (б) [1.47]

Спосіб виготовлення кільцевих поковок з зовнішньою поверхнею у вигляді концентричних, послідовно зменшуваних у діаметрі від одного торця до другого циліндричних уступів (рис. 1.13) передбачає попереднє формоутворення конічної пустотілої заготовки та її кінцеве кування розкочуванням на оправці [1.51]. Після отримання конусної заготовки, її розміщують на оправці та починають розкочування зі сторони меншого діаметра, формуючи ступень меншого діаметра. Розкочування ведуть до формування зовнішньої поверхні у вигляді циліндрів. Недоліком способу є те,

що для утворення конусної заготовки необхідно розширити парк оснащення, для збільшення номенклатури отримуваних обичайок. Також в роботі відсутні рекомендації щодо розмірних діапазонів отримуваних виробів.

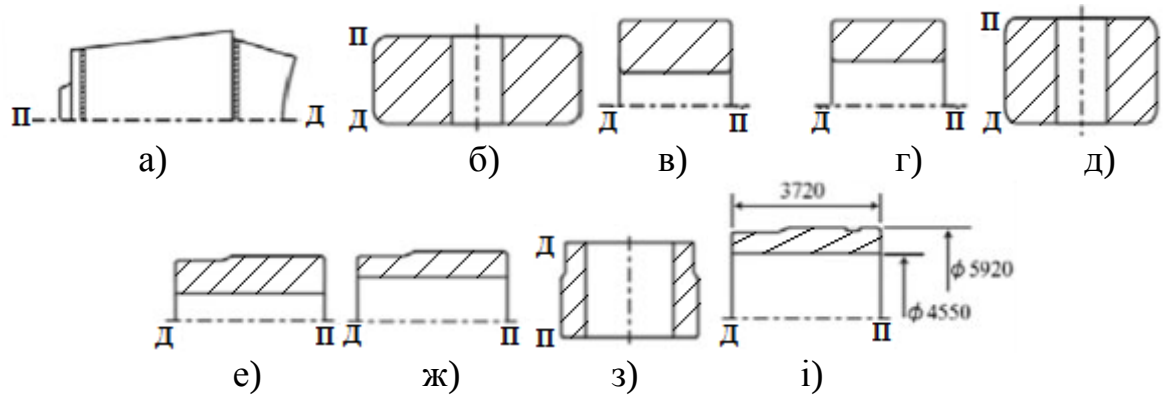



Рисунок 1.12 – Послідовність кування пустотілої з фланцем: рубка донної та прибуткової частин(а), осаджування та прошивання(б), протягування на оправці (в), попереднє розкочування (г), присаджування (д), протягування на оправці (е), розкочування (ж), присаджування (з), кінцеве розкочування (і) [1.50]

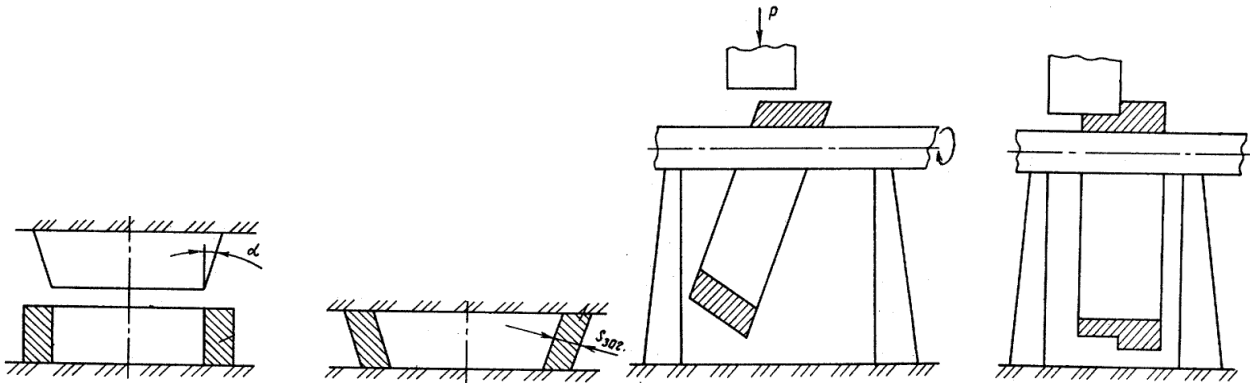


Рисунок 1.13 – Спосіб виготовлення обичайки з фланцем або буртом [1.51]

Задля підвищення точності кування та зниження витрат металу при виготовленні поковок запропоновано багато способів отримання пустотілих виробів сферичної, конічної форм, з внутрішніми та зовнішніми фланцями, буртами та поглибленнями. У роботі Кальченко П. П. [1.52] описується спосіб отримання сферичних поковок (рис. 1.14), який передбачає використання сферичної плити та сферичного бойка для виготовлення заготовки сферичної форми. Для розкочування до потрібних розмірів використовується також бойок зі

сферичним профілем. Даний спосіб був випробуваний у ковальсько-пресових цехах ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» та ПАТ «Енергомашспецсталь». У наведених способах не запропонована універсальна конструкція бойка зі сферичним профілем, що обмежує номенклатуру виробів та призводить до зростання кількості оснащення.

Для отримання поковок з внутрішньою та зовнішньою сферичними поверхнями (рис. 1.15) запропоновано використовувати бойок зі сферичним вирізом та бочкоподібну оправку. Задля забезпечення заданої форми внутрішньої сферичної порожнини поковки пропонується міняти оправки з меншою бочкою на більшу, що відповідає діаметру отвору зрізаної сферичної заготовки. Цей спосіб розширює технологічні можливості отримання поковок, близьких за формою і розмірами до готових деталей, що призводить до зменшення витрати металу і трудомісткості механообробки [1.53]. Однак у роботі нічого не вказано про розширення заготовки під час розкочування, що є доволі важливим фактором, який важко контролювати при розкочуванні, а в даному випадку через збільшення площі контакту між інструментами та заготовкою, в порівнянні з традиційним розкочуванням плоскими інструментами, прогнозування течій металу ще складніше.

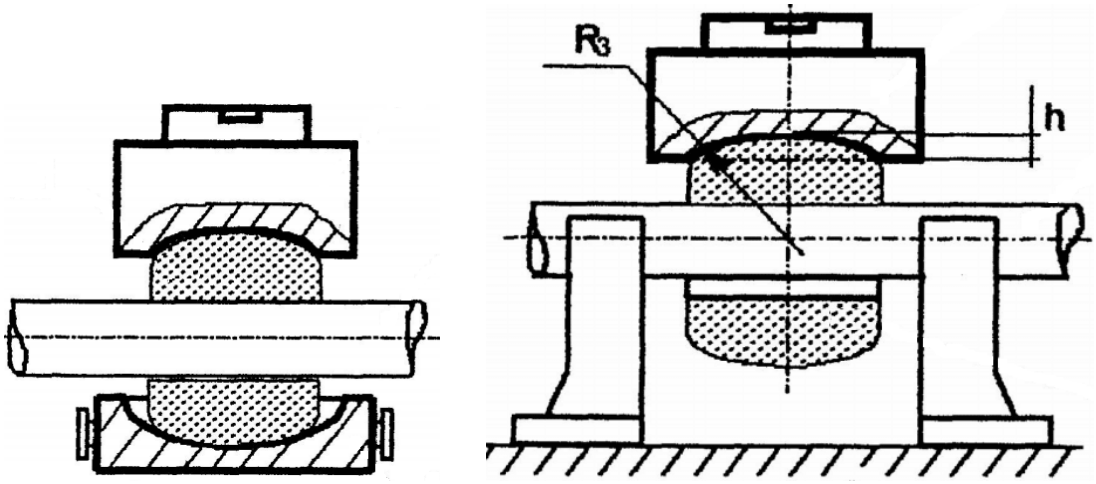



Рисунок 1.14 – Спосіб виготовлення сферичних поковок [1.52]

З метою зниження витрат при виготовленні пустотілих поковок у формі усіченого конуса зі сталою товщиною стінки Ареф’єв В. Д. та інші

пропонують використовувати конічну оправку [1.54]. Цю оправку встановлюють у такий спосіб, що найближча до бойка твірна паралельна площині бойка (рис. 1.16). Через різну площину контакту заготовки та оправки виникає конус, а через паралельність поверхні бойка та поверхні дорна товщина стінки постійна. Автори не надали рекомендацій щодо конусності оправки, оскільки кут конусності буде впливати на форму одержуваної поковки. У роботі відсутні рекомендації до конструкції конічної оправки та до можливості її повороту маніпулятором або ковальським краном.

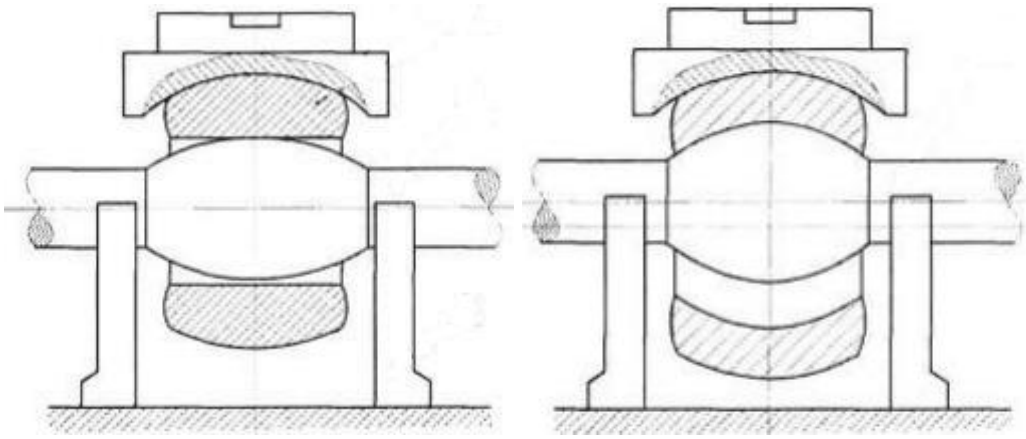


Рисунок 1.15 – Спосіб виготовлення пустотілих поковок з внутрішньою та зовнішньою сферичними поверхнями [1.53]

У роботі Пакало О. В. та інших [1.55] пропонується застосувати конічну оправку для протягування на ній циліндричної заготовки. Завдяки цьому способу у заготівці формується внутрішня конічна поверхня, а зовнішня залишається циліндричною (рис. 1.17). Далі цю заготовку розкочують на циліндричному дорні. При розкочуванні край заготівки з меншим внутрішнім діаметром швидше збільшується у діаметрі через більшу товщину стінки, і у такий спосіб формується поковка у вигляді усіченого конуса. Однак автори не надали рекомендацій щодо конусності оправки, на якій потрібно протягувати заготовку для розкочування, та як кут конусності внутрішнього отвору протягнутої заготовки буде впливати на форму одержуваної поковки.

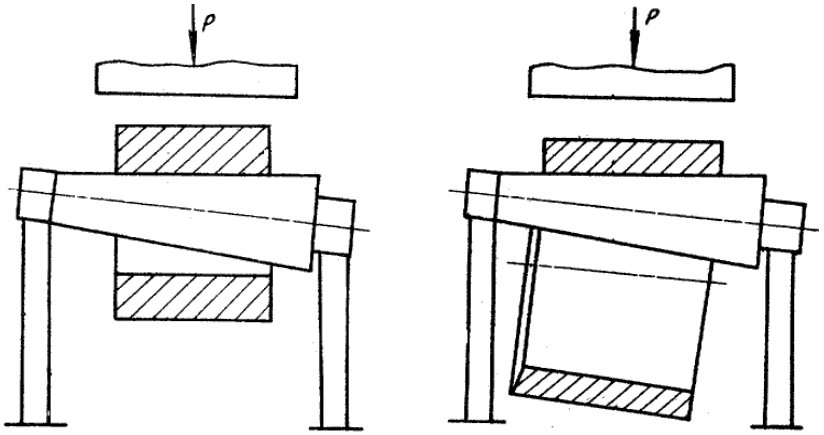



Рисунок 1.16 – Спосіб виготовлення пустотілих поковок у формі усіченого конуса [1.54]

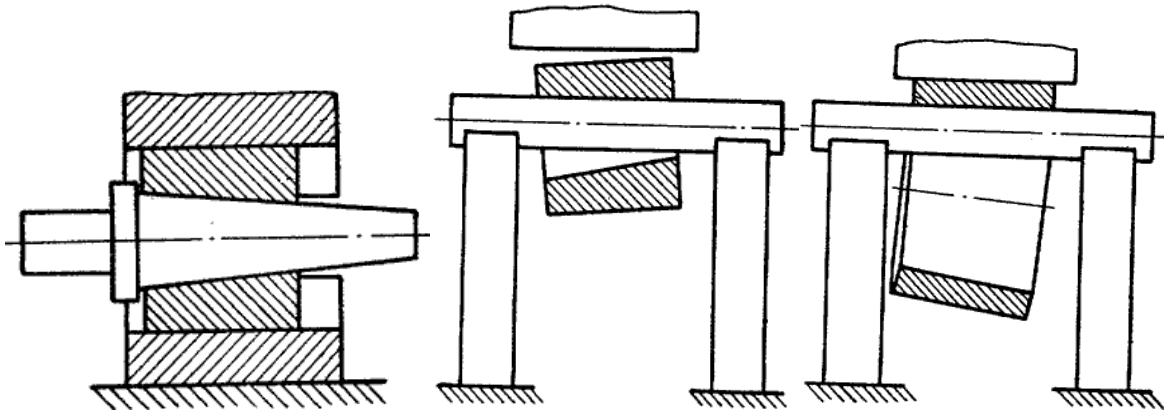


Рисунок 1.17 – Спосіб застосування конічної оправки для виготовлення конусної обичайки [1.55]

Інший спосіб виготовлення поковок [1.56] у формі усіченого конуса з постійною товщиною стінки передбачає розкочування ступінчастої заготівки у вигляді концентричних, послідовно зменшуваних у діаметрі від одного торця до другого циліндричних уступів (рис. 1.18). Завдяки способу знижується трудомісткість виготовлення конічних обичайок та підвищують коефіцієнт використання металу. При розкочуванні заготовки відсутній зсув бойка уздовж осі заготовки. Не потребується спеціальний бойок з поворотною частиною та преса з жорсткою станиною. У роботі не наведена інформація про нерівномірність деформацій по перерізу поковки, яка виникає через різницю у діаметрах заготовки. Не вказані рекомендації щодо розрахунку заготовки та залежності величини конусності отримуваної поковки від діаметрів заготовки.

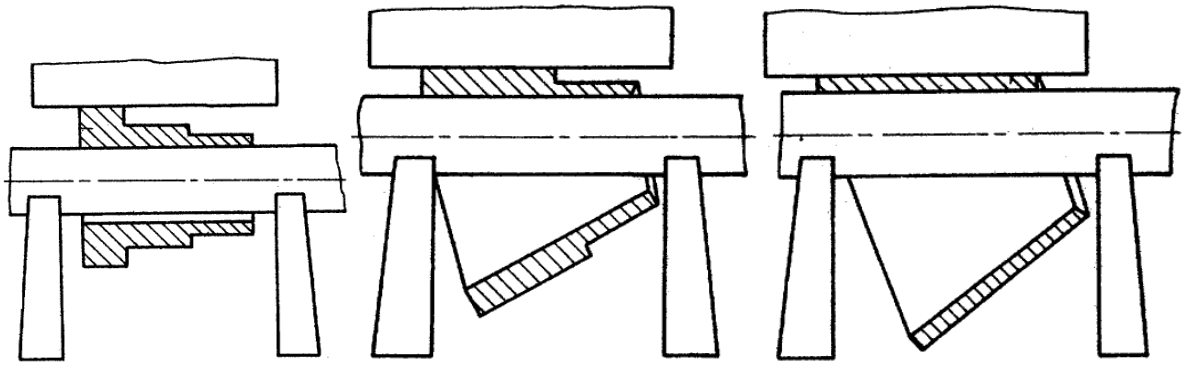


Рисунок 1.18 – Виготовлення поковок у формі усіченого конуса з постійною товщиною стінки [1.56]

В роботі [1.57], досліджено процес формування конічної обичайки з циліндричною ділянкою для парогенератора AP1000 (рис. 1.19). Для того, щоб отримати конічну обичайку з циліндричною ділянкою на ковальському гідравлічному пресі, яка подібна за формою і розміром виробу, вона повинна бути викувана з заготовки, яка відповідає певним критеріям, які сприяють формуванню конічного отвору. Через особливості поковки у формі конічної обичайки процес кування виглядає наступним чином: протягування злитка, вирубка блоку, осаджування, прошивання, протягування на оправці та формування ступінчастої заготовки, потім за допомогою основного валка, дорна і плоского бойка кується конусоподібний отвір, на останній стадії, використовуючи спеціальне пристосування, кується пряма циліндрична ділянка. У роботі відсутні дані про врахування масштабного фактора та швидкісних параметрів лабораторного обладнання.

Для кування конічної обичайки з двома циліндричними прямими ділянками (рис. 1.20) пропонується використовувати спеціальний бойок для розкочування сідло видної форми та дорн з відповідним профілем [1.58, 1.59]. В даному випадку заготовка обробляється за шість операцій, включаючи отримання циліндричної заготовки, її осаджування, прошивання, протягування на оправці, контурну ковку сідло видним інструментом.

Для підвищення коефіцієнта використання металу і зниження трудомісткості виготовлення виробів у формі усіченого конуса з виступом на

зовнішній або внутрішній поверхні з боку меншого діаметра поковки шляхом зменшення величини напуску Ареф'євим В. Д. та іншими запропоновано використовувати бойок з виступом або оправку з різними діаметрами (рис. 1.21) [1.60]. Попереднє розкочування виконують з двома виступами на поковці, а в останньому виносі роблять розкочування виступу з одного боку. Заготовка збільшується у діаметрі з одного боку, а з іншого не змінюється, отже виникає конусна форма. У роботі наведено приклад експериментального випробування виготовлення поковки на свинцевих заготовках, але відсутні рекомендації щодо закономірностей формозміни заготовки під час розкочування в залежності від ступеня деформації.

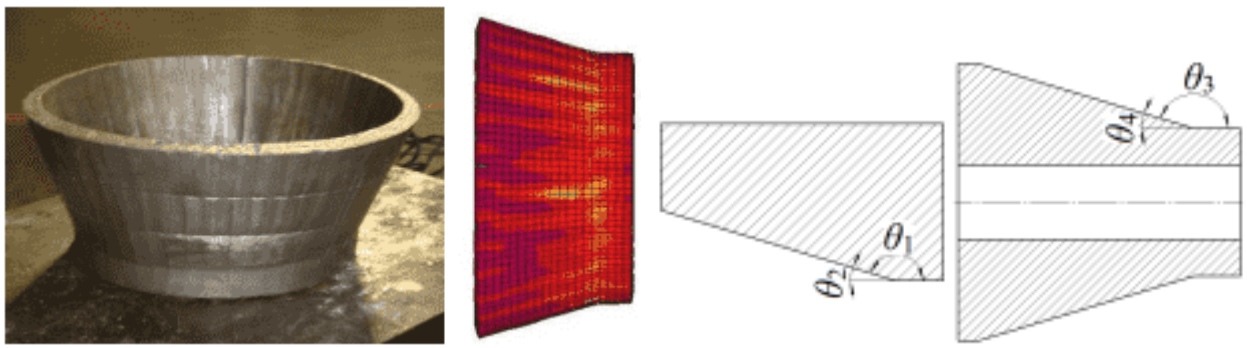



Рисунок 1.19 – Конічна обичайка з циліндричною ділянкою та оснащення для її отримання [1.57]

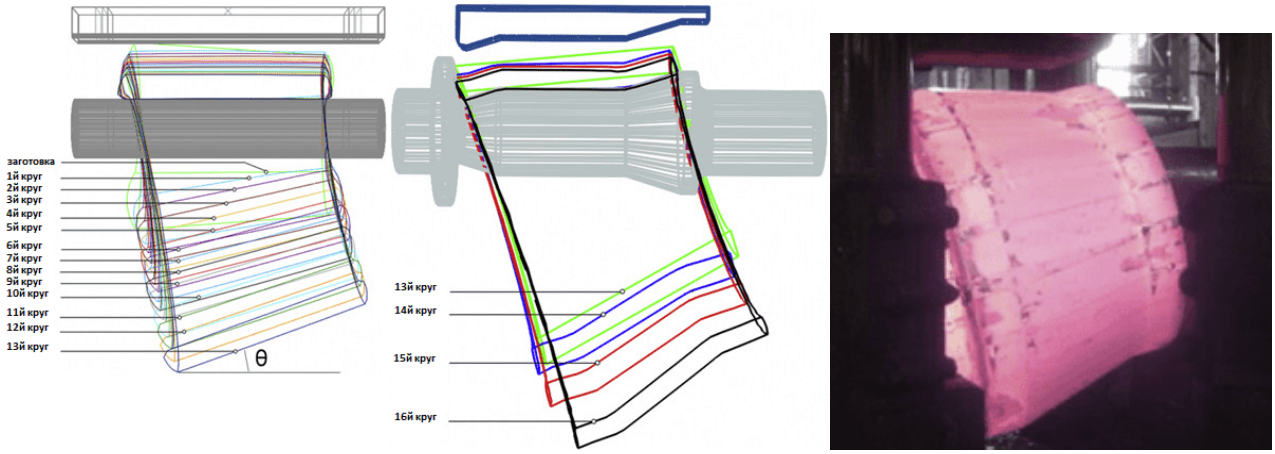



Рисунок 1.20 – Спосіб отримання конічної обичайки з циліндричними ділянками [1.58]

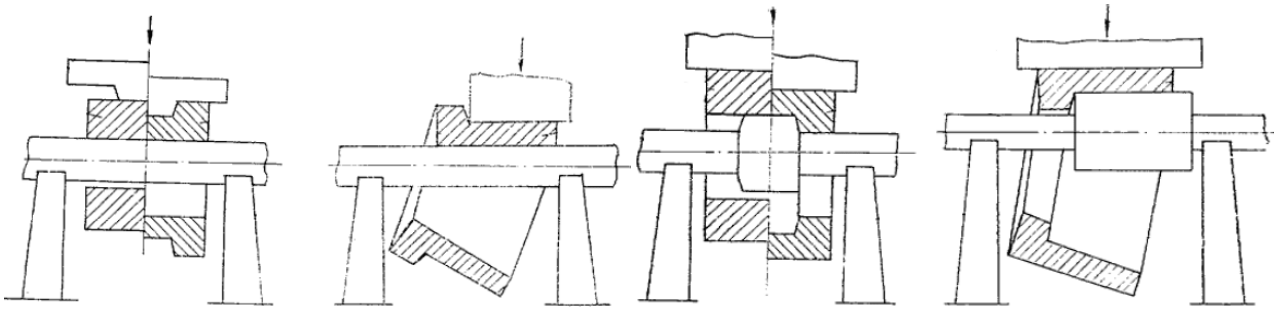


Рисунок 1.21 – Спосіб одержання кільцевої деталі в формі усіченого конуса з виступом [1.60]

Для отримання кільцевих поковок з виступом на внутрішній та зовнішній поверхнях [1.61] Петуніним О. Ю. та іншими запропоновано використовувати кільцеву заготовку з висотою, рівною ширині внутрішнього виступу поковки (рис. 1.22). Перед розкочуванням її центрують на оправці по бічних поверхнях, а розкочування виконують в дві стадії, на першій з яких заготовку розкочують на Т-подібний профіль з оформленням виступу по внутрішній поверхні поковки. Потім її надрубують по зовнішній поверхні у двох паралельних площинах, розташованих на відстані, рівній ширині зовнішнього виступу поковки. Після чого здійснюють другу стадію розкочування, остаточно оформлюючи профіль поковки. Недоліком способу є необхідність часто змінювати бойок під час кування, через що поковка буде простоювати та втрачати температуру, що може призвести до одержання неправильної форми поковки.

Отримувати кільцеві деталі з двотавровим профілем перетину з зовнішніми та внутрішніми полками (рис. 1.23) Горохов Є. Д та інші [1.62] пропонують шляхом формування внутрішніх полиць висотою, рівною 0,2–0,7 висоти заготовки, з одночасним оформленням кільцевого виступу, що виступає за зовнішню периферійну поверхню бандажів на величину, рівну 0,2–2,5 висоти виступу, а потім останній деформують до отримання зовнішніх полиць. Недоліком способу є вірогідність отримання неправильної форми поковки під час останньої операції через те, що може деформуватися внутрішній бурт.

Розширити номенклатуру одержуваних деталей шляхом виготовлення кільцевих поковок з кільцевим виступом по внутрішній поверхні та відповідним йому кільцевим поглибленням (рис. 1.24) і водночас підвищити якість готового виробу можна внаслідок використання оправки з кільцевим поглибленням, кільцеве поглиблення по зовнішній поверхні формують, використовуючи фігурний бойок, як зазначено у роботі Пакало О. В. [1.63]. Попереднє формоутворення виконують розкочуванням кільцевої заготовки до величини внутрішнього діаметра, що перевищує максимальний діаметр оправки. Але в роботі відсутні рекомендації щодо формування заготовки з буртом на внутрішньому діаметрі для подальшого розкочування профільованим бойком.

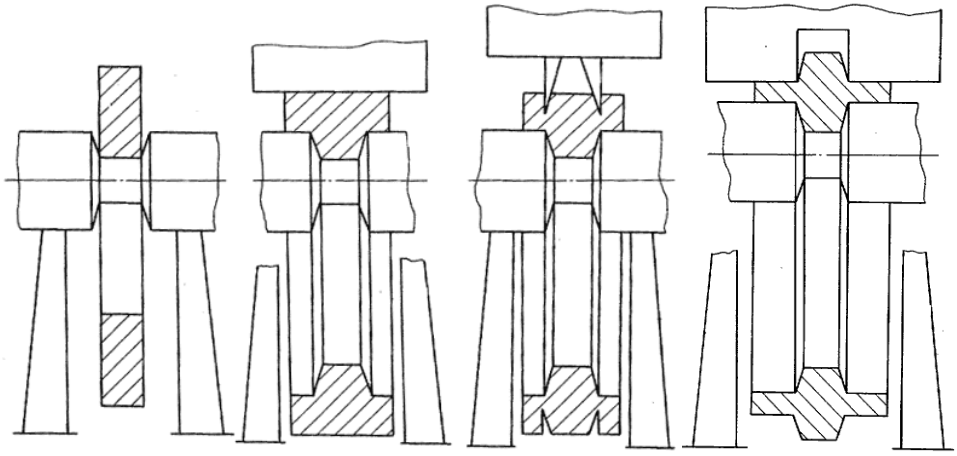


Рисунок 1.22 – Спосіб отримання кільцевої поковки з буртом [1.61]

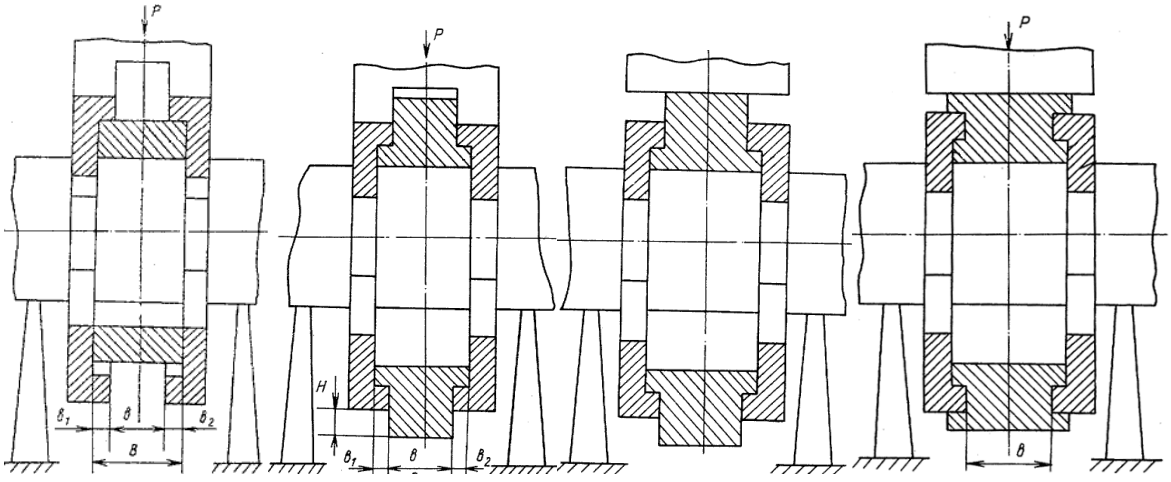



Рисунок 1.23 – Спосіб одержання кільцевої деталі з двотавровим профілем [1.62]

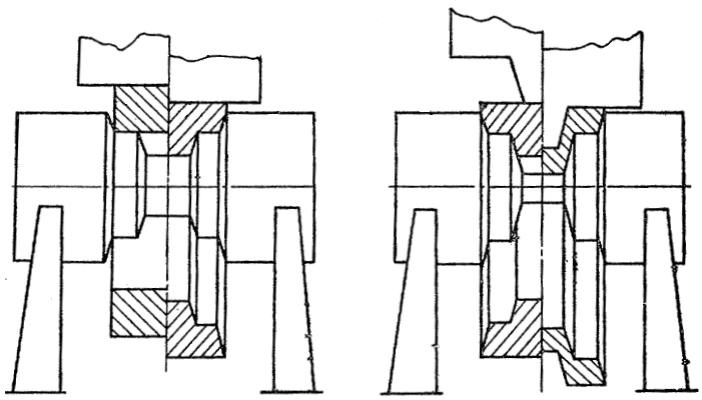


Рисунок 1.24 – Спосіб одержання кільцевої деталі з поглибленням [1.63]

Спосіб виготовлення кільцевих поковок U-подібного профілю поперечного перерізу включає попереднє розкочування заготовки на оправці, при якому отримують перехідну заготівку з фланцями, кільцевим виступом і відповідним йому кільцевим поглибленням (рис. 1.25), про що ідеться у роботі Зубкова О. І. та інших [1.64]. При остаточному розкочуванні перехідної заготівки, яку спочатку центрують на оправці по боковій поверхні виступу, фланець відгинають, розташовуючи його в діаметральній площині поковки. Недоліком способу є запресовування заготовки у профільований дорн та бойка у заготовку, що дуже ускладнює провертання заготовки на дорні. Тому необхідно додатково зробити кути нахилу як на дорні, так і бойку.

Для виготовлення поковок зі складною зовнішньою (рис. 1.26) або внутрішньою (рис. 1.27) поверхнею пропонується використовувати бойок або дорн з відповідним профілем [1.65, 1.66]. Причому при формуванні внутрішнього профілю пропонується в одному виносі виконувати кування на профільній оправці для формування профілю та подальше розкочування кованої заготовки на оправці [1.65]. Однак в роботах відсутні рекомендації щодо співвідношення розмірів заготовок, необхідних для розкочування та співвідношення розмірів отримуваних профілів.

Отже, аналіз літератури дозволив встановити, що існує значна кількість способів розкочування профільованих кілець та обичайок, на які отримані патенти, але не всі вони знайшли широке розповсюдження на промисловості для виготовлення деталей реакторних блоків.

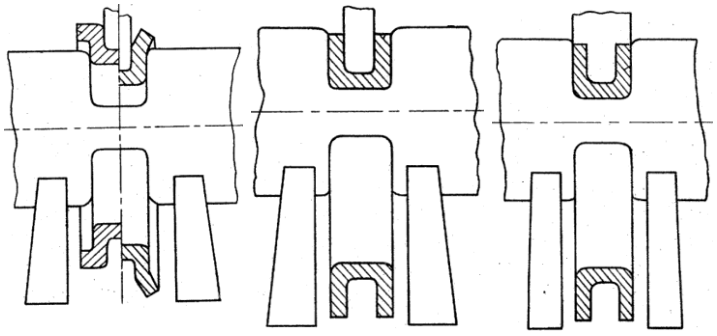


Рисунок 1.25 – Спосіб одержання кільцевої деталі [1.64]

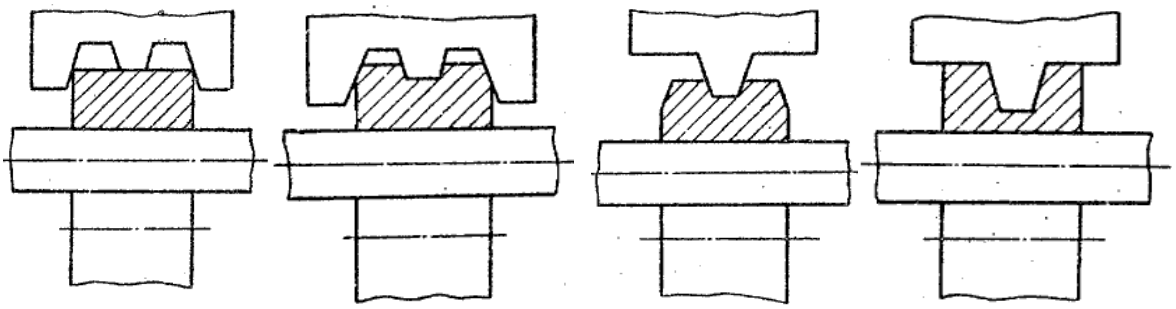


Рисунок 1.26 – Спосіб виготовлення поковок зі складною зовнішньою поверхнею [1.65]

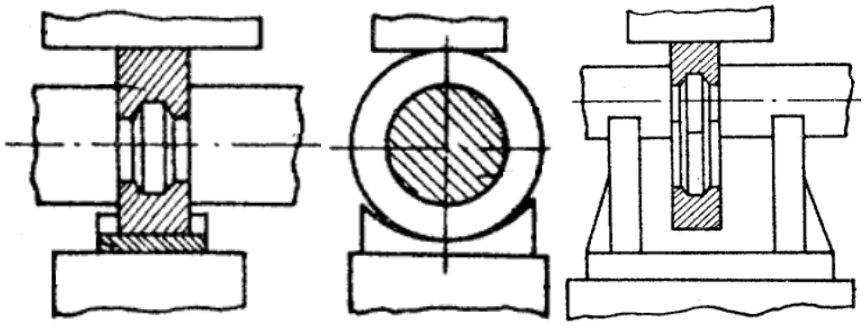


Рисунок 1.27 – Спосіб виготовлення поковок зі складною внутрішньою поверхнею [1.66]

З проведеного аналізу способів розкочування можна встановити, що на сьогодні відсутні рекомендації з геометричних параметрів заготовок перед розкочуванням, які б дозволили отримати поковку потрібної форми. Це вимагає проведення досліджень для встановлення закономірностей впливу розмірів заготовки на форму поковки. Отримані результати дозволять розробити регресійні моделі, для визначення параметрів заготовки перед розкочуванням.

## 1.4 Дослідження процесів кування крупних кільцевих поковок

Дослідження процесів кування крупних поковок – складний процес з погляду унікальності досліджуваних заготовок за розмірами та витратами. Це вимагає проведення комплексних теоретичних та експериментальних досліджень перед апробацією запропонованого способу кування у виробничих умовах [1.67].

У літературі мало інформації про кування обичайок зі значною різницею поперечного перерізу (ступінчасті обичайки). Виробництво подібних поковок з фланцем часто відбувається на машинах або автоматах для кільцевого розкочування [1.68, 1.69]. Виготовлення поковок з буртом супроводжується дефектами на торці уступу або на внутрішній поверхні з боку виступу [1.70]. Тому отримання куванням поковок типу обичайка зі значною різницею поперечного перерізу, які найбільш наближені за формою до заданої деталі, є актуальною проблемою для сучасного виробництва.

В даний час для вітчизняної промисловості актуальні питання, пов'язані з модернізацією старих і розробкою нових технологічних процесів, впровадження енергоощадних і ресурсоощадних технологій. Не виключенням є і галузь ковальсько-штампувального виробництва, що має величезний потенціал для реалізації принципів підвищення якості та конкурентоспроможності продукції, що виробляється. Максимальне наближення форми заготовки до форми готового виробу, тобто профілювання, дозволяє значно скоротити втрати матеріалу, знизити витрати на подальшу механічну обробку [1.71]. Отримання профільованої заготовки потребує використання інструменту з необхідною формою поверхні, яка наближує форму заготовки до форми виробу. Щоб розробити рекомендації з проектування технологічних процесів кування поковок відповідального призначення з застосуванням подібного інструменту, необхідно встановити НДС заготовок та визначити параметри формоутворення. Для проведення

таких досліджень доцільно використовувати методи, які дозволяють з достатньою точністю моделювати процеси кування.

Розрізняють фізичне і математичне моделювання. При фізичному моделюванні фізика явищ в об’єкті та моделі і їх математичні залежності однакові [1.72]. При математичному моделюванні фізика явищ може бути різною, а математичні залежності однаковими. Математичне моделювання набуває особливої цінності, коли виникає необхідність вивчити дуже складні процеси. Аналітичні та експериментальні методи мають свої переваги та недоліки, які часто ускладнюють ефективне вирішення практичних завдань. Тому надзвичайно плідним є поєднання аналітичних і експериментальних методів дослідження [1.73].

На машинобудівних підприємствах виробництво великогабаритних поковок у ковальських цехах носить одиничний і дрібносерійний характер. Для розробки нових виробів розробляють сотні технологічних процесів, проектують і виготовляють оснащення. Служби заводу перевантажені обсягом технологічних розробок, які обмежуються лише швидким проробленням технологічних процесів кування. За такої умови кількість параметрів, що регламентують технологічний процес, скорочується до мінімуму. В таких обставинах виконується лише вимога отримати поковку в задані терміни. Одним зі шляхів підвищення якості технологічної підготовки ковальського виробництва є розробка методів прогнозування якості поковок при куванні та подальша механізація праці інженера-технолога з застосуванням сучасної комп’ютерної техніки. Подібні методи розрахунків сприяють спрощенню технологічних розробок. Необхідність у приведенні конкретних розрахунків продиктована тією обставиною, що зазвичай при спробі повторити розрахунок технологічного процесу кування, в загальному вигляді висвітленого у літературі, інженери-технологи, як правило, не отримують очікуваних результатів. Останнє пояснюється відсутністю єдиного методу і достатньою кількістю розрахункових даних, перевірених практикою. З огляду на це в

кожному технологічному процесі виявляється багато місць, де закладений індивідуальний підхід інженера-технолога, який створив технологію [1.74].

Останнім часом найпоширенішим чисельним методом вирішення завдань ОМТ є метод скінченних елементів (МСЕ) [1.75 – 1.78]. МСЕ дозволяє вирішувати нелінійні задачі фізики та визначати утворення внутрішніх розривів в процесі деформації. Результати даного методу з високою точністю узгоджуються з експериментальними даними.

За допомогою МСЕ перевіряються розроблені технології для деталей відповідного значення, а в деяких випадках розрахунки за допомогою цього методу дозволяють ввести у виробництво процеси, які не застосовувалися раніше [1.79, 1.80]. Існує безліч спеціалізованих і загальноінженерних пакетів для аналізу МСЕ, такі як QForm 2D / 3D, DeForm 2D / 3D, Abacus, FORGE, AutoForm і інші.

МСЕ використовується для дослідження повного циклу термомеханічної обробки сталей. Так у роботах Ванга та Кернампура [1.8, 1.81] досліджуються фактори, які впливають на виникнення дефектів під час виготовлення злитків. Встановлено, що швидкість заливання, висота, форма та теплоізоляційний матеріал впливають на виникнення усадкової раковини та під прибуткових тріщин, утворюваних під час виконання білетирування та протягування. Але не вказано, як матеріал впливає на кількість небажаних включень у поверхневих шарах злитка, що може спричиняти подальше утворення тріщин під час перших операцій кування.

Хоурі та інші [1.82] застосували МСЕ для вирішення завдань пружно-пластичних деформацій при великих ступенях деформацій. Оптимізація процесів кування крупних поковок базується на ефективному аналізі з використанням моделювання МСЕ та інтегрованій програмі спостереження та обробки даних про утворювані в процесі кування структурні зміни. Подібна концепція, ефективність якої продемонстрована на конкретному прикладі, об’єднує можливості віртуального аналізу, практичних спостережень і застосовується для оцінки реального процесу кування крупних поковок.

У роботах Окави, Чена та інших [1.83 — 1.86] за допомогою МСЕ досліджувалось закриття внутрішніх дефектів при протягуванні та осаджувані гарячих заготовок. Встановлені відносні параметри подачі та обтискання при протягуванні злитків та їх осаджувані. Але відсутні дані про розвиток цих дефектів під час подальшого прошивання та розкочування.

У роботі Андреященко В. та інших [1.87] за допомогою МСЕ виконане порівняння способів протягування плоскими бойками та комбінованими. Встановлено, що у випадку з комбінованими бойками деформації на 15 % більше концентруються у центральній зоні.

У роботах Голенкова В. А. та інших [1.88, 1.89] за допомогою МСЕ перевіряється можливість зовнішнього розкочування великогабаритних обичайок з діаметром близько 10 м та товщиною стінки 430 мм. Враховані також напруження, які виникають в інструменті та обладнанні. Але у роботі представлені результати тільки для циліндричних поковок простої форми.

В роботах Нея і Сана [1.57, 1.59] досліджуються процеси розкочування конічних виробів із застосуванням МСЕ. Встановлені вихідні параметри заготовок для отримання готової поковки. Результати моделювання впроваджені у виробництво. Однак у наведених роботах відсутні рекомендації для отримання ступінчастих поковок.

МСЕ також використовується для перевірки параметрів процесу кільцевого розкочування на автоматах. В роботах Ваклава та Раза [1.30] описане моделювання процесу розкочування кільцевих заготовок. Враховані умови тертя та фізичні властивості матеріалу, залежні від температури, до яких відносяться коефіцієнт лінійного розширення, теплопровідність, питома тепломісткість та модуль Юнга. Встановлені швидкості руху інструментів.

Аналіз МСЕ використовувався для отримання технологічного процесу кування різних видів поковок для атомної енергетики. В роботі [1.90] наведено досвід роботи та розвиток важкої промисловості для заміни атомної електростанції на заводі Doosan. Проведені комп’ютерне моделювання, тест на

свинці у масштабі 1/30, тест на прототипі у масштабі 1/5 та тест на макеті у масштабі 1/1 для розробки належного процесу кування.

З огляду літературних джерел можна встановити, що МСЕ доволі широко застосовується у машинобудівній сфері від досліджень процесу кристалізації злитка до термічної обробки виробу. Слід відзначити, що даний метод доволі часто використовується для прогнозування формоутворення при вивченні процесів кування, які передбачають гаряче деформування металу. Виходячи з цього під час дослідження процесу розкочування із застосуванням профільованого бойка доцільно використовувати МСЕ.

## Висновки

1. Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновки щодо пріоритетних напрямків виготовлення крупногабаритних кільцевих поковок. Встановлено, що наявні способи виготовлення кільцевих деталей, таких як обичайки з фланцем, передбачають застосування значної механічної обробки кільцевої поковки або поєднання декількох виготовлених деталей з різними діаметрами шляхом зварювання, що призводить до значних витрат металу та збільшення часу виготовлення. З цього приводу пропонується отримувати поковку з профільованою поверхнею, яка наближена до форми деталі, шляхом застосування інструменту з поверхнею необхідного профілю.

2. Встановлено, що заготовками для деталей реакторних блоків є звичайні та пустотілі злитки. Пустотілий злиток має значний економічний ефект в порівнянні зі звичайним внаслідок виключення енерговитратних операцій осаджування і прошивання. Внаслідок меншої кількості нагрівань зменшуються викиди $CO_2$. Однак існують труднощі з кільцевою усадковою раковиною, що залишається після застигання металу.

3. Встановлено, що при виготовлені поковок значну увагу приділяють режимам заливання та кристалізації злитка, які враховують

швидкість заливання, кількість отворів при сифонній заливці, та режимам охолодження, які враховують теплопровідність матеріалу виливниці та швидкість охолодження. Проте в більшості випадків при отриманні кільцевих поковок не розглядається удосконалення режимів кування і використовуються технологічні операції, для виконання яких застосовують стандартні інструменти. Це призводить до значної витрати металу та енергоресурсів.

4. Встановлено, що існує велика кількість способів розкочування пустотілих поковок профільованим інструментом, які забезпечують раціональне використання металу та кращу структуру металу. Однак ці способи мало вивчені, для них відсутні рекомендації щодо режимів деформування, параметрів заготовки для розкочування, прогнозування кінцевих розмірів та геометрії інструменту.

5. Огляд літературних джерел дозволив встановити, що відсутні рекомендації щодо геометрії інструменту. В цьому випадку важливою є інформація щодо профілю робочої частини, перепадів між робочими поверхнями, кутів їх нахилу, можливості уникнення дефектів при використанні зазначеного інструменту.

6. З аналізу літературних джерел встановлено, що відсутні рекомендації щодо розкочування поковок з фланцями, а саме параметри заготовки, співвідношення її розмірів, фактори які впливають на призначення термомеханічних режимів для кування. З огляду на це важливою є інформація щодо впливу розмірів заготовки на кінцеву форму поковки.

## Список використаних джерел

1.1. Suzuki K. Manufacturing and material properties of ultra large size forgings for advanced BWRPV / K. Suzuki, I. Sato, H. Tsukada // Nuclear engineering and design – 1994. – №151. – P. 513–522.

1.2. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling / M. Balcar, R. Železný, L. Sochor [et al.] // Materials and technology. – 2008. – №42. – P. 183–188.

1.3. Lee S. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / S. Lee, Y. Lee, Y. Moon // Materials research innovations – 2011. – №1. – P. 458–462.

1.4. Forging of heavy products for nuclear fuel containers / A. Pastore, E. Guyot, J. Dairon, M. Lemoine // 19th International forgemasters meeting, 29 September – 3 October 2014, Makuhari – 2014. – P. 244–247.

1.5. Xu B. The void close behavior of large ingots during hot forging / B. Xu, M. Sun, D. Li // 19th International forgemasters meeting, 29 September – 3 October 2014, Makuhari – 2014. – P. 141–145.

1.6. Rutskii D. V. Features of structure and solidification of extended double ingots for hollow forgings. Part 1 / D. V. Rutskii, N. A. Zyuban, M. Y. Chubukov // Metallurgist. – 2016. – №1. – P. 156–163.

1.7. Каргин С. Б. Инновационные технологии ковки валов : монография / С. Б. Каргин, Б. С. Каргин, В. В. Кухарь. – Мариуполь : ПГТУ, 2016 – 145 с.

1.8. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot / J. Wang, P. Fu, H. Liu [et al.] // Materials and design – №35 – 2012 – P. 446–456.

1.9. Choice of a rational scheme for casting of a forging ingot for producing hollow forgings / M. V. Kolodkin, S. I. Zhul’ev, V. S. Dub [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2010. – №6. – P. 544–547.

1.10. Shamrei V. A. New shape of forging ingot for making hollow forged products / V. A. Shamrei, S. I. Zhul’ev // Metallurgist. – 2007. – №11. – P. 617–623.

1.11. Влияние геометрии слитка и условий затвердевания головной части на процессы структурообразования и развитие внутренних дефектов / С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан [и др.] // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2016. – №4. – С. 11–19.

1.12. Fabrication and properties of the heavy-wall ring forgings with modified 9Cr-1Mo steel for high-temperature and high-pressure reactor / T. Shinozaki, T. Komura, N. Fujitsuna [et al.] // 19th International forgemasters meeting, 29.09 – 3.10 2014, Makuhari – 2014. – P. 397–400.

1.13. Tanaka Y. Reactor pressure vessel (RPV) components: processing and properties / Y. Tanaka // Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels (RPVs) in Nuclear Power Plants. – Sawston: 1, 2015. – (Woodhead Publishing). – (Energy; 26). – P. 26–43.

1.14. From hollow ingot to shell with a powerful numerical simulation software tool / O. Jaouen, F. Costes, P. Lasne. M. Barbelet // 19th International forgemasters meeting, 29.09 – 3.10 2014, Makuhari – 2014. – P. 513–518.

1.15. Энергосберегающая технология получения крупнотоннажных полых слитков углеродистой и легированной стали / Е. А. Казачков, А. Д. Чепурной, Г. П. Клименко [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 1996. – Вип. 2. – С. 34–39.

1.16. Скобло С. Я. Слитки для круглых поковок / С. Я. Скобло, Е. А. Казачков. – Москва, 1973. – 248 с.

1.17. Алиев И. С. Исследование процессов ковки бойками выпуклой геометрии с интенсивными пластическими деформациями / И. С. Алиев, М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2015. – №3. – С. 125–130.

1.18. Формоизменение и напряженно-деформированное состояние заготовки при ковке с применением профилирования заготовки / О. Е. Марков, В. Н. Злыгорев, Н. А. Руденко, Ю. О. Ячмень. // Научный вестник ДГМА. – 2015. – №3. – С. 214–219.

1.19. Концептуальная оценка технических и экономических преимуществ производства крупногабаритных поковок из полого слитка / Б. И. Бережко, В. Н. Орлова, О. Н. Романов, А. А. Хохлов // Вопросы материаловедения. – 2000. – № 1. – С. 17–22.

1.20. Tomlinson M. The development of hollow ingot technology at Sheffield Forgemasters International Ltd. / M. Tomlinson, J. Talamantes-Silva, P. Davies // 18th International forgemasters meeting, 12-15 September 2011, Pittsburgh – 2011. – P. 175–178.

1.21. Hollow ingots: thirty years of use to control segregation and quality for nuclear and petrochemical large shells / G. Girardin, D. Jobard, F. Perdriset [et al.] // 18th International forgemasters meeting, 12-15 September 2011, Pittsburgh – 2011. – P. 170–174.

1.22. Improvement in the reliability of shells for light water reactors by manufacture from hollow ingots / P. Bocquet, R. Blondcau, I. Poitrault [et al.] // Nuclear engineering and design – 1991. – № 130. – P. 467–475.

1.23. Концептуальная оценка технических и экономических преимуществ производства крупногабаритных поковок из полого слитка. / Б. И. Бережко, В. Н. Орлова, О. Н. Романов, А. А. Хохлов // Вопросы материаловедения – 2000. – № 1. – С. 17–22.

1.24. A study on the fabrication of a large hollow ingot by CAE / S. Oh, K. Lee, Chang-won [et al.] // 18th International forgemasters meeting, 12-15 September 2011, Pittsburgh. – 2011. – P. 179–182.

1.25. Manufacturing process and properties of nuclear RPV shell ring forged from hollow ingot / N. Ohashi, T. Enami, H. Wanaka, K. Aso // Nuclear engineering and design. – 1984. – №81. – P. 193–205.

1.26. Скрипник С. В. Прогрессивная технология изготовления полых электрошлаковых заготовок для раскатных колец и обечаек / С. В. Скрипник, Д. Ф. Чернега // Процессы литья. – 2009. – №5. – С. 57–61.

1.27. Перспективы производства оборудования для АЭС с использованием ЭШП / А. В. Дуб, Л. Я. Левков, Д. А. Шурыгин [и др.] // Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – 2014. – №34. – С. 11–17.

1.28. Электрошлаковый переплав – способ кардинального повышения качества и свойств ответственных изделий в современном машиностроении. Технические требования и новые решения. / Л. Я. Левков, Д. А. Шурыгин, В. С. Дуб [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2012. – №6. – С. 2–6.

1.29. The development of hollow ingot casting technology at Vítkovice Heavy Machinery A. S. / P. Machovčák, A. Opler, Z. Carbol [et al.] // Metal: 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, 15 – 17 May 2013, Brno –2013.

1.30. Raz K. Using of a hydraulic press in production and manufacturing of large rings / K. Raz, K. Vaclav // Procedia engineering – 2014. – №69. – P. 1064 – 1069.

1.31. Cechura M. Development and innovations of existing design solutions of forming machines / M. Cechura, J. Smolik // Research report, CK-SVT-WP11, CVTS, Pilsen, 2012.

1.32. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 55 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada [et al.] // Nuclear engineering and design – 1985. – №84. – P. 261–272.

1.33. Current forging technology for integrated type steel forgings for nuclear steam supply system components / S. Kawaguchi, H. Moritani, H. Tsukada [et al.] // Nuclear engineering and design. – 1984. – №81. – P. 219–229.

1.34. А. с. 712185 СССР, МПК В 21 К 1/38. Устройство для раскатки полых изделий на прессе / П. П. Кальченко, В. П. Быков, Н. А. Цвященко, В. Г. Бурмистров, А. А. Бабаскин, А. И. Шишмарев, Г. А. Пименов (СССР). – № 2636655/25-27; заявл. 07.03.78; опубл. 30.01.80, Бюл. № 4. – 2 с.

1.35. Пат. 106713 Україна, МПК В 21 К 1/00. Пристрій для розкочування пустотілих виробів на гідравлічному пресі / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, Н. О. Руденко, П. І. Різак; заявник та власник патенту Донбаська державна

машинобудівна академія. – № u201508935; заявл. 16.09.2015; опубл. 10.05.2016, бюл. № 9. – 3 с.

1.36. А. с. 1006033 А СССР, МПК В 21 К 1/38. Устройство для раскатки кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, Ю. А. Петунин (СССР). – № 3369803/25-27; заявл. 31.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11. – 3 с.

1.37. Пат. 2207213 Россия МПК В 21 К 1/38, В 21 J 1/04. Составная оправка для раскатки колец / Б. М. Шлякман, Л. П. Белова, А. А. Уткин, заявитель и владелец Открытое акционерное общество "Ижорские заводы", Общество с ограниченной ответственностью "ОМЗ-Спецсталь". – № 2001110190/02, заявл. 13.04.2001, опубл. 20.06.2003, бюл. № 18.

1.38. Исследование качества крупногабаритной обечайки из 360-т слитка стали 15Х2НМФА для атомного реактора / В. А. Дурынин, Т. И. Титова, Г. П. Матвеев, С. Ю. Баландин // Электрометаллургия. – 2003. – № 9.– С. 45–48.

1.39. Клюев Д. Ю. О необходимости учета влияния режимов деформации на механические свойства поковок в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / Д. Ю. Клюев, В. Л. Чухлеб, А. В. Ашкелянец // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ. – 2011. – № 94. – С. 202–204.

1.40. Управление качеством поковок ответственного назначения в условиях ПАО «Днепроспецсталь» / В. А. Гринкевич, В. Л. Чухлеб, А. Н. Тумко, А. В. Ашкелянец // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 75–81.

1.41. Разработка технологии и производство удлиненной обечайки активной зоны корпуса реактора проекта ВВЭР-ТОИ из стали 15Х2НМФА кл.1 / Т. И. Титова, Д. В. Ратушев, Н. А. Шульган [и др.] // Сборник трудов 9-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 19-22 мая 2015 г., Подольск: научно-техническое электронное издание – АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» – http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article128-ru.htm

1.42. Патент 2349411 РФ МПК B21J 1/04, B21J 5/00, B21J 13/02 Кузнечный боек для раскатки крупногабаритных обечаек / А. А. Уткин,

Б. М. Шлякман, С. Э. Шкляев, заявитель и владелец Общество с ограниченной ответственностью «ОМЗ–Спецталь». – № 2006123959/02, заявл. 04.07.2006, опубл. 20.03.2009, бюл. № 8.

1.43. А. с. 884818 СССР, МПК В 21 К 1/38. Устройство для раскатки кольцевых поковок / В. Н. Орленко, В. О. Кононенко, П. П. Кальченко (СССР). – № 2904810/25-27; заявл. 01.04.80; опубл. 30.11.81, Бюл. № 44. – 3 с.

1.44. Пат. 47648 А Україна, МПК (2006.01) В 21 J 1/04. Спосіб виготовлення великогабаритних бандажів / П. П. Кальченко, В. М. Олешко, Ю. М. Станков, А. В. Кирпиченко; заявник та власник патенту АТ "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u2001064464 ; заявл. 26.06.2001 ; опубл. 15.07.2002, бюл. № 7. – 2 с.

1.45. Process optimization for high fracture toughness of maraging steel rings formed by mandrel forging / A. K. Jha, K. Sreekumar, T. Tharian [et al.] // Journal of manufacturing processes – 2010. – №12. – P. 38–44.

1.46. А. с. 175644 ЧССР, МПК В 21 J 5/00, B21K21/32. Способ производства кольцеобразной поковки фасонного профиля / И. Эльфман, С. Туронь, С. Бурда [и др.] (ЧССР) – № 477/8–7; заявл. 02.07.1973 ; опубл. 28.08.1976, Бюл. № 25. – 2 с.

1.47. Development of mono-bloc forging for CAP1400 Reactor pressure vessel / W. Bao-zhong, L. Kai-quan, L. Ying, Z. [et al.] // 19th International forgemasters meeting, 29 September – 3 October 2014, Makuhari – 2014. – P. 391–396.

1.48. Wang B. Development of mono-bloc nozzle shell for CAP1400 RPV / B. Wang // Book of Abstracts: 20th International forgemasters meeting, 11.09 – 14.09.2017, Graz – 2017. – P. 52.

1.49. Liu Y. Research on the near net shape forging technology for CAP1400 main pipe / Y. Liu // Book of Abstracts: 20th International forgemasters meeting, 11.09 – 14.09.2017, Graz – 2017. – P. 52.

1.50. High intensity forging for nuclear applications: Manufacturing and properties of nozzle shell with integral flange for EPR reactor pressure vessel /

T. Berger, E. Murai, I. Kurihara [et al.] // Ironmaking & Steelmaking. –2007. – №3. – P. 205–210.

1.51. А. с. 1540917 А1 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, Е. Д. Горохов, Н. В. Тараканова (СССР). – № 4393064/25-27; заявл. 27.01.88; опубл. 07.02.90, Бюл. № 5. – 5 с.

1.52. Пат. 37022 А Україна, МПК (2006.01) В 21 J 1/04. Спосіб виготовлення пустотних сферичних викуванців / П. П. Кальченко, В. М. Олешко, В. Б. Шабанов ; заявник та власник патенту ЗАТ "Новокраматорський машинобудівний завод". – № 2000031384; заявл. 10.03.2000; опубл. 16.04.2001, бюл. № 3. – 3 с.

1.53. Пат. 106717 Україна, МПК (2006.01) В 21 J 1/04. Спосіб виготовлення пустотілих сферичних поковок / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, Н. О. Руденко ; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201508943; заявл. 16.09.2015 ; опубл. 10.05.2016, бюл. № 9. – 3 с.

1.54. А. с. 863135 СССР, МПК В 21 К 1/38. Способ изготовления полых поковок / В. Д. Арефьев, Г. С. Рябцев, А. Ю. Петунин, Б. Г. Восходов. (СССР). – № 2869192/25-27; заявл. 12.12.79 ; опубл. 15.09.81, Бюл. № 34. – 3 с.

1.55. А. с. 948513 СССР, МПК В 21 J 1/04. Способ изготовления полых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, А. И. Зубков, В. Д. Соболев, А. Ю. Петунин (СССР). – № 3226620/25-27 ; заявл. 11.12.80 ; опубл. 07.08.82, Бюл. № 29. – 3 с.

1.56. А. с. 958026 СССР, МПК В 21 J 1/04. Способ изготовления конических обечаек / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, А. И. Зубков, В. Д. Соболев, А. Ю. Петунин (СССР). – № 3244552/25-27; заявл. 11.02.81; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34. – 3 с.

1.57. Research on key processing technology of nuclear power tapered cylinder forging / S. Nie, Z. Yu, D. Meng [et al.] // Materials design, processing and applications – 2013. – P. 2387–2394.

1.58. Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels / M. Sun, L. Hao, S. Li [et al.] // Journal of nuclear materials. – 2011. – №1. – 3. – P. 269–280.

1.59. Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant / K. Suzuki, I. Sato, M. Kusuhashi, H. Tsukada // Nuclear engineering and design – 2000. – №198. – P. 15–23.

1.60. А. с. 963662 СССР, МПК В 21 J 1/04. Способ изготовления полых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, А. И. Зубков, Ю. А. Петунин (СССР). – № 3275778/25-27; заявл. 05.02.81; опубл. 07.10.82, Бюл. № 37. – 3 с.

1.61. А. с. 889250 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, А. Ю. Петунин (СССР). – № 2912860/25-27; заявл. 06.02.80; опубл. 15.12.81, Бюл. № 46. – 3 с.

1.62. А. с. 1574345 А1 СССР, МПК В 21 К 1/38. Способ изготовления кольцевых поковок / А. В. Пакало, В. Д. Арефьев, Е. Д. Горохов, В. П. Золотов (СССР). – № 4418847/25-27; заявл. 03.05.88; опубл. 30.06.90, Бюл. № 24. – 4 с.

1.63 А. с. 902960 СССР, МПК В 21 J 1/04. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, С. И. Данилин (СССР). – № 2882187/25-27; заявл. 14.02.80; опубл. 07.02.82, Бюл. № 5. – 4 с.

1.64. А. с. 956123 СССР, МПК В 21 J 1/04. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, А. И. Зубков, Ю. А. Петунин (СССР). – № 3249728/25-27; заявл. 23.02.81; опубл. 07.09.82, Бюл. № 33. – 5 с.

1.65. А. с. 733829 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, В. С. Рябцев, Э. Л. Рогожин, С. И. Данилин, Ю. А. Петунин, Б. Г. Восходов, В. П. Нагайцев, В. Н. Лебедев (СССР). – № 2537143/25-27; заявл. 25.05.77; опубл. 15.05.80, Бюл. № 18. – 3 с.

1.66. А. с. 616030 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления профилированных колец / А. В. Калинин, А. И. Зубков, В. Д. Соболев, Г. С. Рябцев, В. Д. Арефьев, В. Н. Лебедев, Б. А. Молочников, А. Н. Петунии (СССР). – № 2598280/25-27; заявл. 01.08.76; опубл. 25.07.78, Бюл. № 27. – 2 с.

1.67. Злыгорев В. Н. Совершенствование технологических процессов ковки крупных поковок на основе разработки нового способа осадки четырёхлучевых заготовок : монография / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков // – Краматорск : ДГМА, 2016. – 148 с.

1.68. Пархомчик П. А. Особенности кольцераскатки в условиях мелкосерийного производства профильных колец. / П. А. Пархомчик, В. В. Рудый, В. Е. Антонюк // Литье и металлургия. – 2013. – №71. – С. 92–98.

1.69. Особенности использования кольцераскатного комплекса в производстве деталей ОАО «БелАЗ» / П. А. Пархомчик, В. В. Рудый, В. Е. Антонюк, А. А. Шипко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2012. – №1. – С. 354–358.

1.70. Cleaver C. Incremental profile ring rolling with axial and circumferential constraints / C. Cleaver, J. Allwood. // CIRP Annals – Manufacturing technology. – 2017. – №66. – P. 285–288.

1.71. Николенко Р. С. Применение пакета DEFORM 3D для анализа вариантов штамповки поковок типа "пластина с отростком" / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 45–53. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2014_1_8.

1.72 Основи наукових досліджень. Конспект [Електронний ресурс] / упорядник: д. т. н., проф. Пістунов І. М.. – Дніпропетровськ, 2007. – Режим доступу: http://library.donntu.edu.ua/bibl_fah/osnnaukdosldnepr.pdf

1.73. Лудченко А. А. Основы научных исследований: Учеб. пособие / А. А. Лудченко, Я. А. Лудченко, Т. А. Примак. – 2-е изд., стер. – К.: О-во "Знания", КОО, 2001. – 113 с.

1.74. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при протягуванні титанового сплаву з метою оптимізації параметрів кування / В. Л. Чухліб, Є. С. Клемешов, В. О. Гринкевич, Х. Дия // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015. – №24. – С. 159–166.

1.75. Калюжный В. Л. Параллелизация математического моделирования процессов обработки металлов давлением / В. Л. Калюжный, В. Н. Тарасенко // Технологические системы. – 2003. – № 2. – С. 28–31.

1.76. Голенков В. А. Математическое моделирование процессов ОМД на персональном компьютере / В. А. Голенков, З. П. Зыкова, В. И. Кондрашов – М. : Машиностроение, 1994. – 272 с.

1.77. Иванов К. М. Оценка точности упругопластического анализа метода конечных элементов / К. М. Иванов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 57–62.

1.78. Тюрин В. А. Мировая вузовская наука – инновационным технологиям ковки / В. А. Тюрин, В. В. Овечкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 45–48.

1.79. Миленин А.А. Анализ механизма уширения при осадке с помощью метода конечных элементов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1994. – № 12. – С. 19–21.

1.80. Зенкевич О.А. Метод конечных элементов в технике / О. А. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

1.81. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation / A. Kermanpur, M. Eskandari, H. Purmohamad [et al.] // Materials and design. – 2010. – №31. – P. 1096–1104.

1.82. Towards an optimization of forging processes using geometric parameters / I. Khoury, L. Giraud-Moreau, P. Lafon, C. Labergére // Journal of materials processing technology. – 2006. – №1. – P. 224–227.

1.83. Development of forging process design to close internal voids / H. Kakimoto, T. Arikawa, Y. Takahashi [et al.] // Journal of materials processing technology. – 2010. – №210. – P. 415–422.

1.84. Ookawa S. Evaluation of void-closing behavior during hot open-die forging process using numerical simulation / S. Ookawa, K. Tamura,

T. Furuhashi // 19th International forgemasters meeting, 29.09 – 3.10 2014, Makuhari – 2014. – P. 468–473.

1.85. Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot / K. Chen, Y. Yang, G. Shao, K. Liu. // Computational materials science. – 2012. – №51. – P. 72–77.

1.86. Banaszek G. Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging / G. Banaszek, A. Stefanik // Journal of materials processing technology. – 2006. – №177. – P. 238–242.

1.87. Andreyachshenko V. Simulation of fullering technology as a plastic deformation method for high quality forgings production/ V. Andreyachshenko, R. Kocich // METAL: 24nd international conference on metallurgy and materials, June 3 – 5 2015, Brno. – 2015. – P. 175–181.

1.88. Голенков В. А. Методы математического моделирования и новые задачи ОМД / В. А. Голенков, П. Г. Морев, С. Ю. Радченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 15–19.

1.89. Near net shape production of base flanges by radial-axial ring rolling / J. Seitz, G. Schwich, V. Jenkouk, G. Hirt // 19th International forgemasters meeting, 29.09 – 3.10 2014, Makuhari – 2014. – P. 234–239.

1.90. Kim D. K. Manufacturing technology development of the large forgings for replacement nuclear power plant / D. K. Kim // Book of Abstracts: 20th International forgemasters meeting, 11.09 – 14.09.2017, Graz – 2017. – P. 19.

1.91 Грищук Ю. С. Основи наукових досліджень: Навч. Посібник. / Ю. С. Грищук. – Харків: НТУ «ХПІ»», 2008. – 232 с.

# 2 МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗКОЧУВАННЯ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ

## 2.1 Вибір напрямку дослідження розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки

Розвиток наукових основ покращення якості та зниження витрат під час виготовлення крупних поковок і у такий спосіб підвищення конкурентоспроможності підприємств, що виготовляють деталі відповідального призначення, вимагає проведення спеціальних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розробку нових та удосконалення наявних технологічних процесів кування, ковальського оснащення та заготовок. Це вимагає застосування інтегрованого підходу, який враховує складний ланцюг всієї технологічної послідовності від виготовлення злитків до подальшого їх кування та механообробки. Розробка нових ресурсозаощаджувальних технологічних процесів кування крупних поковок з одночасним підвищенням їх якості вимагає розробки нових схем деформування, виготовлення та застосування нового ковальського оснащення та інструменту. Ефективним методом дослідження, в цьому випадку, є використання сучасних методів моделювання НДС, які характеризуються високою точністю одержуваних результатів.

Пріоритетним напрямком розвитку вітчизняного промислового комплексу є розробка енергоощадних технологічних процесів виготовлення виробів відповідального призначення для енергетичного машинобудування, що пов’язано із впровадженням нових наукомістких технологій, які сприяють підвищенню якості продукції внаслідок використання нових способів деформування з інтенсивними пластичними деформаціями (ІПД) в тілі заготовки. На сьогодні на підприємствах енергетичного машинобудування України не вистачає досліджень та науково обґрунтованих рішень з

розробки сучасних технологічних процесів кування поковок, які призначені для виготовлення деталей відповідального призначення. Продукція, яка на сьогодні виготовляється на вітчизняних підприємствах, не завжди відповідає Європейському стандарту SEP 1921 з УЗК [2.1]. Тому підприємства важкого машинобудування вимушені виготовляти продукцію переважно для внутрішнього ринку.

З літературних джерел встановлено, що на міжнародній арені лідируючи позиції серед виробників поковок для деталей реакторних блоків та корпусних елементів до них займають Creusot Forge (дочірнє підприємство французької компанії AREVA S.A.), японська компанія Japan Steel Works Ltd. (JSW), китайська China First Heavy Industries (Group) Co. Ltd, іспанська Equipos Nucleares SA (ENSA), південнокорейська Doosan Heavy Industries, російські АЕМ-технології та Атоменергомаш (дочірні підприємства Росатом). Усі ці компанії останні 25-30 років удосконалювали конструкції та виробництво елементів атомних блоків. Розробники реакторів у всьому світі прагнуть задовольнити великий ринковий попит, розробляючи нові невеликі моделі. Проекти надходять як від традиційних постачальників реакторів, так і нових компанії [2.2].

Реактори повинні відповідати таким характеристикам як безпека та надійність. Одна з основних задач конструкторів – удосконалення експлуатаційних характеристик та технічного обслуговування корпусів реакторних блоків. Для цього інженерами-технологами розробляються нові технологічні процеси термомеханічної обробки. До того ж необхідно знижувати загальну вартість виготовлення та збільшити термін експлуатації реактора [2.3]. Все це потребує додаткових досліджень формозміни та механічних властивостей.

Особливе місце займають конструктивні елементи корпусів реакторів зі значною різницею у розмірах поперечного перерізу. До них відносяться обичайки, фланці та обичайки поєднані з фланцями, причому як з одного боку, так і з двох боків. Такі елементи конструкції можна зустріти у реакторах,

виробниками яких є Китай – ACP-100, CNP-300, HTR-PM, CAP1400RPV, Південна Корея – System Integrated Modular Advanced Reactor, Росія – ABV-6M, RITM-200, VBER-300, США – mPower, GT-MHR, $EM^2$, Індія – AHWR-300-LEU [2.2].

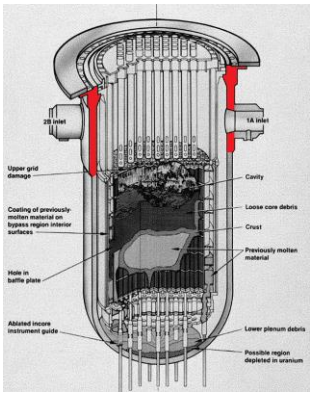
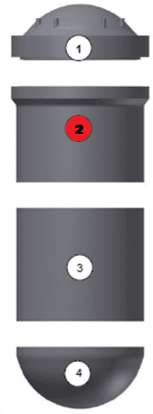
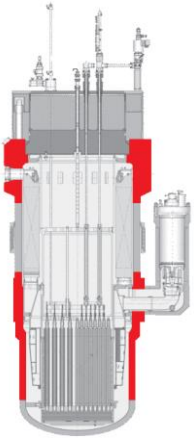
У таблиці 2.1 наведено конструкції реакторів, які містять обичайки з фланцем, що одержують куванням. Через те що в Україні сконцентрована велика кількість підприємств, які мають можливості виготовляти поковки, для машинобудівної галузі актуальною є проблема виготовлення великогабаритних поковок зі змінною товщиною стінки типу обичайок з фланцем, з яких отримують корпуси реакторних блоків. Такі деталі мають широкий попит як в атомно-енергетичній, так і в нафтопереробній галузі.

На сьогодні більшість елементів реакторного блоку зі змінюваним поперечним перерізом поєднуються шляхом зварювання окремих елементів, наприклад обичайки та фланці. Це ускладнює та збільшує час виготовлення, знижує експлуатаційні характеристики елементів і, як наслідок, конструкції в цілому. Ці операції можуть бути усунені шляхом кування поковок, які поєднували б в собі кілька деталей. В більшості випадків складний профіль деталі накривається напуском. При подальшій обробці відбуваються втрати металу, значний об’єм яких видаляється механічно, через що значна його кількість потрапляє у відходи. Крім відходів збільшується час виробництва та кількість енергетичних ресурсів, які йдуть на обробку виробу. В результаті відбувається збільшення собівартості виготовлення пустотілих поковок, які мають складний профіль.

Промисловий процес виготовлення таких деталей є дуже складним. Він включає виплавку сталі, розливання її у злитки, потрібної форми, маси та розміру, подальше їх кування, їх термічну та механічну обробки. На сьогодні вже розроблена достатня кількість матеріалів та ще розробляється багато нових матеріалів, з яких виробляють деталі для реакторів [2.4, 2.5]. Однак технології обробки цих матеріалів, а саме технології кування, які передбачають використання складних профільованих інструментів, ще

потребують додаткового вивчення для впровадження у виробництво. Ці технології розробляються з метою зменшення собівартості виготовлення деталі та підвищення конкурентоспроможності підприємства або компанії. Одним зі способів вирішення даних задач є наближення форми поковки до форми заданої деталі, завдяки чому знижується кількість металу, яка іде у

Таблиця 2.1 – Приклади напівфабрикатів зі змінною товщиною стінки типу обичайка з фланцем для виготовлення корпусів реакторних блоків

| Назва ректора | Схема реактора | Промислово вироблена деталь |
|---|---|---|
| AP1000 |  | |
| CAP1400 |  | |
| RITM-200 |  | |

відходи та зменшується використання різального інструменту.

Виходячи з викладеного напрямком дослідження в роботі є отримання пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки. Отримувати поковки пропонується шляхом розкочування з використанням ступінчастого бойка. При виконанні теоретичного дослідження необхідно розглянути НДС поковки, та встановити, які параметри процесу є найбільш значущими. При виконанні експериментального дослідження потрібно встановити закономірності, які описують формозміну поковки під час деформування, та дослідити показники якості. За результатами роботи необхідно надати методику розробки технологічного процесу кування, рекомендації щодо конструювання інструменту та розширення можливостей його застосування.

## 2.2 Методика теоретичних досліджень розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки

Мета теоретичного дослідження – встановлення впливу геометричних параметрів заготовки на формозміну та деформований стан в процесі розкочування.

Кожен теоретичний метод має певні припущення. Вони стосуються властивості матеріалу (суцільність, ізотропність), умови тертя, температури процесу, приймається сталість об’єму заготовки, не враховуються інерційні та масові сили. Більшість методів не враховують зневіцнення, яке виникає при гарячій обробці, і будуються на умовах ідеальної пластичності та жорстко-пластичній концепції. Найбільш точним методом можна вважати той, який з усіма припущеннями та обмеженнями не змінює фізичної суті процесу, тобто припущення не є грубими для даного випадку. З огляду на це теоретичне дослідження процесів кування крупних поковок здійснюється МСЕ, як одним з достовірних, що дозволяє отримати великий обсяг даних стосовно процесів деформування, в порівнянні з подібними методами дослідження [2.6–2.8]. У своїй методологічній основі цей метод тісно

пов’язаний з такими проекційними методами, як метод Гальоркіна або метод Рітца, однак для координатних функцій використовуються функції з кінцевим носієм, відмінні від нуля тільки в порівняно невеликій області зміни аргументів [2.9, 2.10]. Метод широко застосовується для вирішення задач пластичної деформації заготовок, розрахунку НДС і температурних полів в задачах, які ставляться перед обробкою металів тиском [2.11].

МСЕ це один з найбільш універсальних і потужних методів для виконання теоретичного аналізу процесів ОМТ. Він дозволяє вирішувати плоскі, вісесиметричні та складні об’ємні задачі та широко використовується в даний час. Скінченно-елементні рішення застосовуються для вирішення задач значних деформацій, прирощення деформацій, осьового вигину, усталеної та несталої течії металу та ряду інших проблем.

Метод зводиться до того, що область розбивається на окремі елементи (в нашому випадку на тетраедри). Елементам в цілому і кожному вузлу зокрема надають певні ступені свободи, а кожен елемент має властивості матеріалу дискретного середовища. Завдяки цьому можна визначити зміну діаметрів поковки та встановити на скільки змінюється довжина поковки, що є доволі важливим параметром під час розкочування. Основні співвідношення МСЕ, стосовно до процесів ОМД, засновані або на теорії пластичного плину, або на деформаційній теорії пластичності. В межах кожного елемента записується функціональний вираз для кожного з початкових параметрів системи рівняння, як прості функції координат. Прирівнюючи значення в вузлових точках для сусідніх областей, виходять рівняння (або системи рівнянь), за допомогою яких визначаємо коефіцієнти в функціональних рівняннях. Це дозволяє визначати НДС у різних частинах поковки та зрозуміти різницю у властивостях поковки, яка розкочується.

Перевагами МСЕ є те, що він дозволяє визначити: переміщення (швидкості переміщення) вузлів сітки, розподіл деформацій і напружень в елементах, на які розбита область, значення температур в кожній точці тіла, сили, яка діє на вузли [2.12, 2.13]. Всі ці дані можна отримати для будь-якої

вказаної точки, з урахуванням тих температур, накопиченої деформації, які характерні для даного НДС в будь-який момент деформування, тобто метод дозволяє враховувати зміцнення і знеміцнення, зміну фізичних і теплофізичних властивостей матеріалу з урахуванням температури кожного елемента, яка підрахована на попередньому етапі. Метод дозволяє задати різні властивості матеріалу для будь-якої області заготовки і у такий спосіб моделювати порожнечі та дефекти в деформованому тілі. Отримані результати можна представити в зручному для розуміння вигляді, наприклад, лінії струму частинки, поля розподілу температур, деформацій, напружень. Знаючи ці результати, можна прогнозувати утворення дефектів.

У наведеній роботі для розрахунків МСЕ використовувалося програмне забезпечення «Deform 3D» (тимчасова ліцензія ДДМА). Чисельна модель процесу деформування заснована на теорії течії. Застосування даного програмного продукту обумовлено його широким розповсюдженням, високою точністю і мінімальним часом розрахунку. Матеріал заготовки розглядається, як нестисливе пружно-пластичне тіло. Завдяки даному програмному забезпеченні можна враховувати температуру кування, розподіл температурних полів та теплообмін між інструментом, заготовкою та навколишнім середовищем, швидкість деформування, враховувати особливості конструкції інструменту, обирати тип обладнання. Також завдяки йому у дослідника мається багато вихідної інформації про процес кування – ступінь, швидкість, напрямок деформації, кінцева температура, доволі точна форма та розміри поковки, структурна будова поковки, сила деформування та сила, яка діє на інструмент. Система вихідних рівнянь включає [2.14]:

– рівняння рівноваги:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \qquad (2.1)$$

– рівняння руху:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \frac{dv_i}{dt} = 0 \quad , \tag{2.2}$$

– кінематичні співвідношення:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad , \tag{2.3}$$

– визначальні рівняння течії:

$$S_{ij} = \frac{2}{3}\frac{\overline{\sigma}}{\dot{\overline{\varepsilon}}}\dot{\varepsilon}_{ij} \, , \tag{2.4}$$

– умова нестисливості:

$$v_{i,i} = 0 \, , \tag{2.5}$$

– рівняння опору деформації для пружно-пластичного матеріалу:

$$\overline{\sigma} = \sigma(\overline{\varepsilon}, \dot{\overline{\varepsilon}}, T) \, , \tag{2.6}$$

де $\sigma_{ij}$ , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненти тензорів напружень та швидкостей деформації,

$v_{i,j}$ – компоненти вектору швидкості,

$S_{ij}$ – девіатор тензора напружень,

$\overline{\varepsilon}, \dot{\overline{\varepsilon}}, T$ – інтенсивність напружень, деформацій та швидкостей деформацій відповідно;

$\rho$ – густина.

Дискретизація рівнянь 2.1 – 2.5 проводиться на основі принципу віртуальних швидкостей і робіт. Невідомими є вузлові значення швидкостей і середніх напружень. Скінченно-елементна сітка складається з лінійних чотиригранних тетраедрів [2.15].

Якість продукції складається з двох загальних засад – це геометричні показники поковки, до яких відноситься конусність, та показники механічних властивостей. Ці складові якості повинні відповідати вимогам стандартів, що регулюють як показники рівня механічних властивостей, так і показники геометричних розмірів. Останні звичайно представлені в стандартах у вигляді прийнятних відхилень розмірів поковки, а також – величин припусків, які зі свого боку закривають неточності розмірів і кривизни поковки шаром додаткового металу, який буде видалений при подальшій механічній обробці. Збільшення цього шару металу призводить до підвищених витрат металу при виготовленні деталі і, як наслідок, до більшої собівартості деталі та зменшення коефіцієнта використання металу [2.16].

Основний технологічний параметр, необхідний для розробки технологічних процесів розкочування – формозміна в процесі деформування. Форма розкоченої заготовки визначається конусністю внутрішнього діаметра, яка розраховувалася за наступною формулою [2.17]:

$$K=\frac{\left|d_{п.в}-d_{п.у}\right|}{L_п}, \qquad (2.7)$$

де $d_{п.в}$ – торцевий внутрішній діаметр поковки зі сторони виступу;

$d_{п.у}$ – торцевий внутрішній діаметр поковки зі сторони уступу;

$L_п$ – довжина поковки.

При виконанні теоретичного дослідження конусність під час процесу розкочування визначалася як різниця між координатами (по осі x). Тобто, у програмі DEFORM 3D на розрізі заготовки по площині ZY встановлювалися чотири точки на краях отвору. Потім для цих точок бралися дані координат переміщення під час процесу. Найбільша різниця за коло між координатами по осі X для протилежних точок відносно осі поковки відповідала отриманому діаметру.

Під час виконання теоретичних досліджень встановлені параметри заготовки, які є найбільш значущими для формоутворення поковки. Отже було встановлено, що основними вихідними факторами процесу розкочування ступінчастих обичайок є: відносний діаметр виступу заготовки $D_в / d_{ср}$, відносний діаметр уступу заготовки $D_у / d_{ср}$ та ступінь деформування $\varepsilon$. Через значний час моделювання встановлення закономірностей зміни розмірів поковки та заготовки було вирішено встановлювати експериментальним шляхом, що потребувало ретельного планування експерименту.

## 2.3 Методика проведення експериментальних досліджень розкочування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки

В результаті експериментальних досліджень процесів розкочування необхідно встановити вплив основних параметрів заготовки на плин металу в ході деформування, а також перевірити результати теоретичного моделювання. Основними параметрами, які впливають на процеси розкочування є співвідношення розмірів заготовки та ступінь деформації.

Експериментальні дослідження, на відміну від теоретичних, припускають матеріальні витрати та можуть велику трудомісткість. Зважаючи на це теоретичні методи мають переваги та повинні бути первинними щодо експерименту [2.18], оскільки вони дозволяють визначити (орієнтовно) напрямок для проведення експерименту. Якщо ж область дослідження визначена та існує теоретичне рішення, то необхідне емпіричне підтвердження отриманих результатів. В цьому випадку скорочується число експериментів.

При виборі тих чи інших експериментально-розрахункових методів для дослідження НДС поковок при гарячому деформуванні необхідно враховувати наступне:

– рівень складності експерименту і можливість його відтворення в заводських умовах;

– необхідність застосування спеціального обладнання та оснащення;

– необхідність спеціальної попередньої підготовки зразків;

– можливість реалізації при температурах гарячої обробки металів тиском;

– трудомісткість отримання первинної експериментальної інформації, яка потребує математичного оброблення експериментальних даних і можливість її реалізації на електронних обчислювальних машинах;

– точність;

– можливість дослідження НДС всередині поковки без порушення її суцільності до деформування [2.19].

Метою експериментальних досліджень процесів кування є перевірка можливості використання та ефективності пропонованих технологічних схем, отриманих на підставі теоретичних досліджень. Крім того, результати даних експериментальних досліджень, поряд з узагальненням досвіду промислового впровадження, будуть використані для оцінки ефективності запропонованих технічних рішень і розроблених практичних рекомендацій. Дослідження нового процесу розкочування виконані на базі лабораторій кафедри МПФ та ОМТ ДДМА.

Підвищена точність результатів досліджень в процесах кування великогабаритних поковок є важливим аспектом, тому що від цього залежить правдивість одержуваної інформації. Експериментальні дослідження повинні бути проведені у лабораторних умовах з дотриманням теорії та законів подібності, які є основою фізичного моделювання. У теорії подібності існують різні методи, які зводяться до пошуку безрозмірних величин критеріїв подібності [2.20]. Постановка експерименту на основі теорії подібності спрощується і полегшується ще завдяки тому, що в цьому випадку знаходиться функціональний зв’язок між цілими комплексами величин, які визначають явище, і в ряді випадків немає потреби вивчати вплив на процес кожного фактору окремо. У роботі проводяться дослідження процесів гарячого пластичного деформування, яке характеризується великою кількістю і складністю процесів, що протікають у металі. Такі процеси залежать від

розмірів, форми, хімічного складу матеріалу, температурних, швидкісних умов, умов навколишнього середовища тощо. Щоб максимально наблизити умови експериментальних досліджень до реальних умов, необхідно витримати основні умови закону подібності [2.21].

Для відтворення процесів, які протікають в натуральному зразку і моделі, необхідно задовольнити основним умовам і законам подібності: геометричному, силовому, реологічному і кінематичному.

Геометричні умови подібності [2.22]:

$$\frac{h_н}{h_м} = \frac{b_н}{b_м} = \frac{l_н}{l_м} = n,$$

де $h_н$, $h_м$, $b_н$, $b_м$, $l_н$, $l_м$ – геометричні параметри натурного і модельного зразків; n - масштабний коефіцієнт подібності.

Кінематична умова подібності:

$$v_м = v_н \cdot n,$$

де $v_м$, $v_н$ – швидкість деформування моделі і натурного зразка відповідно.

Процес обробки металів тиском характеризується значною кількістю параметрів. При визначенні, особливо для випадку складного маловивченого процесу, легко не врахувати суттєві чинники. Отримавши замкнуту систему рівнянь і граничні умови, тобто, розробивши строгу математичну модель процесу, можна отримати найбільш обґрунтований ряд критеріїв подібності. Однак, у випадку, коли явище не вивчено і не має навіть наближеного його математичного опису, слід вдаватися до часткового аналізу, що дозволяє використовувати будь-яку інформацію для вирішення завдання. За такої умови обмежений список параметрів дозволяє

побудувати лише грубо наближену модель. Дослідження на ній створюють передумови для розробки більш точної моделі [2.16]. З огляду на це, щоб зберегти подобу фізико-механічних властивостей (реологічну), доцільно виготовляти модель заготовки з матеріалу натури. Однак це не завжди є обов'язковою умовою, тому для виявлення загальних закономірностей процесів пластичної формозміни часто обирають матеріал моделі, який є відмінним від матеріалу натури.

Для дослідження процесів гарячої обробки металів в лабораторних умовах рекомендовано використовувати свинець, оскільки цей метал добре піддається обробці, пластичний, має низьку температуру рекристалізації (≈ 20°С) і плавлення (≈ 330°С). Моделювання на свинцевих заготовках не суперечить положенням теорії подібності, тому для цього матеріалу можна реалізувати повний металургійний цикл. Шляхом введення у свинець невеликої кількості сурми (до 5%) або телуру (до 0,5%) можна змінювати механічні характеристики модельного матеріалу в досить широких межах [2.23, 2.24]. Під час плавлення у свинець додавався хлористий амоній (нашатир) $NH_4Cl$ для видалення оксидної плівки та шкідливих домішок з розплаву.

Для проведення експериментів виготовлялися свинцеві зразки у масштабі 1:40 до натуральної поковки. Зразки отримувалися шляхом лиття свинцю у форму зі стрижнем з подальшою механічною обробкою. Усі відлиті зразки мали діаметр виступу 80 мм, діаметр уступу 65 мм та висоту уступу 49 мм. Висота виступу відлитої заготовки складала 53 мм, що на 20 мм більше, ніж треба. Запас висоти робився для того, щоб усадкова раковина, що утворюється під час кристалізації, не потрапила у тіло механічно обробленої заготовки, яка надалі розкочувалася. Виливниця (рис. 2.1, а) складалася з основи 5, на яку встановлювалися кільце 4 для формування уступу та стрижень 3 з конусністю 1:100, що подібно оправці для протягування, для формування отвору, потім одягався корпус 2. Зібрана виливниця (рис. 2.1, б) мала температуру 180°С – 200°С, з метою усунення нашарування свинцю на

стінки. Підігрів виконувався за допомогою промислового фену HeiBluftpistole BHA 1500 з максимальною температурою нагрівання 500°C. Охолодження заготовок відбувалося разом з виливницею на повітрі. Відліті заготовки (рис. 2.3, в) надалі були механічно оброблені до потрібних розмірів для отримання зразків згідно з плануванням експерименту [2.25].

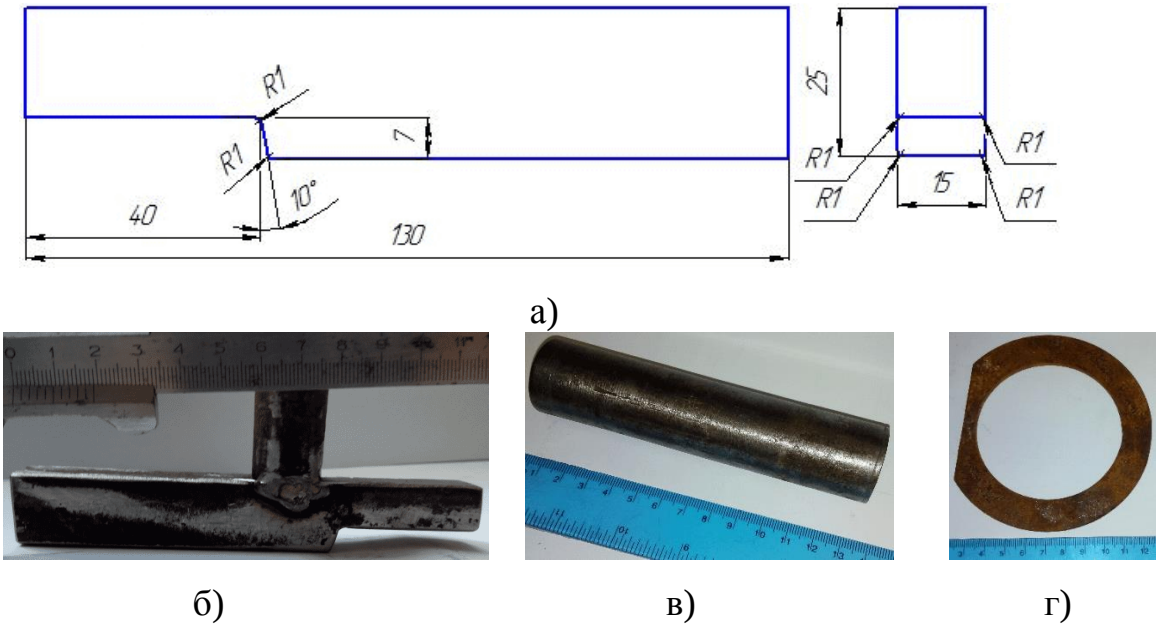
а) б) в)

Рисунок 2.1 – Оснащення для відливання заготовок (а, б) та відліті заготовки (в)

Для розкочування був виготовлений ступінчастий бойок та підібраний дорн. Бойок (рис. 2.2, а, б) загальною довжиною 130 мм мав сходинку висотою 7 мм, та довжину виступу 40 мм, усі радіуси округлення 1 мм. Дорн мав діаметр 30 мм, що відповідає умові 0,95 від діаметра отвору заготовки. З метою отримання точних розмірів та забезпечення необхідного ступеня деформації використовувалися кільця шириною 19, 17, 16, 15 та 14 мм (рис. 2.2, в), з одного боку, та набір пластин по 1 мм завтовшки, з іншого, які обмежували рух бойка. Стояками для розкочування були два вирізних бойка з однаковими висотою та вирізами. Поворот заготовки виконували вручну.

Оснащення для проведення експериментальних досліджень зображено на рисунку 2.3. На двох вирізних бойках, які слугували в якості стояків для розкочування 5, розміщався дорн 4. З одного боку розташовувався набір пластин 6 для регулювання відстані між бойком та дорном, з іншого кільце 3.

Під час розкочування пластинами та кільцем регулювався ступінь деформації зразка. Видаляючи по одній пластині (1 мм) після кожного кола розкочування та встановлюючи кільце з меншої ширини, змінювалася відстань між інструментами. Ступінчастий бойок 2 кріпився до плунжера преса 1 за допомогою хвостовика, який вставлявся у отвір плунжера та фіксувався болтом.




а)

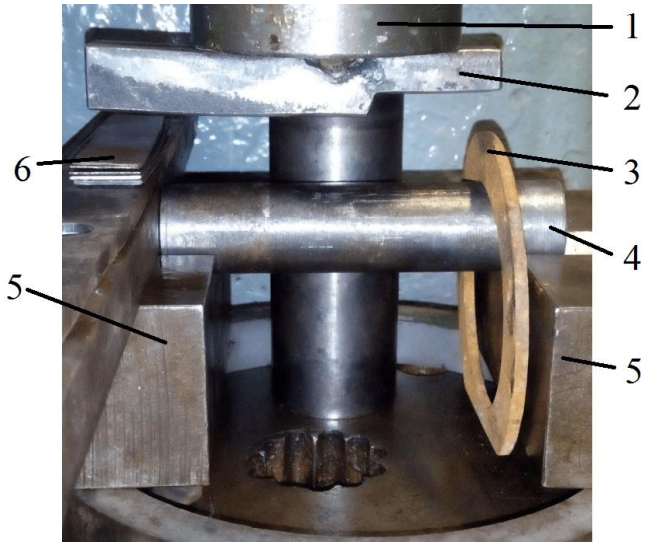






б) в) г)

Рисунок 2.2 – Інструмент для розкочування




1 – плунжер пресу, 2 – ступінчастий бойок, 3 – кільце (обмежувач ходу), 4 – дорн, 5 – стояки для розкочування, 6 пластини для регулювання ходу

Рисунок 2.3 – Оснащення для розкочування

При виборі типу обладнання для експериментальних досліджень потрібно було виходити з наявності обладнання необхідної потужності для здійснення процесів розкочування кілець зі ступінчастою поверхнею, достатньої величини робочого простору для розміщення в ньому експериментального оснащення, можливості забезпечення регулювання швидкості руху деформувального інструменту. Дослідження були проведені у лабораторних умовах на гідравлічному пресі BLELL K-G номінальною силою 100 кН (швидкість робочого ходу 200 мм / хв.). Керування пресом відбувалося вручну за допомогою важеля.

Для порівняння механічних властивостей, макро- та мікроструктури виробів, отриманих за базовою та за новою технологіями, необхідно провести дослідження на сталевих зразках. Досліджуваним матеріалом є сталь ХВГ, тому що вона має широке застосування у виробництві великих поковок відповідального призначення. Для нової та для базової технології було виготовлено дві заготовки з розмірами Ø68xØ26x43 та Ø72,5xØ26x44 відповідно. Також був виготовлений інструмент для розкочування – ступінчастий бойок та оправка з конусністю 1:100 (рис. 2.4).

Механічні властивості досліджуються шляхом вимірювання твердості. В даний час існує близько трьох десятків методів випробування твердості, причому кожен має цілком певну область застосування. Серед цього великого різноманіття можна виділити кілька найбільш поширених, методів, заснованих на однакових принципах [2.26]. До них відносяться НВ – твердість по Брінеллю; HRa, HRb, HRc – твердість по Роквеллу (за шкалами A, B і C); HV – твердість по Віккерсу; HSd – твердість по Шору; НР – твердість по Польді; Нμ – мікро-твердість та інші. Метод Віккерса вимагає дуже ретельної підготовки поверхні – тонкого шліфування або полірування. Метод небажано застосовувати при вимірюванні твердості крупнозернистих і різнорідних структур, оскільки при малому розмірі відбитка (порівнянній з розмірами зерна) можна отримати великий розкид даних. Методи Польді та Брінелля в нашому випадку не застосовуються через великий діаметр кульки, 10 мм, для нашого

зразка, у якого товщина стінки дорівнює 5 мм. Метод Шора застосовується для деталей вагою понад 5 кг, або для більш легких, але з товщиною понад 10 мм. Тому було обрано метод вимірювання твердості по Роквеллу.

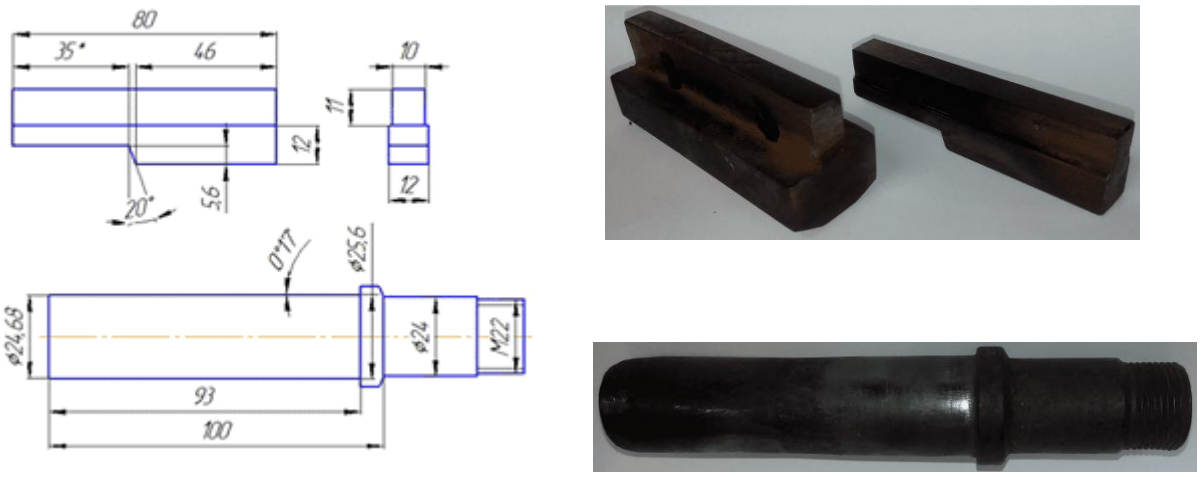



Рисунок 2.4 – Інструмент для проведення дослідження

Під час вимірювання твердості по Роквеллу індентором є або алмазний конус з кутом при вершині 120° і радіусом заокруглення 0,2 мм, або сталева загартована кулька діаметром 1,588 мм (1/16) [2.26]. Індентор вдавлюється в випробовуваний матеріал під дією двох послідовно навантажень: попереднього $P_0$, що дорівнює 1 кН і основного $P_1$. Попереднє навантаження завжди дорівнює 1 кН (незалежно від індентора), а основне навантаження коливається в залежності від індентора і випробуваного матеріалу. Якщо індентором є алмазний конус, то основне навантаження $P_1$ може бути або 5, або 14 кН (загальне навантаження 6 і 15 кН), якщо індентором є кулька, то основне навантаження завжди дорівнює 9 кН (загальна 10 кН). У нашому випадку індентором буде кулька, тобто твердість була заміряна по шкалі b.

З іншого боку зразка були визначені показники якості – макро- та мікроструктури та бал зерна. Для отримання макроструктури зразки шліфувався на наждачному папері з розміром зерна Р80 та Р160. Після цього був протравлений у 15% розчині $HNO_3$ протягом 15 хв. В результаті були отримані зображення макроструктури металу, яка сканувалася та фотографувалася.

Після цього макрошліф полірувався та шліфувався для отримання зображення мікроструктури. Шліфування проводилося на наждачному папері з розміром зерна Р80, Р120, Р600, Р1200. Полірування виконувалося на звичайному папері з алмазним змащенням, після чого зразки були знежирені бензином та спиртом. Фінішне полірування на тканині з фетру. Після полірування зразки були знежирені спиртом та протравлені 10% розчином $HNO_3$ у спирті $C_2H_5OH$. Після травлення поверхня була очищена спиртом [2.27].

Розрахунок характеристик зерна проводиться згідно ГОСТ 5639-82 за допомогою метода підрахунку зерен, який полягає у визначені кількості зерен на одиниці поверхні шліфа (1 мм$^2$) і розрахунку середнього діаметра та середньої площі зерна. Для цього на збільшеному зображенні мікроструктури наноситься коло, яке відповідає 0,5 мм$^2$ від одиниці поверхні, та підраховується кількість зерен, які потрапили у коло та які пересікають його. Розрахунок балу зерна виконуватиметься за наступними формулами:

- загальна кількість зерен на 0,5 мм$^2$:

$$n_{100} = n_1 + \frac{n_2}{2}, \tag{2.8}$$

- кількість зерен на 1 мм$^2$:

$$m = 2 \times n_{100}, \tag{2.9}$$

- середня площа зерна, мм$^2$:

$$a = \frac{1}{m}, \tag{2.10}$$

- середній діаметр зерна, мм:

$$d = \frac{1}{\sqrt{m}}, \tag{2.11}$$

- бал зерна:

$$n = \frac{lg\, m - lg\, 8}{lg\, 2}, \tag{2.12}$$

де n1 – кількість зерен, які потрапили у коло,

n2 – кількість зерен, які перетинають коло,

lg8, lg2 – прийнято згідно методики.

## 2.4 Метод визначення формозміни пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки під час розкочування ступінчастим бойком

Іноді експериментальний метод є єдино можливим та достовірним. Використання методів планування експерименту дозволяє отримувати необхідну інформацію про процес з мінімальними витратами [2.28].

Планування експерименту дозволяє не тільки провести статичну обробку експериментальних даних, але й отримати коефіцієнти рівняння регресії, завдяки чому буде отримана математична модель формоутворення поковки при розкочуванні ступінчастим бойком. В результаті планування експерименту очікується отримати регресійне рівняння закономірності зміни розмірів заготовки від ступеня деформації.

Методика експериментального визначення формозміни полягала у наступному. Свинцеві заготовки розкочувалися ступінчастим бойком з величиною обтискання 1 мм за коло. Величина обтискання регулювалася за допомогою пластин, товщина яких 1 мм. Після кожного кола замірялися розміри деформованої заготовки. У такий спосіб була отримана значна кількість даних про зміну розмірів заготовки для кожного зразка в залежності від ступеня деформації.

Розрахунок процесу розкочування поковок зі змінною товщиною стінки представляє складну дослідницьку задачу, що викликано впливом значного числа факторів на даний процес. Тому для отримання рівнянь, які б описували зміну розмірів заготовки в процесі деформування, необхідно визначити центр планування та кроки варіювання. Центр плану $X_1$ для відносного діаметра виступу дорівнює 2,4, при інтервалі варіювання 0,1. Для відносного діаметра уступу $X_2$ центр плану дорівнює 1,85, а крок варіювання 0,2. Для ступеня деформації центр плану дорівнює 0,2, а крок – 0,1. При таких параметрах є можливість максимально охопити розмірний діапазон заготовок, застосувавши наявне оснащення. Швидкість деформування та коефіцієнт тертя під час експерименту змінюватися не

будуть. Отже, виділені три головні чинники, що чинять вплив на процес розкочування обичайок з фланцем – відносний діаметр виступу заготовки $D_в / d_{ср}$, відносний діаметр уступу заготовки $D_у / d_{ср}$ та ступінь деформації $\varepsilon$ (табл. 2.2) та параметри їх варіювання. Параметрами оптимізації виступатимуть відносний діаметр виступу поковки $D_{п.в} / d_{п.в}$, відносний діаметр поковки $D_{п.у} / d_{п.у}$, співвідношення торцевих діаметрів отвору $d_{п.в} / d_{п.у}$.

Ступінь деформації для процесів розкочування буде розраховувався виходячи зі зміни товщини стінки та визначатиметься за формулою [4.2]:

$$\varepsilon_i = \frac{S_{поч} - S_i}{S_{поч}}, \qquad (2.13)$$

де $\varepsilon_i$ – ступінь деформації для поточного обтискання;

$S_{поч}$ – початкова товщина стінки;

$S_i$ – поточна товщина стінки.

Введення показника відносного ступеня деформації $\varepsilon$ дозволяє кількісно оцінити різницю між збільшенням діаметрів поковки з боку виступу та уступу при розкочуванні ступінчастим бойком.

Таблиця 2.2 – Основні фактори і рівні їх варіювання при проведенні експерименту за планом по типу ПФЕ $3^n$

| Фактори та інтервали їх варіювання | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
|---|---|---|---|
| | $D_в / d_{ср}$ | $D_у / d_{ср}$ | $\varepsilon$ |
| Інтервал варіювання $\Delta x_i$ | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| Нижній рівень $x_i = -1$ | 2,5 | 2,05 | 0,1 |
| Середній рівень $x_i = 0$ | 2,4 | 1,85 | 0,2 |
| Верхній рівень $x_i = +1$ | 2,3 | 1,65 | 0,3 |

Перехід від умовних параметрів до натуральних проводиться за наступними формулами [2.29]:

$$X_1 = \frac{D_в / d_{ср} - 2{,}4}{0{,}1}, \quad X_2 = \frac{D_у / d_{ср} - 1{,}85}{0{,}2}, \quad X_3 = \frac{\varepsilon - 0{,}2}{0{,}1}. \tag{2.14}$$

Для відносного діаметра виступу поковки $D_{п.в} / d_{п.в}$, відносного діаметра уступу $D_{п.у} / d_{п.у}$ та співвідношення торцевих діаметрів отвору $d_{п.в} / d_{п.у}$ доцільніше провести планування експерименту при використанні плану другого порядку [2.30]. Для цього можна скористатися планом повнофакторного експерименту по типу $3^n$. В даному випадку число факторів n = 3 (див. табл. 2.1). В цьому випадку отримуємо високу точність коефіцієнтів регресії при факторному плануванні [2.31, 2.32]. Щоб реалізувати цей план необхідно провести $3^3 = 27$ досліджень. План-матриця експерименту наведена в таблиці 2.3. Методика розрахунку за розробленим плануванням експерименту представлені в додатках В – Ґ.

Рівняння регресії в загальному вигляді [2.33]:

$$\begin{aligned} Y_{ug} = {} & B_1 + B_2 \times X_1 + B_3 \times X_2 + B_4 \times X_3 + B_5 \times X_1^2 + B_6 \times X_2^2 + B_7 \times X_3^2 + B_8 \times X_1^2 \times X_2^2 \times X_3^2 + \\ & + B_9 \times X_1^2 \times X_2^2 \times X_3 + B_{10} \times X_1^2 \times X_2 \times X_3^2 + B_{11} \times X_1 \times X_2^2 \times X_3^2 + B_{12} \times X_1^2 \times X_2^2 + B_{13} \times X_2^2 \times X_3^2 + \\ & + B_{14} \times X_1^2 \times X_3^2 + B_{15} \times X_1 \times X_2 \times X_3^2 + B_{16} \times X_1 \times X_2^2 \times X_3 + B_{17} \times X_1^2 \times X_2 \times X_3 + B_{18} \times X_1^2 \times X_3 + \\ & + B_{19} \times X_2^2 \times X_3 + B_{20} \times X_1 \times X_3^2 + B_{21} \times X_2 \times X_3^2 + B_{22} \times X_1 \times X_2^2 + B_{23} \times X_1^2 \times X_2 + B_{24} \times X_1 \times X_2 \times X_3 \\ & + B_{25} \times X_1 \times X_2 + B_{26} \times X_1 \times X_3 + B_{27} \times X_2 \times X_3 . \end{aligned} \tag{2.15}$$

Коефіцієнти рівняння регресії можна визначити за формулою [2.33]:

$$\mathrm{B_i} = (\mathrm{X_i^t} \times \mathrm{X_i})^{-1} \times (\mathrm{X_i^t} \times \overline{\mathrm{Y_i}}), \tag{2.16}$$

де $X_i$ – розширена план-матриця в кодових змінних;

$X_i^t$ – транспонована матриця $X_i$;

$\overline{Y_i}$ – середнє значення для параметрів відгуку.

Підставляючи коефіцієнти, отримані при розрахунку за формулою 2.13, в регресійні рівняння 2.15, отримуємо математичну модель 2.17, що складається з трьох рівнянь та описує вплив відносних розмірів заготовки та ступеня деформування на зміну форми та відносних розмірів поковки.

Таблиця 2.3 – Розширена матриця планування математичного експерименту

| № | Кодове позначення | | | Натуральне позначення | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $D_в / d_{ср}$ | $D_у / d_{ср}$ | $\varepsilon$ |
| 1 | –1 | –1 | –1 | 2,5 | 2,05 | 0,1 |
| 2 | 0 | –1 | –1 | 2,4 | 2,05 | 0,1 |
| 3 | +1 | –1 | –1 | 2,3 | 2,05 | 0,1 |
| 4 | –1 | 0 | –1 | 2,5 | 1,85 | 0,1 |
| 5 | 0 | 0 | –1 | 2,4 | 1,85 | 0,1 |
| 6 | +1 | 0 | –1 | 2,3 | 1,85 | 0,1 |
| 7 | –1 | +1 | –1 | 2,5 | 1,65 | 0,1 |
| 8 | 0 | +1 | –1 | 2,4 | 1,65 | 0,1 |
| 9 | +1 | +1 | –1 | 2,3 | 1,65 | 0,1 |
| 10 | –1 | –1 | 0 | 2,5 | 2,05 | 0,2 |
| 11 | 0 | –1 | 0 | 2,4 | 2,05 | 0,2 |
| 12 | +1 | –1 | 0 | 2,3 | 2,05 | 0,2 |
| 13 | –1 | 0 | 0 | 2,5 | 1,85 | 0,2 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 2,4 | 1,85 | 0,2 |
| 15 | +1 | 0 | 0 | 2,3 | 1,85 | 0,2 |
| 16 | –1 | +1 | 0 | 2,5 | 1,65 | 0,2 |
| 17 | 0 | +1 | 0 | 2,4 | 1,65 | 0,2 |
| 18 | +1 | +1 | 0 | 2,3 | 1,65 | 0,2 |
| 19 | –1 | –1 | +1 | 2,5 | 2,05 | 0,3 |
| 20 | 0 | –1 | +1 | 2,4 | 2,05 | 0,3 |
| 21 | +1 | –1 | +1 | 2,3 | 2,05 | 0,3 |
| 22 | –1 | 0 | +1 | 2,5 | 1,85 | 0,3 |
| 23 | 0 | 0 | +1 | 2,4 | 1,85 | 0,3 |
| 24 | +1 | 0 | +1 | 2,3 | 1,85 | 0,3 |
| 25 | –1 | +1 | +1 | 2,5 | 1,65 | 0,3 |
| 26 | 0 | +1 | +1 | 2,4 | 1,65 | 0,3 |
| 27 | +1 | +1 | +1 | 2,3 | 1,65 | 0,3 |

$$\begin{cases} D_{п.в}/d_{п.в} = f\left(D_в/d_{ср}, D_у/d_{ср}, \varepsilon\right) \\ D_{п.у}/d_{п.у} = f\left(D_в/d_{ср}, D_у/d_{ср}, \varepsilon\right) \\ d_{п.в}/d_{п.у} = f\left(D_в/d_{ср}, D_у/d_{ср}, \varepsilon\right) \end{cases}. \qquad (2.17)$$

Отже, для теоретичного дослідження обрано МСЕ, завдяки якому буде розглянуто можливість застосування ступінчастого бойка, встановлені основні режими та схеми деформування, розглянуто напружено-деформований стан та формозміна поковки в залежності від ступеня деформації. Під час експериментальних досліджень будуть проведені опити на свинцевих зразках, за даними яких планується отримати математичну модель, завдяки якій можна отримати відносні розміри поковки. Також буде виконано дослідження на сталевих зразках, для порівняння якості запропонованого способу розкочування, який передбачає використання ступінчастого бойка, та базового способу розкочування.

## Висновки

1. Для теоретичного дослідження обраний метод скінченних елементів, який дозволяє отримувати велику кількість інформації про процеси гарячого деформування, що дозволить обрати параметри заготовки, які впливають на формоутворення поковки та дослідити її НДС.

2. Для аналізу формозміни заготовки під час процесу розкочування був обраний метод моделювання на свинцевих моделях та виконано планування експерименту, завдяки якому було визначено кількість опитів, змінювані показники та параметри відгуку. Моделювання буде виконане згідно з законами подібності, які враховують масштабний та швидкісний фактори.

3. Завдяки експериментальним дослідженням та статистичному аналізу будуть розраховані коефіцієнти регресійних рівнянь для відносного діаметра виступу, відносного діаметра уступу та співвідношення діаметрів отвору з боку виступу та уступу. Регресійні рівняння дозволять визначити параметри заготовки для розкочування.

4. Для аналізу механічних властивостей будуть проведені експерименти на сталевих зразках. Завдяки використанню легованої сталі буде досліджений напрямок волокон вздовж зразка. Через те, що досліджуваний матеріал не буде підданий термічній обробці, механічні властивості будуть визначені шляхом вимірювання твердості по Роквеллу (шкала b), який дозволяє вимірювати твердість на зразках понад 5 мм.

5. Для обробки результатів експерименту обрано повний факторний експеримент, який передбачає отримання поліному другого порядку, що є достатнім для отримання закономірності зміни розмірів поковки від розмірів заготовки та ступеня деформації

## Список використаних джерел

2.1. Markov O. Investigation of the New Technological Process of Forging Large Shafts without Upsetting / O. Markov, V. Oleshko, V. Zligorev // METAL 2012: Proceedings on CD-ROM. – Brno, Czech Republic, 2012. –ISBN 978-80-87294-29-1 Available on Web site : http://www.metal2012.com

2.2. Ingersoll D. T. Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments / D. T. Ingersoll // Handbook of small modular nuclear reactors. – 2015. – №1. – P. 27–60.

2.3. Suzuki K. Manufacturing and material properties of ultra large size forgings for advanced BWRPV / K. Suzuki, I. Sato, H. Tsukada // Nuclear engineering and design – 1994. – №151. – P. 513–522.

2.4 Rao M. N. Materials development for Indian nuclear power program: an industry perspective / M. N. Rao // Energy Procedia – 2011. – № 7. – P. 199–204.

2.5 Теплоустойчивые радиационно-стойкие хромомолибденованадиевые стали марок 15Х2МФА-А мод. А и 15Х2МФА-А мод. Б [Електронний ресурс] // ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» НИЦ «Курчатовский институт». – 2010. – Режим доступу до ресурса: http://www.crism-prometey.ru/science/steel/thermostable-radiation-resistant-steel-15H2MFA.aspx.

2.6. Биба Н. В. Применение программы моделирования процессов ОМД QFORM для обучения и исследовательской работы в университетах / Н. В. Биба, Ю. А. Гладков, О. А. Белокуров // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 9–14.

2.7. Condition of closing voids in solid cylinders during hot forging / C. Zhenshan, R Guangsheng, X. Binqye [et al.] // Tsinghua univ. sci. and tecnol. – 2003. – № 2. – P. 227–229.

2.8. Weides G. Optimization of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation / G. Weides, N. Blaes, D. Bokelmann //

17 International forgemasters meeting, 3–7 November 2008, Santander, – 2008. – P. 212–215.

2.9. Бочаров Ю. А. Второй Европейский семинар по моделированию процессов в обработке давлением / Ю. А. Бочаров, В. И. Балаганский // КШП. ОМД. – 2002. – № 9. – С. 38–41.

2.10. Иванов К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах: учебн. пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : Изд-во ПИМаш, 2000. – 224 с.

2.11. Овчаренко В. А. Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник / В. А. Овчаренко, С. В. Подлєсний, С. М. Зінченко – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 380 с.

2.12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Пер. с англ. / А. А. Шестакова. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

2.13. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. / Под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

2.14. Марков О. Е. Deform – 3d для конечно-элементного моделирования процессов ковки крупных слитков / О. Е. Марков // Инженерные системы – 2011 : междунар. науч.-практич. конф., г. Москва, 5–8 апреля 2011 г. – М. : РУДН, 2011. – С. 30–31.

2.15. Галлагер Р. Х. Метод конечных элементов. Основы. / Р. Х. Галлагер // Пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 482 с.

2.16. Чухлеб В.Л. Основы разработки технологических процессов обработки давлением сталей и сплавов с прогнозируемым уровнем качества металлопродукции / В. Л. Чухлеб, А. Н. Тумко, А. В. Ашкелянец // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – №1. – С. 110–120.

2.17. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Mechanics and advanced technologies. – 2017. – №2. – С. 85–91. – DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575

2.18. Унксов Е. П. Выбор метода расчета технологических процессов при обработке металлов давлением / Е. П. Унксов. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1982. – №8. – С. 24–26.

2.19. Клемешов Е. С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е. С. Клемешов, В. Л. Чухлеб // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – № 35 (1257). – С. 21–24.

2.20. Жбанков Я. Г. Ковка конических обечаек / Я. Г. Жбанков, Л. В. Таган, А. В. Шкира // Научный вестник ДГМА. – 2011. – №2(8Е). – С. 8–14.

2.21. Соколов Л. Н. Распределение деформаций при ковке поковок прямоугольного сечения для схемы протяжки круг-уголок-пластина / Л. Н. Соколов, О. Е. Марков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ, 2001. – С. 341–346.

2.22. Золотухин Н. М. О подобии процессов горячего деформирования металлов / Н. М. Золотухин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1960. – № 3. – С. 1–3.

2.23. Алиев И. С. Исследование процессов ковки бойками выпуклой геометрии с интенсивными пластическими деформациями / И. С. Алиев, М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев // Вісник НТУУ «КПІ». Секція машинобудування. – 2015. – № 75. – С. 125–130.

2.24. Tolkushkin A. Development and computer modeling of a new forging technology of forgings such as slabs and plates / A. Tolkushkin, E. Panin, V. Talmazan // Journal of chemical technology and metallurgy. – 2016. – № 51 (4). – P. 443–450.

2.25. Дослідження процесів кування пустотілих поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, А. О. Шарун, М. С. Косілов, К. В. Орлик // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей МНТК молодих учених та студентів, Тернопіль, 17–18 листоп. – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – С. 267–269.

2.26. Думанский И. О. Измерение твердости металлов и сплавов: метод. указания к выполнению лаб. работы по материаловедению /сост.: И. О. Думанский, В. М. Александров, В. Л. Сытин. – Архангельск: САФУ, 2013. – 18 с.

2.27 Структурний аналіз металів: Металографія. Фрактографія / О. М. Бялік, С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук, В. С. Черненко.– К.: Політехніка, 2006. – 328 с.

2.28. Уменьшение металлоемкости сложнопрофилированных полых изделий, получаемых ковкой / И. А. Грачев, В. Н. Злыгорев, Я. М. Чикота, Я. Г. Жбанков // Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2 (39). – С. 75–80.

2.29 Грищук Ю. С. Основи наукових досліджень: Навч. посібник. / Ю. С. Грищук – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 232 с.

2.30. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Мн. : Издво БГУ им. В. И. Ленина, 1982. – 302 с.

2.31. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с., ил.

2.32. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.

2.33. Кононюк А. Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента) / А. Е. Кононюк – В 4-х кн. – К.1. – К.: 2011. – 508 с.

# 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕНЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ

## 3.1 Моделювання процесу розкочування пустотілої поковки МСЕ

На сьогодні Україна має значний попит та потенціал для виготовлення продукції енергетичного машинобудування. Частка машинобудівних підприємств мають можливість виготовляти продукцію саме для АЕС. В даний час вітчизняні підприємства зацікавлені у розширені номенклатури продукції, у тому числі енергетичного спрямування. Впровадження нових енерго- та ресурсозаощаджувальних процесів є основним їх завданням та можливістю стабільно працювати в сучасних економічних умовах. Перспективи дешевшого виробництва продукції енергетичного машинобудування високої якості відкривають для них міжнародні ринки збуту.

Огляд літературних джерел дозволив виявити, що існує потреба у виготовленні обичайок зі змінною товщиною стінки. Кування поковок простої форми з подальшою механічною обробкою для отримання подібних виробів суттєво збільшує їх ціну, через те що залучена значна кількість ресурсів. Щодо цього у машинобудуванні все частіше використовуються нестандартні технологічні схеми кування, які полягають у застосуванні нових режимів деформування та використанні складних інструментів, завдяки яким форма поковки максимально наближується до форми потрібної деталі. Це дозволяє суттєво знизити матеріальні витрати пов’язані з використанням обладнання для механічної обробки.

Однак впровадження нового технологічного процесу у виробництво без вивчення механізму формоутворення та деформованого стану у процесі термомеханічної обробки може призвести до отримання браку. Задля отримання заданої форми та якості необхідно провести теоретичні розрахунки, використовуючи сучасні методи та програмне забезпечення.

Для вивчення особливостей формозміни та деформованого стану процесу розкочування пустотілої поковки зі змінним поперечним перерізом було обране програмне забезпечення DEFORM–3D, яке засновано на МСЕ.

Математичне моделювання процесів кування застосовується для аналізу формозміни, виникнення дефектів, визначення необхідної сили деформування, енергії деформування та ін. Моделювання базується на тому, що метал тече в напрямку найменшого опору. Крім того, за допомогою моделювання можна визначити такі важливі параметри заготовки, як інтенсивність деформації, напруження, температура, напрям волокон заготовки, можливість руйнування заготовки, зношування інструменту. Математичне моделювання в наш час є найбільш універсальним, загальним і поширеним методом моделювання [3.1].

Методика отримання пустотілої поковки за допомогою МСЕ включає моделювання процесу розкочування заготовок за допомогою оснастки різної форми. Геометрія для моделювання процесу створювалася в системі тривимірного проектування Компас 3D (ліцензія ДДМА). Форма заготовок змінювалась шляхом збільшення або зменшення розмірів, додаванням технологічних напусків. Моделі зберігалися у форматі «.stl». Далі за допомогою компонента «Pre Processor» програмного пакета DeForm 3D додавалися усі елементи зборки, задавалися граничні умови деформування. При введенні граничних умов у вигляді швидкостей руху деформувального інструменту, механічних властивостей матеріалу заготовки та коефіцієнтів тертя на поверхнях інструменту та заготовки. Тертя між інструментом та заготовкою завдавалося коефіцієнтом по закону Зібеля, який враховує високі контактні напруження та підходить для процесів кування [3.2, 3.3]. Визначення кроку рішення задавалося за методикою описаною у [3.4]. Далі запускався автоматичний розрахунок в програмному пакеті DeForm 3D.

Граничні умови мали наступні параметри:

початкова температура заготовки – 1200˚С,

кількість елементів сітки – 80000 шт,

швидкість переміщення головного інструменту – 40 мм/с,

температура бойка та дорна – 100 ˚С,

коефіцієнт тертя по Зібелю – 0,7.

Для моделювання був обраний дорн діаметром Ø1240 мм. Бойки для розкочування моделювалися спираючись на форму та розміри поковки. Ескізи бойків представлені на рисунку 3.1. Позиціювання задавалося вручну переміщенням об’єктів моделювання на певні відстані. Після задання граничних умов проводилося моделювання процесу розкочування.

Моделювання проводилося за двома схемами: перша – з одночасним деформуванням виступу та уступу на початковій стадії (рис. 3.2, а), друга – з деформування виступу на початковій стадії (рис. 3.2, б). За одне коло кожне натискання складало 60 мм. На останньому колі розкочування відбувалося до необхідного розміру, тому хід бойка складав менше, ніж 60 мм. Відстань між інструментами вказувалася у вікні «Параметри процесу», розділ «Зупинка», вкладка «Відстань між інструментами» шляхом вводу координат. Після одного натиску верхнього бойка, заготовка поверталася і виконувалося наступне натискання. Ці дії повторювалися, поки не була досягнута необхідна відстань між інструментами, яка відповідає товщині стінки поковки та необхідному ступеню деформації.

Моделювання ковальських процесів за допомогою МСЕ є реальною альтернативою експериментальному дослідженню і може бути досить ефективним способом вивчення процесів кування та вирішення поставлених завдань. Крім того, даний метод має високу точність при оцінюванні параметрів НДС, в тому числі і для процесів гарячого пластичного деформування, про що свідчать численні роботи [3.5 – 3.9]. Не зважаючи на це, МСЕ є теоретичним методом і вимагає експериментальної верифікації отриманих результатів з метою перевірки задавання граничних умов при виконанні моделювання [3.10].

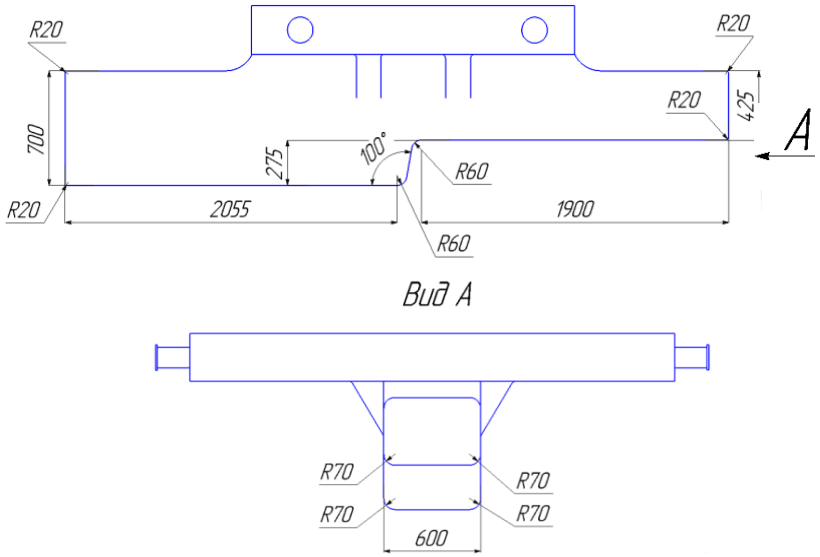
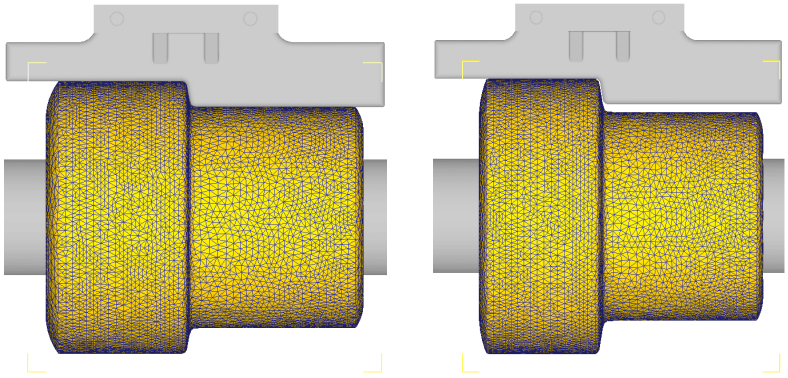



Рисунок 3.1 – Ескіз бойка, який використовувалися для моделювання



а) б)

Рисунок 3.2 – Схеми з одночасним розкочуванням виступу та уступу на початковій стадії (а) та з розкочуванням виступу на початковій стадії (б)

## 3.2 Аналіз формоутворення поковки при одночасному деформуванні виступу та уступу на початковій стадії розкочування

Дослідження формоутворення полягає у застосуванні бойка, конструкція якого дозволяє одночасно деформувати виступ та уступ протягом всього процесу розкочування. Особливістю процесу є те, що робоча поверхня бойка (див. рис. 3.1) повторює зовнішню поверхню заготовки (рис. 3.3). Різниця між діаметрами виступу та уступу дорівнює величині сходинки на бойку і складає 275 мм. Відносний діаметр виступу заготовки складає 2,3, а уступу – 1,87. В

даному моделюванні не врахована конусність, яка залишається після кування заготовки на оправці [3.11].

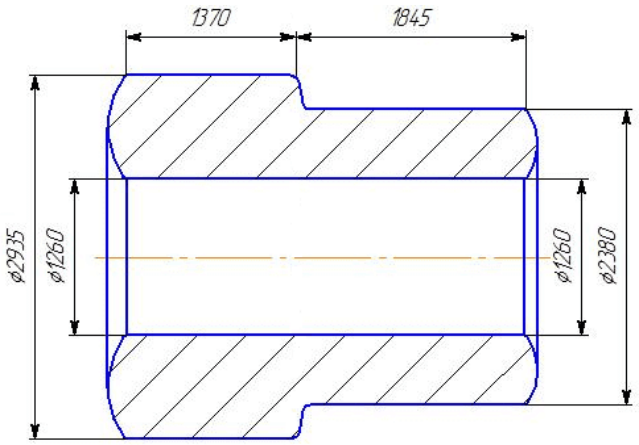
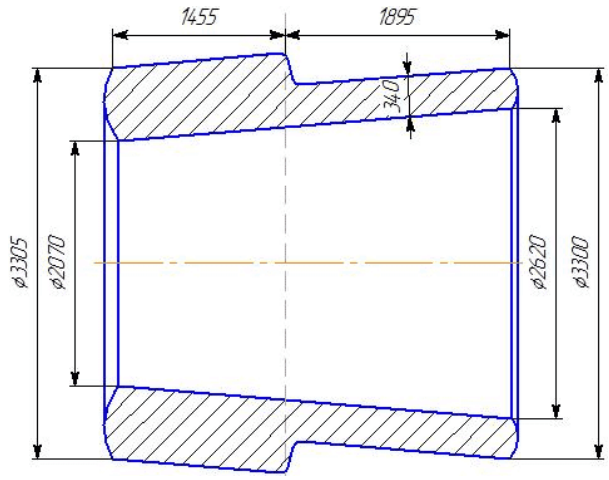


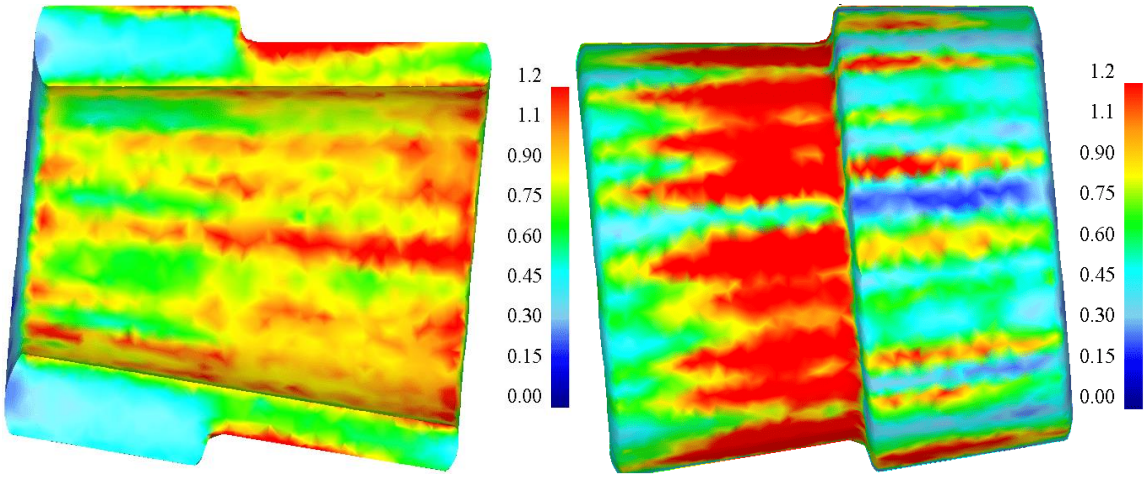

Рисунок 3.3 –Ескіз заготовки для моделювання процесу розкочування

Результати моделювання вказують на те, що при одночасному деформуванні виступу та уступу, з боку уступу формується більший діаметр отвору, ніж з боку виступу (рис. 3.4, а). За такої умови ступінь деформації в уступі більший, ніж у виступі (рис. 3.4, б, в). В уступі найбільші деформації зосереджені на поверхні контакту заготовки з інструментами. У виступі деформації найменші, що вказує на слабке його пророблення. Різний ступінь деформації можна пояснити різною товщиною стінки. При однаковому натисканні на виступ та уступ, тонша стінка уступу більше деформується, ніж стінка виступу. З результатів моделювання можна встановити, що найбільші деформації сконцентровані у місці переходу виступа в уступ. Отримана поковка після ступеня деформації уступу 0,38 має конусність, яка згідно формули 2.7 дорівнює 1:7 (0,167). Впродовж всього процесу розкочування конусність постійно збільшується (рис. 3.5) через те, що діаметри отвору з боку уступу та виступу змінюються не рівномірно [3.12].

Згідно формули 2.7 на конусність впливають діаметри отвору з боку уступу та виступу та довжина заготовки. Впродовж розкочування довжина заготовки суттєво не змінювалася, отже її вплив незначний. З огляду на це необхідно встановити закономірність зміни діаметрів, які при розкочуванні суттєво змінюються.




а)




б) в)

Рисунок 3.4 – Ескіз (а) та деформований стан поковки (б, в)

Зміну діаметрів отвору з боку виступу $d_в$ та уступу $d_у$ можна розрахувати з формул об’єму циліндру з отвором (3.1) та товщини стінки (3.2)

$$V=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)\times H, \tag{3.1}$$

$$S=\frac{D-d}{2}, \tag{3.2}$$

де $V$ – об’єм циліндру з отвором;

$D$ – зовнішній діаметр циліндру;

$d$ – внутрішній діаметр циліндру;

$H$ – довжина циліндру;

$S$ – товщина стінки циліндру.

Виразивши з формули товщини стінки (3.2) зовнішній діаметр $D$ та підставивши у формулу об’єму (3.1), отримуємо рівняння

$$V=\frac{\pi}{4}((2S+d)^2-d^2)\times H\ . \qquad (3.3)$$

З отриманої формули 3.3 виражаємо діаметр отвору

$$d_i=\frac{V}{\pi\times H_i\times S_i}-S_i\ , \qquad (3.4)$$

де $d_i$ – діаметр для поточного кола;

$H_i$ – довжина поковки для поточного кола з урахуванням розширення;

$S_i$ – поточна товщина стінки.

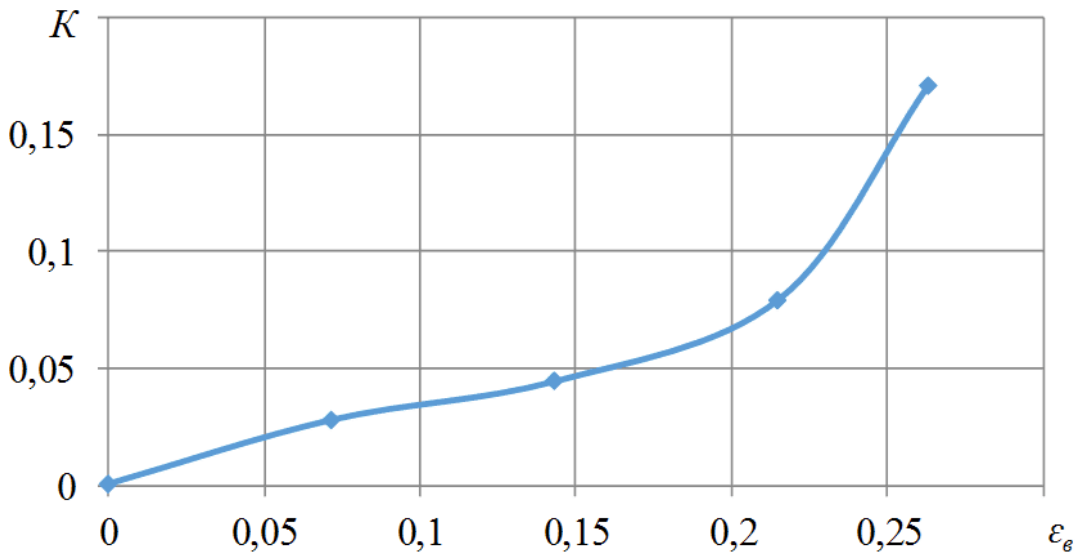



Рисунок 3.5 – Закономірність виникнення конусності $K$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$

Підставивши в отриману формулу 3.4 розміри виступу та уступу вихідної та розкоченої заготовки, отримуємо закономірність зміни відносного діаметра отвору з боку виступу $d_{п.в}/L_п$ та уступу $d_{п.у}/L_п$ від ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ (рис. 3.6). Результати розрахунків вказують на те, що

відносні діаметри виступу та уступу змінюються майже по лінійним закономірностям, причому після перших обтискань відносний діаметр отвору з боку уступу починає збільшуватися інтенсивніше, ніж відносний діаметр отвору з боку виступу. За такої умови довжина уступу значно не збільшується. Через інтенсивніше збільшення діаметру з боку уступу після кожного кола збільшується різниця між діаметрами, через що збільшується і конусність. Це пояснюється різними ступенями деформації, що виникають у виступі та уступі.

За допомогою інструментів DEFORM-3D були отримані дані ступенів деформації (Strain Effective) у виступі та в уступі під час кожного кола розкочування (рис. 3.7). Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що ступінь деформації в уступі більший, ніж у виступі, і водночас збільшується інтенсивніше після кожного кола розкочування, що спричиняє інтенсивніше збільшення діаметру отвору з боку уступу. Це пояснюється різною товщиною стінок виступу та уступу через те, що виступ та уступ деформуються з однаковим натисканням під час кожного кола розкочування, а стінки різні, супіні деформації виступу та уступу різні. При однаковій величині натискання у більш товстої стінки відносний ступінь деформації менший [3.13].

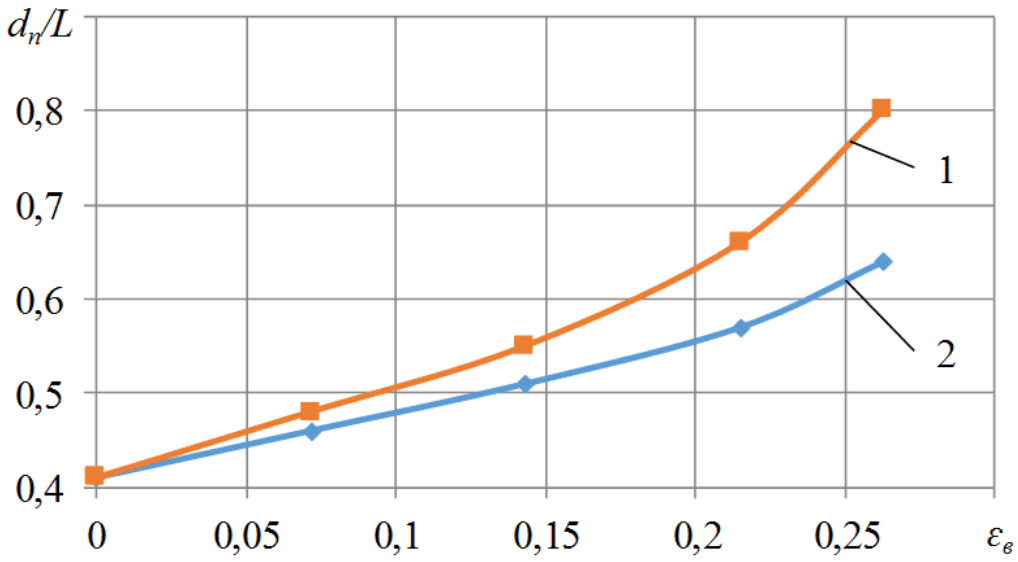



Рисунок 3.6 – Закономірність зміни відносних діаметрів отвору $d_п/L$ для уступу (1) та для виступу (2) в залежності від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$

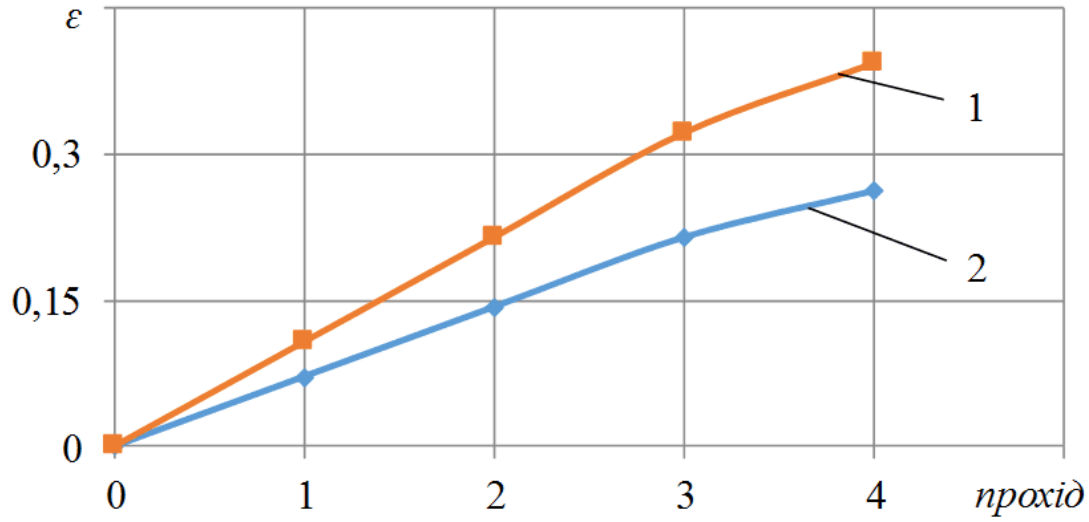


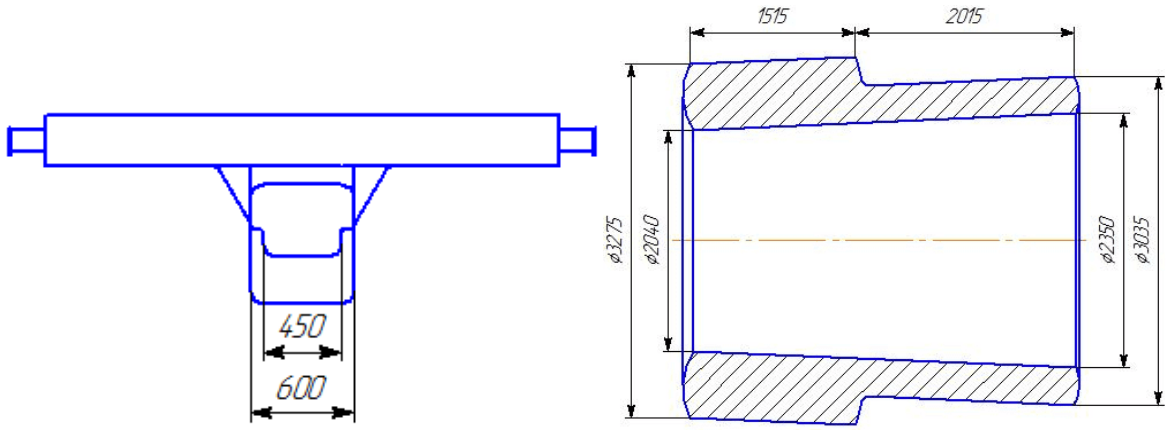

Рисунок 3.7 – Закономірність зміни відносного ступеня деформації $\varepsilon$ у виступі (1) та в уступі (2) в процесі розкочування

Отже, при одночасному розкочуванні виступу та уступу через більший ступінь деформації уступу інтенсивніше збільшується діаметр отвору з боку уступу, і поковка приймає конусну форму. З цього можна зробити висновок, що при розкочуванні заготовок зі змінною товщиною стінок ступінчастим інструментом утворюється конусна форма поковки через різний деформований стан виступу та уступу.

### 3.3 Способи зменшення конусності при одночасному деформуванні виступу та уступу на початковій стадії розкочування

В роботі [3.14] вказано, що для інтенсивнішого збільшення діаметру під час розкочування без значного збільшення довжини необхідно застосовувати вузький бойок. Спираючись на представлені дослідження, було вирішено розкочувати заготовку ступінчастим бойком з різною шириною деформувальних частин (рис. 3.8, а). Аналіз результатів моделювання дозволив встановити, що зменшення ширини частини, яка деформує виступ, призводить до зменшення різниці між діаметрами отвору з боку виступу та уступу, а, отже, до зменшення конусності, яка в даному випадку дорівнює 1:12 (0,087). При чому суттєве зменшення відносного діаметра отвору

виникає з боку уступу і дорівнює 0,12 (270 мм), а з боку виступу – на 0,04 (30 мм), крім того довжини виступу та уступу збільшилися на 4% та на 6% відповідно (рис. 3.8, б). Розкочування виконувалося до відстані між інструментами 340 мм. Це вказує на суттєву зміну режиму деформування при зміні ширини робочої поверхні бойка, що призводить навпаки до значного збільшення довжини поковки. Метал більше плине вздовж осі, ніж у тангенціальному напрямку, що призводить до суттєвого зменшення діаметрів. Отже, можна підсумувати, що даний спосіб хоч і призводить до зменшення конусності, проте суттєво змінює напрямок течії металу, що призводить до зменшення діаметральних розмірів, його не можна застосовувати через необхідність застосування більшої кількості металу для отримання потрібних діаметрів.

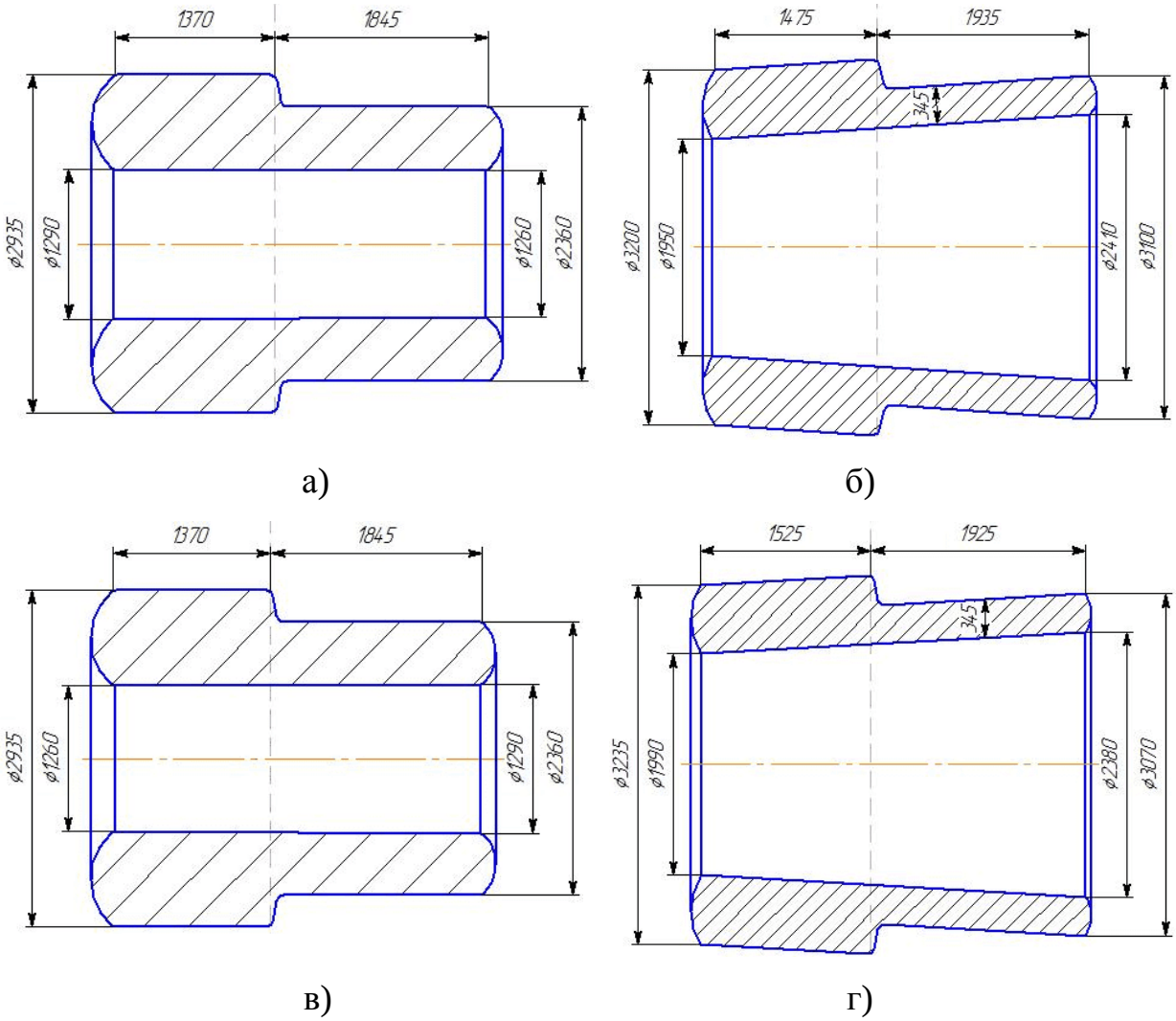



а) б)

Рисунок 3.8 – Ступінчастий бойок для розкочування з різною шириною робочих поверхонь (а) та поковка (б)

Заготовку з виступом необхідно отримувати протягуванням на оправці. Як відомо оправки для протягування виготовляються з конусною поверхнею для легшого зняття заготовки [3.15]. Стандартний ряд конусності для оправок 1:80, 1:100, 1:120. Виходячи з цього, необхідно встановити – яким чином конусність отвору заготовки впливає на результат розкочування. Для моделювання застосована конусність 1:120, щоб якомога

більше знизити вплив перерозподілу металу і у такий спосіб, зміну об’ємів виступу та уступу. Заготовку з виступом краще отримувати, розмістивши виступ з боку меншого діаметра оправки, а уступ отримувати куванням від середини до бурта (рис. 3.9). У такий спосіб оправка не буде закована у заготовку, об’єм виступу збільшиться, а уступу зменшиться. Однак в нашому випадку буде розкатана поковка і зі зворотнім розташуванням конусності, тобто виступ зі сторони бурта оправки. Розворот конусності внутрішнього діаметра заготовки призводить до зміни об’ємів виступу та уступу.




а) б)

в) г)

Рисунок 3.9 – Заготовки (а, в) та поковки (б, г) отримані після розкочування

За результатами моделювання було встановлено, що при розташуванні виступу з боку меншого діаметра оправки уступ після розкочування має значно менші діаметри (на 8% або 210 мм) та більшу довжину (на 2% або 40 мм), що виникає через більший об’єм уступу та зміну товщину стінки, через конусний отвір. При чому виступ збільшується у довжині (на 1% або 20мм) та зменшується у діаметрі (на 6% або 120 мм), тому що об’єм виступу зменшився. Конусність склала 0,13 (1:7,5). За результатами моделювання розкочування поковки зі зворотною конусністю було встановлено, що при розташуванні виступу з боку бурта оправки уступ після розкочування має ще менші діаметри (на 9% або 240 мм). За такої умови довжина збільшилася майже на таку ж величину (на 1,5% або 30 мм), що виникає завдяки зменшеному об’єму уступу, через розворот конусності отвору. При чому виступ збільшується у довжині на 70 мм (5%) та зменшується у діаметрі (на 4% або 80 мм), що пояснюється збільшенням об’єму виступу.

Отже, порівнюючи розмірів поковок, отриманих з заготовок з циліндричним отвором (див. рис. 3.1) та з конусним (див. рис. 3.9), можна відзначити, що отримані діаметри поковки в другому випадку менші, а загальна довжина більша. Можна зробити висновок, що потрібно враховувати розташування уступу заготовки на оправці, тому що конусність впливає на розподіл об’єму виступу та уступу заготовки.

Зважаючи на те, що виступ і уступ в процесі розкочування отримують різний ступінь деформації, що призводить до утворення більшого діаметру отвору з боку уступу, необхідно створити умови, завдяки яким відносний діаметр отвору з боку уступу буде рівним відносному діаметру отвору з боку виступу. Такі умови можна створити, додавши технологічний напуск з боку виступу або уступу, який буде протидіяти збільшенню діаметру отвору з боку уступу. Як було встановлено, через більший ступінь деформації діаметр отвору з боку уступу збільшується інтенсивніше та у підсумку є більшим, ніж діаметр отвору з боку виступу. Також було встановлено, що ступінь деформації за одне коло, а в підсумку, і сумарна деформація, залежать від

товщини стінки заготовки. З огляду на це, напуск з боку виступу буде рівний товщині стінки уступу, а з боку уступу – товщині стінки виступу.

За результатами моделювання процесу розкочування заготовки з напуском з боку виступу (рис. 3.10, а) було встановлено, що відносний діаметр отвору з боку уступу (рис. 3.10, б) зменшився, в порівнянні з результатом першої моделі (див. рис. 3.2, а), на 0,11 (340 мм). Однак збільшилася довжина уступу, що говорить про більший плин металу уздовж осі поковки, ніж у тангенціальному напрямку. Виступ зберігає свою довжину завдяки формі інструменту, яка повторює профіль виступу (рис. 3.10, в). Конусність поковки в даному випадку складає 1:20 (0,05), що значно менше, ніж під час моделювання без напуску (див. рис. 3.2, а). Можливо, завдяки більшій довжині або діаметру напуску конусність поковки стала б ще менша. Суттєвим недоліком способу є те, що під час розкочування у бойок запресовується заготовка.

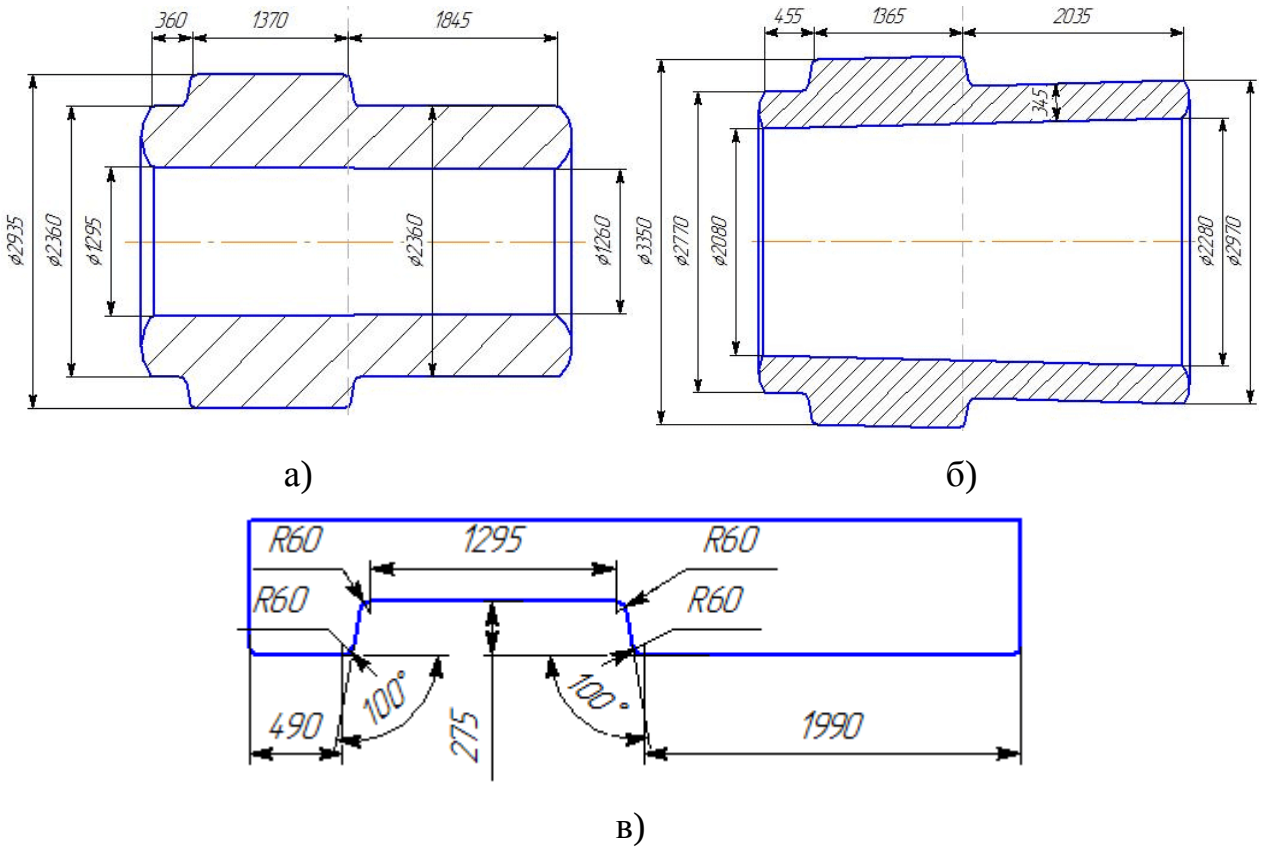
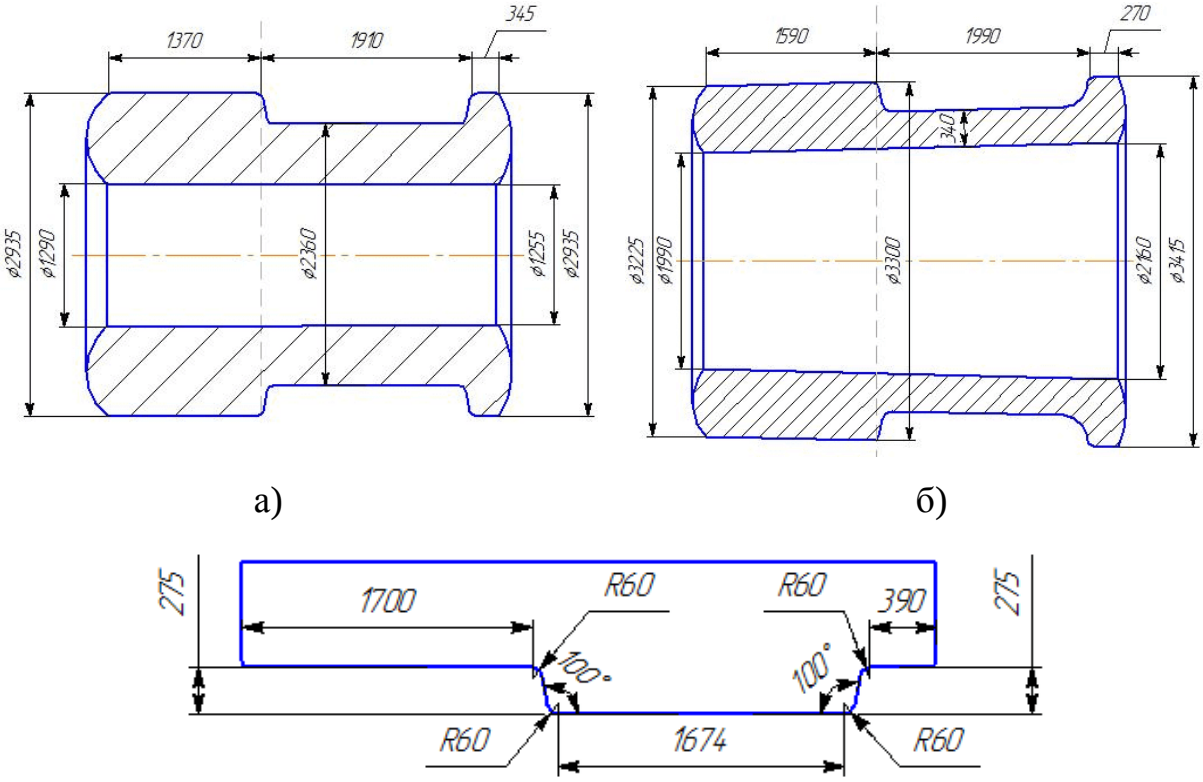



Рисунок 3.10 – Заготовка з напуском (а), поковка (б) отримана після розкочування та ескіз бойка з розмірами робочої поверхні (в)

За результатами моделювання було встановлено, що при кожному натисканні бойок повністю не контактує з виступом заготовки, а торкається лише боковими поверхнями. Через це подальше натискання може призводити до запресовування виступу заготовки у профіль бойка. Неповне прилягання спостерігається вже після першого кола обтискань. Через запресовування заготовки у бойок можуть виникнути затиски, а через великі сили тертя поверхня бойка буде швидше зношуватися та руйнуватися. Уникнути цієї ситуації допоможе збільшення кутів нахилу бойка.

За результатами моделювання процесу розкочування заготовки з напуском з боку уступу (рис. 3.11) було встановлено, що відносний діаметр з боку уступу зменшений на 0,18 (460 мм) в порівнянні з моделюванням без напуску (див. рис. 3.7, а). Конусність поковки склала 1:25 (0,04), що менше, ніж при розкочуванні заготовки з напуском з боку виступу.




а) б)

в)

Рисунок 3.11 – Заготовка з напуском (а), поковка (б) отримана після розкочування та ескіз бойка з розмірами робочої поверхні (в)

Встановлено, що в даному випадку внутрішній діаметр отвору набагато менший, ніж результати першого моделювання. Це пояснюється тим, що метал більше плине уздовж осі, ніж у тангенціальному напрямку, водночас довжина виступу збільшилася на 16%. В порівнянні з попередньою схемою відсутній закритий контур, який перешкоджатиме розширенню виступу. Навпаки, дана схема більш відкрита. Наявність напуску, який стримує збільшення діаметрального розміру з боку уступу, та частини бойка, що деформує уступ, викликають більшу течію уздовж осі. Це стало причиною того, що отриманий внутрішній діаметр з боку виступу став менший на 80 мм (4%). Розв'язання цієї задачі полягає у збільшенні зовнішнього діаметра виступу заготовки, для того щоб збільшити діаметр поковки, і одночасному зменшенні його довжини, щоб отримати необхідну довжину поковки. Також потрібно збільшити діаметр та довжини напуску, для створення більшої симетрії, щоб діаметр уступу зменшувався менш інтенсивно.

Додавання напусків призводить до використання додаткової кількості матеріалу і до додаткових операцій, пов'язаних з отриманням деталі, що веде до збільшення собівартості виготовлення. Однак, якщо поєднувати у наведених схемах розкочування виготовлення декількох деталей, то витрати можна значно скоротити. У свою чергу, збільшення загальної довжини поковки призводить до збільшення робочої поверхні дорна, на якому буде виконуватись розкочування, що може призвести до прогинання дорна та його руйнування. Особливо це важливо на прикінцевих колах розкочування, коли товщина стінки зменшена, а абсолютна деформація така ж як, на попередніх. Зменшення товщини стінки призводить до збільшення ступеня деформації за коло, а разом з цим, і до збільшення зусилля, яке приймає дорн. Тому рекомендується під час розкочування змінювати дорн на більший за діаметром.

Аналіз одночасного розкочування виступу та уступу заготовки встановив, що отримана поковка має велику конусність 1:6 (0,16) через те, що уступ під час розкочування отримує більший ступінь деформації, ніж виступ.

Напрям конусності отвору заготовки впливає на розміри та конусність поковки через змінення об’ємів виступу та уступу заготовки. Для зменшення величини конусності було запропоновано ввести технологічні напуски з боку виступу та уступу. Напуск з боку уступу призводить до збільшення довжини поковки та до зменшення діаметрів. Напуск з боку виступу більше сприяє тангенціальній течії металу і є більш дієвим для регулювання конусності, вирівнюючи діаметри з обох боків поковки, зменшуючи у такий спосіб конусність.

Отже, можна зробити висновок, що для усунення конусності при одночасному розкочуванні виступу та уступу теоретично можна застосовувати додаткові напуски з одного з боків поковки. Літературний огляд виявив, що подібні схеми були запропоновані раніше, але через складність прогнозування течії металу та відсутність засобів розрахунку не були детально розглянуті та застосовані [3.16, 3.17]. Використання подібних схем деформування вимагає застосування профільованого інструменту. В перспективі можна отримувати деталі з більш складною формою зовнішньої поверхні, що є перспективним напрямком в машинобудування.

### 3.4 Аналіз формоутворення поковки при деформуванні виступу на початковій стадії розкочування

Аналіз результатів моделювання при одночасному розкочуванні виступу та уступу заготовки дозволив встановити, що через більший ступінь деформації в уступі виникає конусна поковка з більшим діаметром отвору з боку уступу. Спираючись на це, необхідно створити умови, завдяки яким виступ та уступ будуть отримувати однакову сумарну деформацію. Через це заготовка для розкочування буде відрізнятися від попередньої (п. 3.1) тим, що діаметр уступу менший (рис. 3.12) і на початковій стадії розкочування між бойком та уступом заготовки є зазор, який виникає через більшу різницю між відносними діаметрами виступу та уступу, яка складає 0,58. В попередньому випадку ця різниця складала 0,43. Це призведе до того, що на

початковій стадії розкочування буде деформується виступ, а потім виступ та уступ одночасно, а ступінь деформації уступу буде менший, ніж в попередньому моделюванні. У цьому разі за перше коло обтискань уступ не деформується.

За результатами моделювання було встановлено, що за перше коло розкочування деформується лише виступ та утворюється поковка конусної форми, однак отвір має циліндричну ділянку (рис. 3.13, а), довжина якої приблизно 500 мм. Її виникнення пояснюється тим, що при натисканні ця частина упирається у дорн, тобто відбувається деформування заготовки по внутрішній поверхні. На другому колі обтискань (рис. 3.13, б) починається деформування уступу і вигин зникає. Також встановлено, що виступ більший за довжиною, ніж уступ. За результатами моделювання встановлено, що після другого кола розкочування деформації у виступі більші, ніж в уступі, при чому найбільші деформації виникають на зовнішній поверхні виступу.

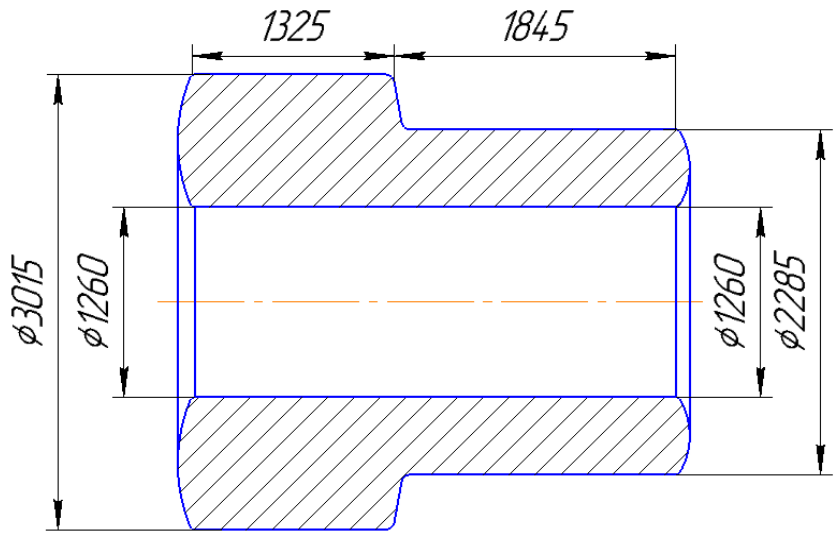
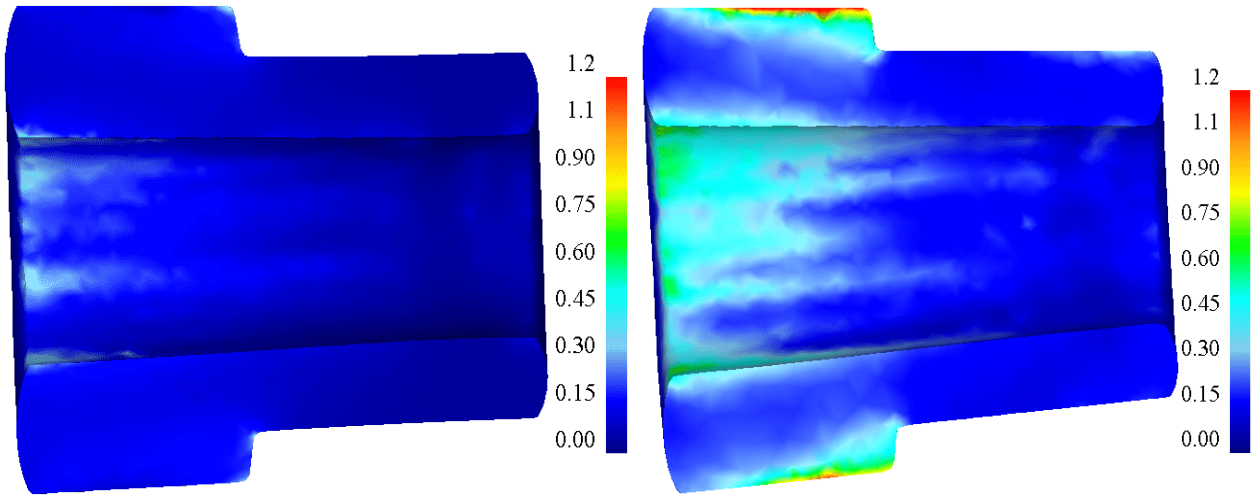



Рисунок 3.12 – Ескіз заготовки для моделювання процесу розкочування

Зменшення діаметра уступу призвело до того, що в ньому утворюється менший ступінь деформації через те, що він деформується пізніше. Через це уступу утворюється різниця між діаметрами отвору виступу та уступу.

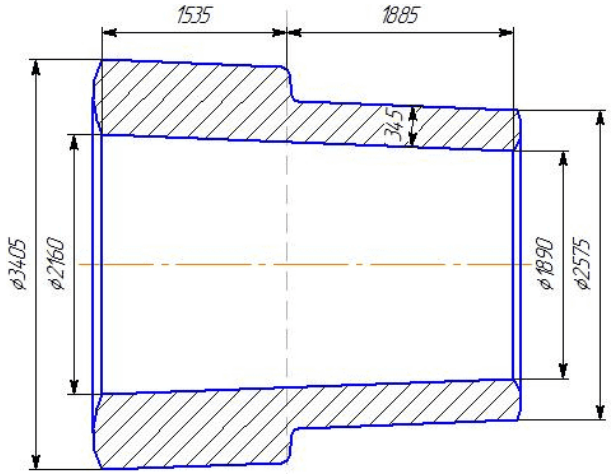



а) б)

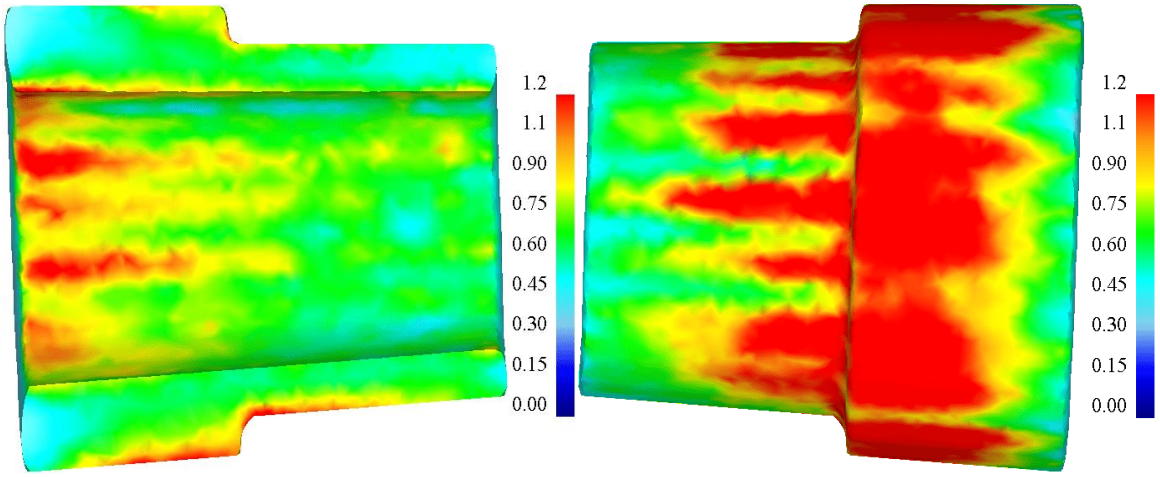
Рисунок 3.13 – Напружено деформований стан поковки після проходу першого кола (а) та після проходу другого кола (б)

Остаточна форма поковки (рис. 3.14, а) конусна, і дорівнює 1:13 (0,078). На відміну від попереднього моделювання коли виступ та уступ деформувалися одночасно з початкової стадії процесу розкочування поковка має зворотну конусність, тобто з більшим діаметром з боку виступу. Проте найбільші деформації зосереджені в місті переходу виступу на уступ на поверхні контакту бойка з заготовкою (рис. 3.14, б), чому сприяло збільшення різниці між діаметрами виступу та уступу. Деформований стан поковки по перерізу більш рівномірний, ніж в попередньому випадку (див. рис. 3.4, б, в).

Аналіз даних виникнення конусності в процесі розкочування (рис. 3.15) дозволив встановити, що на початковій стадії розкочування конусність зростає, що пов’язано з деформуванням виступу. При подальшому розкочуванні конусність зменшується, що пояснюється початком деформування уступу, і настає випадок, коли виступ та уступ деформуються одночасно. Як було встановлено раніше, при одночасному розкочуванні виступу та уступу, уступ отримує більший ступінь деформації за одне коло розкочування, ніж виступ і, як наслідок, більшу сумарну деформацію. Але конусність не зникає повністю тому, що уступ отримує менший сумарний ступінь деформації, ніж виступ [3.18].




а)




б) в)

Рисунок 3.14 – Ескіз (а) та деформований стан поковки (б, в)

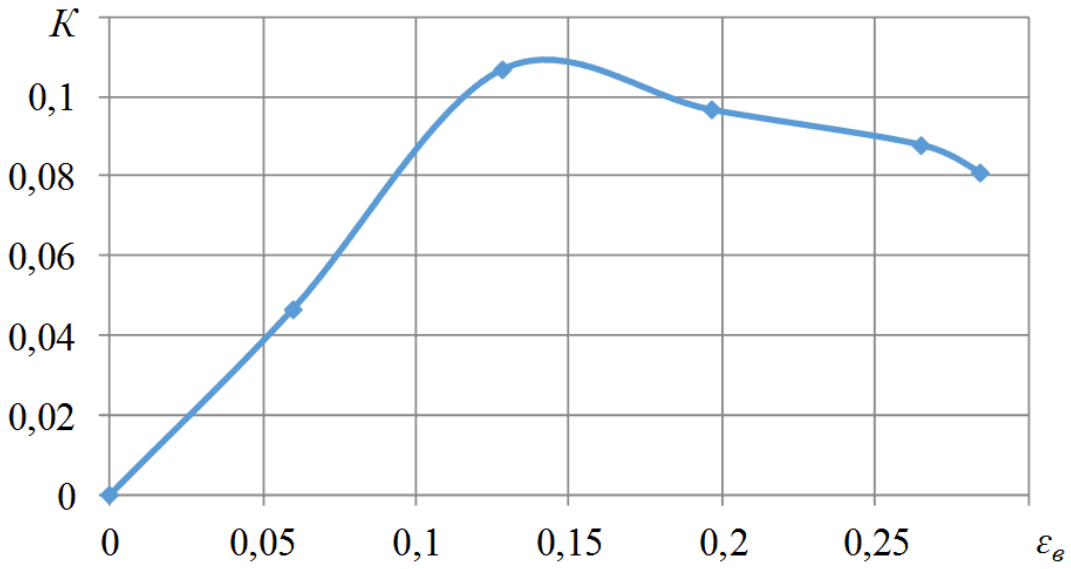



Рисунок 3.15 – Закономірність виникнення конусності $K$ від відносного ступеня деформації виступа $\varepsilon_в$

Аналіз результатів зміни внутрішніх діаметрів поковки з боку виступу та уступу від ступеня деформації виступу дозволив встановити, що на початковій стадії, при степені деформації виступу $\varepsilon_в$<0,1, діаметр отвору з боку виступу $d_в$ зростає, а діаметр отвору з боку уступу $d_{п.у}$ не змінюється, тому що уступ не деформується. Далі починається поступове збільшення $d_{п.у}$, яке пов'язане з початком деформуванням уступу, причому збільшення $d_{п.у}$ протікає паралельно зі збільшенням $d_{п.в}$. Це пов'язане з тим, що різниця між сумарними деформаціями виступу та уступу була однакова. На кінцевій стадії розкочування зростання $d_{п.у}$ більше, ніж $d_{п.в}$, відстань між лініями зменшилася (рис. 3.16). Це пов'язано з тим, що на останньому колі розкочування збільшення ступеня деформації уступу було більше, ніж виступу.

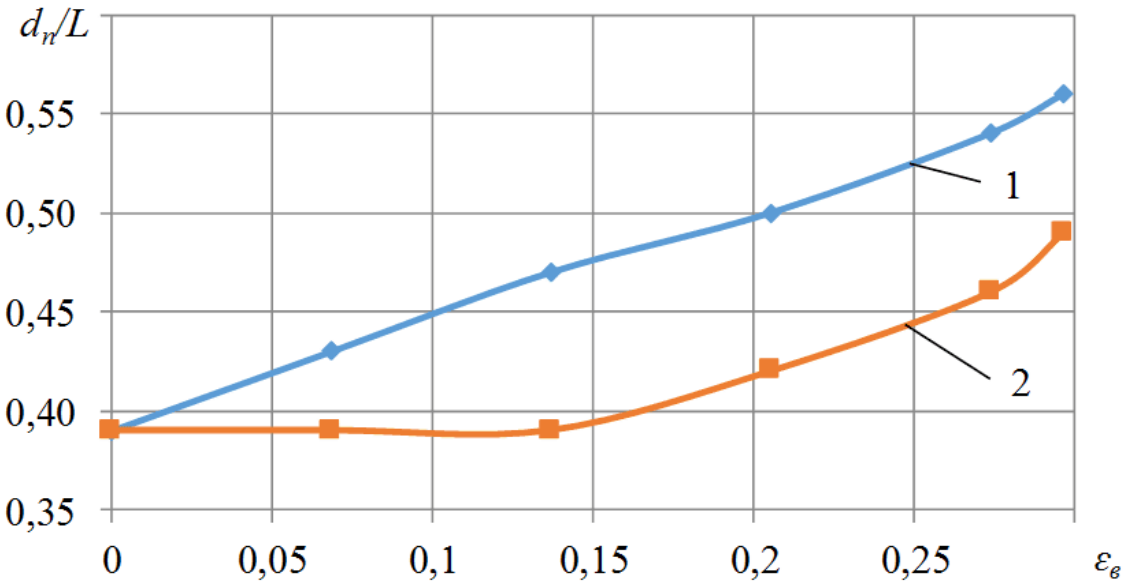



Рисунок 3.16 – Закономірність зміни відносних діаметрів отвору $d_п/L$ для виступу (1) та для уступу (2) в залежності від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$

Аналіз даних ступеня деформації в процесі розкочування (рис. 3.17) дозволив встановити, що під час всього процесу розкочування на кожному колі розкочування деформація у виступі більша, ніж в уступі. Зростання ступеня деформації уступу на першому колі розкочування пов'язане з розтягувальними тангенціальними напруженнями, які виникають під час розкочування виступу.

При подальшому розкочуванні ступінь деформації у виступі постійно більший, ніж в уступі, що пов’язано з розкочуванням на початковій стадії тільки виступу. У такий спосіб, при розкочуванні уступу виступ вже має ступінь деформації.

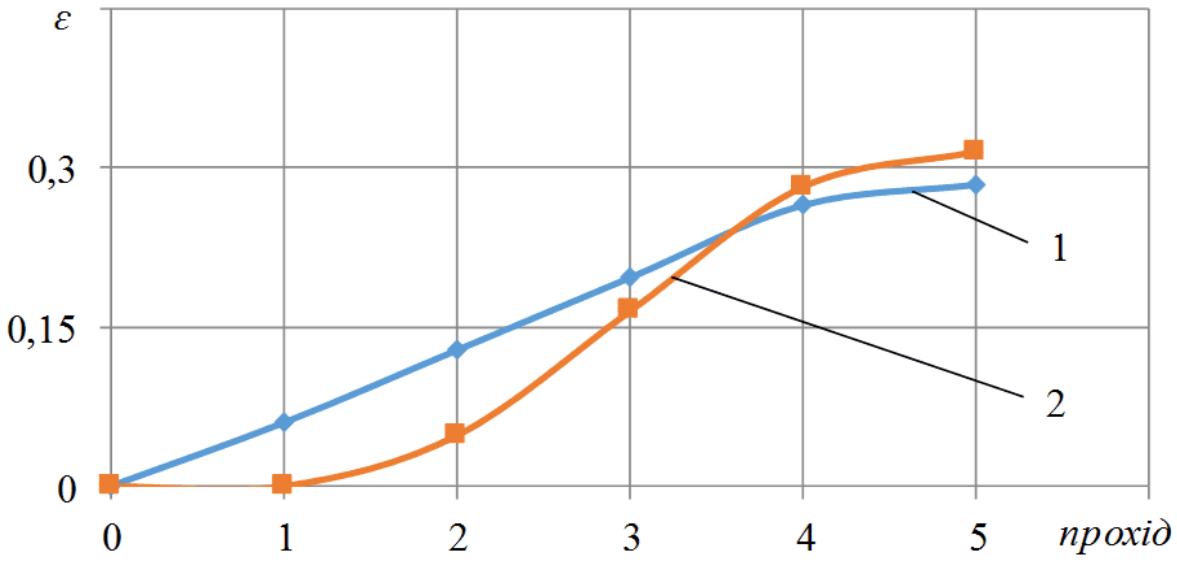



Рисунок 3.17 – Закономірність зміни відносного ступеня деформації $\varepsilon$ у виступі (1) та в уступі (2) в процесі розкочування

Отже, можна зробити висновок, що для досягнення мінімального значення конусності необхідно збільшити деформацію уступу. Це призведе до того, що уступ почне деформуватися раніше та, як наслідок, отримає більший ступінь деформації.

Для зменшення конусності необхідно збільшити об’єм уступу, буде зроблено шляхом введення технологічного ступінчастого напуску на відстані 830 мм від лінії переходу з виступу на уступ (рис. 3.18, а). Отже, сумарна деформація з боку уступу збільшиться, що призведе до інтенсивнішого збільшення діаметру отвору з боку уступу.

За результатами досліджень було встановлено, що для отримання поковки з мінімальним збільшенням довжини та мінімальною конусністю необхідно зменшити довжину виступу на 3%, а мінімальний діаметр уступу збільшити на 3% (75 мм). До того ж була врахована конусність отвору, яка залишається після протягування на оправці, при чому виступ розташований з

боку бурта оправки. Результати моделювання дозволили встановити, що при розкочуванні до відстані між інструментами 345 мм отримана поковка має меншу, в порівнянні зі всіма зразками, конусність 0,003 (1:350). При чому довжина виступу зменшилася на 3% (40 мм), а уступу на 5% (95 мм). Деформації в уступі більші (рис. 3.18, в), що пояснюється збільшеною товщиною стінки за рахунок ступінчастого напуску. Однак, найбільші деформації зосереджені на поверхні виступу.

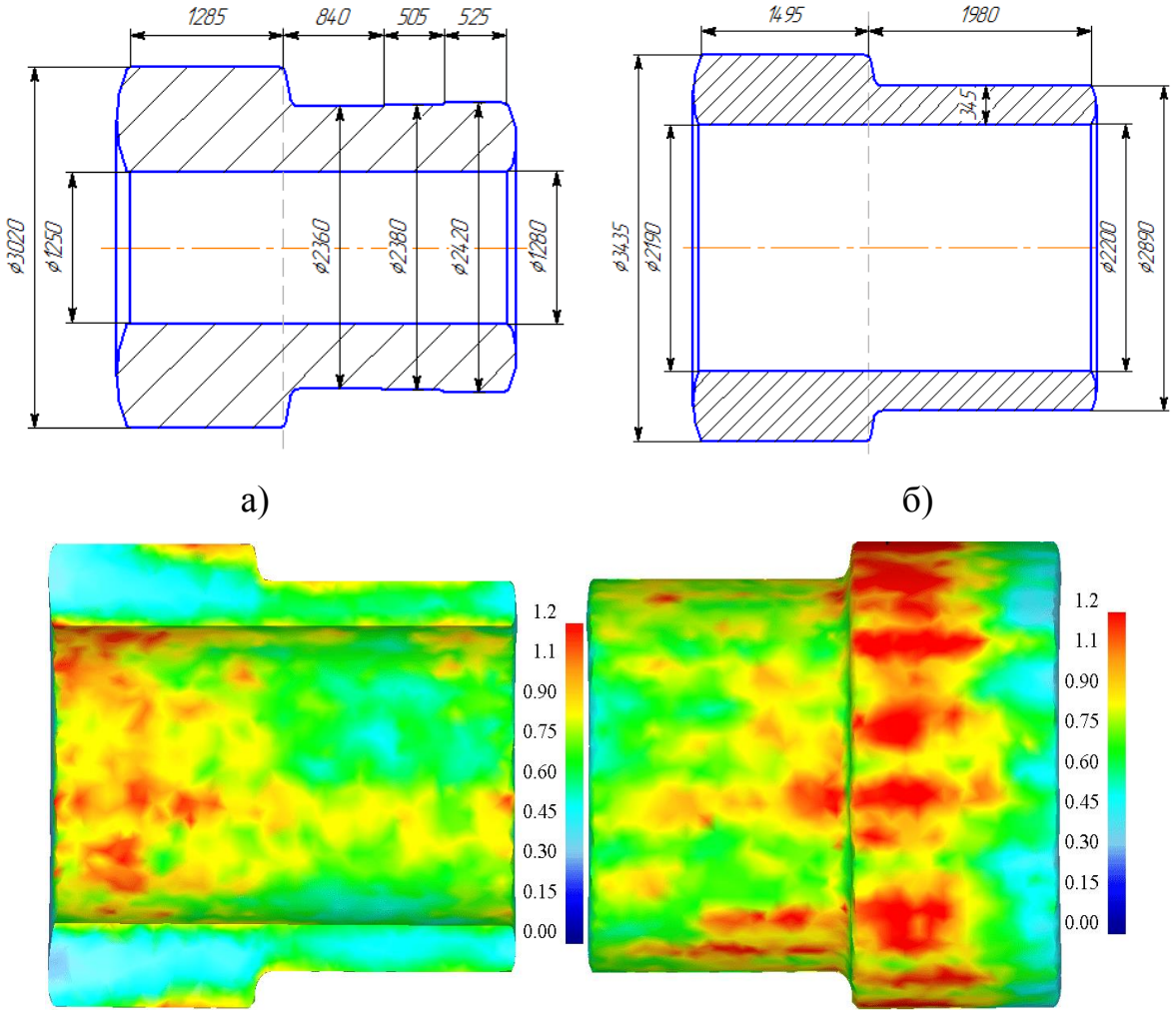



Рисунок 3.18 – Ескіз заготовки (а), ескіз поковки (б) та деформований стан поковки (в) отриманої після розкочування

Однак через невеликі перепади між діаметрами на уступі заготовки такий спосіб кування не можна рекомендувати до виробництва тому що їх

отримання викликає труднощі пов’язані з контролюванням їх співвісності, з огляду на це подальші дослідження будуть проводитися з гладким уступом.

## 3.5 Аналіз формоутворення поковки при зменшених розмірах виступу

Серед продукції, що виготовляється на заводах важкого машинобудування, доволі часто зустрічаються пустотілі поковки з фланцями, які застосовуються в енергетичній та нафтопереробній галузях. З огляду на це необхідно визначити, як буде змінюватися форма заготовки при зменшеній довжині виступу під час розкочування ступінчастим бойком.

### 3.5.1 Вплив зміни довжини виступу на формоутворення поковки зі змінною товщиною стінки

Для даного дослідження довжина виступу заготовки була зменшена до $0{,}16H_в$ (до 500 мм), водночас загальна довжина заготовки залишається не змінною, тобто довжина виступу зменшена, а уступу збільшена. Аналіз результатів виникнення конусності в процесі розкочування (рис. 3.19) дозволив встановити, що початкове збільшення конусності пов’язано з деформуванням виступу, яке призводить до збільшення отвору з боку виступу, проте уступ не деформується. Подальше падіння конусності пов’язане з початком деформуванням уступу, що призводить до збільшення діаметру отвору з боку уступу. Встановлено, що конусність падає до нуля, тобто діаметри отвору зі сторони уступу та зі сторони виступу рівні. Найменше значення конусності виникає при ступені деформування виступу 0,25 і відповідає четвертому колу розкочування, під час якого виступ та уступ деформуються з однаковою абсолютною величиною. При подальшому розкочуванні ступінь деформації в уступі збільшується інтенсивніше, ніж у виступі. Це спричиняє збільшення різниці між діаметрами та, відповідно, конусності поковки.

Збільшення конусності можна пояснити, як і в попередніх випадках, різною деформацію виступу та уступу. Аналізуючи дані ступенів деформації можна зробити висновок, що на початковій стадії процесу розкочування ступінь деформації у виступі (крива 1) збільшуються інтенсивніше, ніж в уступі (рис. 3.20). Це пов'язано з тим, що хід бойка на першому колі розкочування не забезпечує деформування уступу. Різке збільшення ступені деформації уступу (кривої 2) пов'язано з тим, що виступ і уступ деформуються на однакову абсолютну величину за одне натискання, як вже було відзначено, в такому випадку ступінь деформації в уступі збільшується інтенсивніше через меншу товщину стінки. Однак цей графік відрізняється від попередніх тим, що криві перетинаються. Через те, що в уступі виникають більші деформації при кожному натисканні та сумарний ступінь деформації збільшується інтенсивніше, що призводить до збільшення різниці між діаметрами.

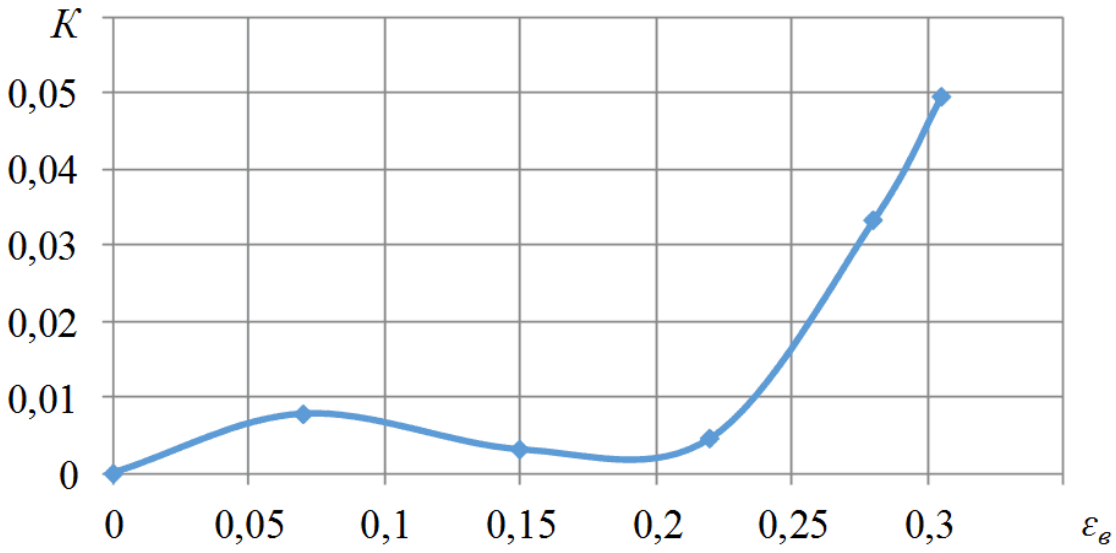



Рисунок 3.19 – Закономірність виникнення конусності $K$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$

На початковій стадії розкочування уступ не деформується, ступінь деформації у виступі зростає, що спричиняє виникнення різниці між ступенями деформації у виступі та в уступі, а з рештою і збільшення конусності, при чому діаметр з боку виступу більший, ніж з боку уступу.

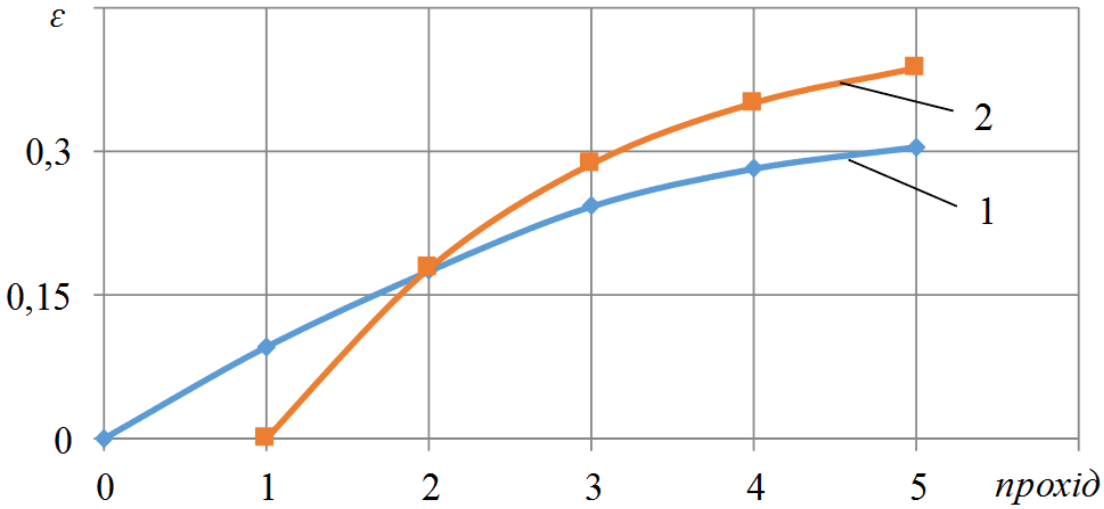



Рисунок 3.20 – Зміна відносного ступеня деформації $\varepsilon$ у виступі (1) та в уступі (2) в процесі розкочування

На третьому колі починає деформуватися уступ, різниця між деформаціями у виступі та в уступі знижується і конусність зменшується до найменшого значення, діаметри з отвору з обох боків рівні. На четвертому колі розкочування ступені деформації у виступі та в уступі майже рівні. За такої умови конусність збільшується, проте діаметр отвору з боку уступу починає перевищувати діаметр з боку виступу. При подальшому деформуванні ступінь деформації в уступі збільшується інтенсивніше та починає перевищувати ступінь деформації у виступі, що призводить до інтенсивнішого зростання діаметру з боку уступу, конусність за такої умови продовжує збільшуватися.

### 3.5.2 Вплив зміни зовнішнього діаметра виступу на формоутворення поковки зі змінною товщиною стінки

Результати моделювання дозволили встановити, що збільшення відносного діаметра заготовки з 2,416 до 2,544 (на 160 мм) призводить до виникнення більшої конусності на початковій стадії розкочування, та до меншої конусності у кінцевій стадії розкочування.

Аналіз даних виникнення конусності в процесі розкочування (рис. 3.21) вказує на зростання конусності на початковій стадії

розкочування, що пов’язано з деформуванням виступу, проте уступ не деформується, як і в попередньому випадку. Однак в даному випадку вона більша. Падіння конусності відбувається, коли починає деформуватися уступ. Діаметр отвору з боку уступу збільшується інтенсивніше. Встановлено, що конусність падає практично до нуля. Надалі конусність зростає через деформування уступу. Діаметр отвору з боку уступу продовжує інтенсивніше збільшуватися.

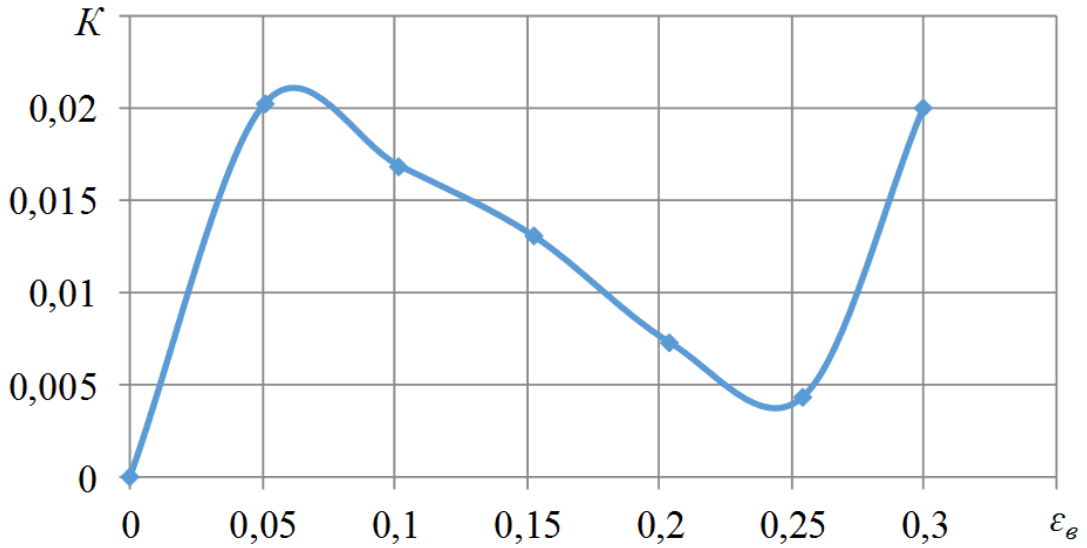



Рисунок 3.21 – Закономірність виникнення конусності $K$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$

Аналіз даних накопиченої деформації в процесі деформування (рис. 3.22) вказує на те, що в процесі розкочування ступінь деформації у виступі (крива 1) інтенсивніше збільшується, проте уступ не деформується. В цей момент конусність зростає. Під час всього процесу розкочування ступінь деформації виступу більше, ніж уступу. Через це заготовка постійно має конусність з більшим діаметром отвору зі сторони виступу. Однак в кінцевій стадії процесу розкочування криві практично співпадають. На п’ятому колі конусність знижується практично до нуля, а надалі знову починає зростати. За такої умови зростання конусності знаходиться у межах допуску.

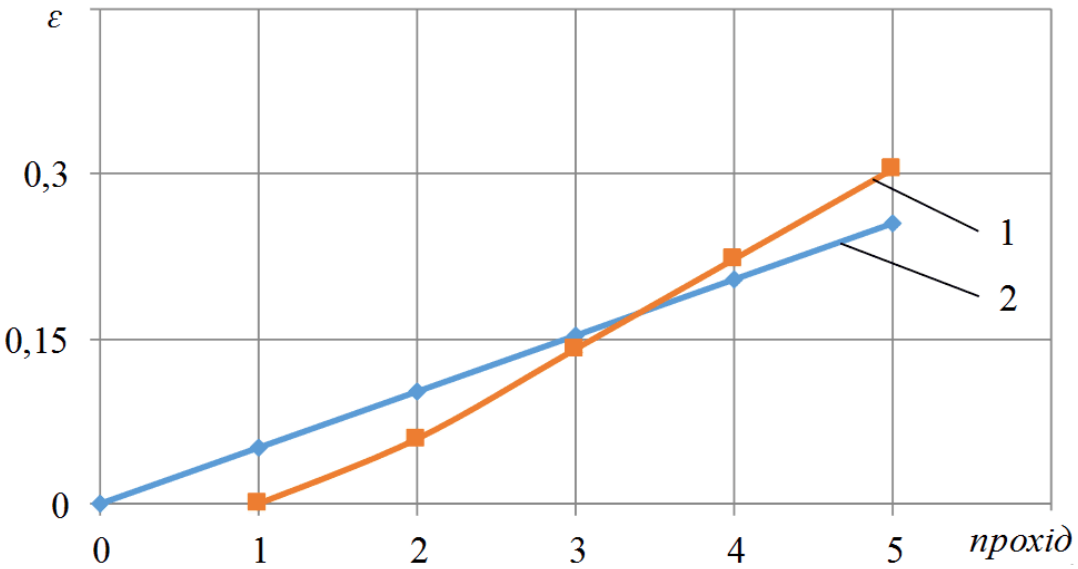



Рисунок 3.22 – Зміна відносного ступеня деформації $\varepsilon$ у виступі (1) та в уступі (2) в процесі розкочування

За результатами дослідження можна зробити висновок, що зменшення довжини виступу призводить до утворення конусної поковки з більшим діаметром з боку уступу. Подібні поковки можна застосовувати під час виробництва конусних деталей, які потрібні в енергетичному виробництві. Збільшення діаметру виступу призводить до зменшення конусності та отриманню циліндричної поковки з фланцем.

## Висновки

1. Встановлено, що при розкочуванні заготовки з різницею відносних діаметрів 0,43 виступ та уступ одночасно деформуються під час всього процесу розкочування, водночас уступ інтенсивніше збільшується у діаметрі, ніж виступ, через що поковка має конусну форму. Це пояснюється різними ступенями деформації, які утворюються у виступі та уступі. Причому ступінь деформації в уступі збільшується інтенсивніше, ніж у виступі. Різниця у ступенях деформації виникає через різницю у товщині стінок виступу та уступу. При $\varepsilon_в$=0,25 конусність дорівнює 0,17.

2. Для зменшення конусності при одночасному розкочуванні виступу та уступу найбільш дієвим способом є розкочування заготовки з напуском з боку виступу. В цьому випадку конусність при $\varepsilon_в$=0,25 знижується до 0,05. Однак напуск призводить до збільшення металомісткості процесу, тому даний спосіб слід застосовувати при поєднанні двох деталей в одній поковці.

3. При розкочуванні заготовки з різницею відносних діаметрів 0,58 утворюється конічна поковка з більшим діаметром з боку виступу. Це виникає через більшу сумарну деформацію виступу, яка утворюються через те, що на початковій стадії розкочування при $\varepsilon_в$<0,1 деформується лише виступ. При подальшому одночасному розкочуванні виступу та уступу ступінь деформації в уступі менший, ніж у виступі.

4. При зменшенні довжини виступу до $0{,}16 \times H_в$ конусність поковки на початковій стадії розкочування, $\varepsilon_в$<0,1, збільшується, що пов’язано з деформуванням виступу. При подальшому розкочуванні виступ та уступ починають деформуватися одночасно, і конусність зменшується, що пов’язано зі зменшенням різниці між ступенями деформації виступу та уступу. При рівних ступенях деформації конусність збільшується через збільшення діаметру уступу.

5. При розкочуванні заготовок зі змінною товщиною стінок ступінчастим інструментом утворюється конусна форма поковки через різний деформований стан виступу та уступу.

## Список використаних джерел

3.1. Теоретические исследования кузнечной операции протяжки при использовании схемы деформации «проходами» / В. А. Гринкевич, В. Л. Чухлеб, Г. Банашек, А. В. Ашкелянец // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – №44. – С. 28–34.

3.2. Общее руководство по работе с инженерным программным комплексом DEFORM / Таупек И. М., Кабулова Е. Г., Положенцев К. А. [и др.] – Старый Оскол: ООО ИПК «Кириллица», 2015. – 217 с.

3.3. Теория обработки металлов давлением: Конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы / сост. Н. Н. Загиров, Э. А. Рудницкий. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 56 с.

3.4. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM–3D: учебное пособие / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин, А. А. Федулов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

3.5. Jafarzadeh H. Numerical and experimental studies of splines produced by injection forging process / H. Jafarzadeh, M. Zadshakoyan // Materials and manufacturing processes. – 2011. – Vol. 5. – P. 703–712.

3.6. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of hot radial511 forging process for large diameter tubes / J. Chen, K. Chandrashekhara, V. L. Richards, S. N. Lekakh // Materials and manufacturing processes. – 2010. – № 7. – P. 669–678.

3.7. Thermal–elastic–plastic simulation of internal stress fields of quenched steel 40cr cylindrical specimens by FEM / Ligang Liu, Bo Liao, Da Li [et al.] // Materials and manufacturing processes. – 2011. – № 5. – P. 732–739.

3.8. Analysis and FEM simulation of temperature field in wet surface grinding / C. Mao, Z.X. Zhou, Y.H. Ren, B. Zhang // Materials and manufacturing processes – 2010. – Vol.6. – P. 399–406.

3.9. Du Y.Y. Finite element simulation of cold isostatic pressing of the selective laser-sintered components / Y.Y. Du, Y.S. Shi, Q.S. Wei // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – № 12. – P. 1389 – 1396.

3.10. Элементы штамповки в процессах ковки крупных поковок / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, В. Н. Злыгорев, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 20 –27.

3.11. A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria / C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez // Journal of materials processing technology – 2014. – №2. – P. 347–357.

3.12 Косілов М. С. Дослідження деформованого стану та формоутворення ступінчастої поковки під час розкочування / М. С. Косілов, О. В. Герасименко // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки металів тиском у машинобудуванні та металургії : матеріали IX МНТК, 22–24 листопада 2017 р. – Харків – 2017. – С. 35.

3.13. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Mechanics and advanced technologies. – 2017. – №2. – С. 85–91. – DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575

3.14. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – Москва, 1976. – 560 с. – (Машиностроение). – 2.

3.15. Теория и технология процессов ковки и прессования: Составление чертежа поковки и разработка технологии ковки: Учеб.-метод. Пособие / А. Г. Кобелев, В. А. Тюрин, М. А. Шаронов, Ю. М. Антощенков. – М.: МИСиС, 2002. – С. 69–71.

3.16. А. с. 889250 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, А. Ю Петунин (СССР). – № 2912860/25-27; заявл. 06.02.80; опубл. 15.12.81, Бюл. № 46. – 3 с.

3.17. А. с. 733829 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления кольцевых поковок / В. Д. Арефьев, В. С. Рябцев, Э. Л. Рогожин,

С. И. Данилин, Ю. А. Петунин, Б. Г. Восходов, В. П. Нагайцев, В. Н. Лебедев (СССР). – № 2537143/25-27; заявл. 25.05.77; опубл. 15.05.80, Бюл. № 18. – 3 с.

3.18. Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми / О. Є. Марков, М. С. Косілов, В. Ю. Станков, П. І. Різак // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць [редрада.: Є. В. Мироненко та ін.]. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 114–120.

# 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ ПОКОВОК ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ

## 4.1 Розкочування заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср} = 2,05$

Моделювання процесів розкочування ступінчастих деталей МСЕ дозволило встановити, що на форму та розміри поковки впливають діаметр виступу заготовки, діаметр уступу заготовки та ступінь деформації. При виконанні експериментальних досліджень змінюваними параметрами прийняті $D_в$, $D_y$, діаметр отвору заготовки буде постійним. Внаслідок планування експерименту, методика проведення якого описана у пункті 2.2.1, виділено три основних фактори, які подібні до теоретичних: відносний діаметр виступу заготовки $D_в / d_{ср}$, відносний діаметр уступу заготовки $D_y / d_{ср}$ та ступінь деформації $\varepsilon$. Вони варіюються на трьох рівнях, що потребувало проведення дев'яти опитів. Зміна форми заготовок відбувалася внаслідок зміни діаметрів $D_в$ та $D_y$, що впливало на товщину стінок виступу та уступу. Загальна довжина заготовки, довжина виступу та середній діаметр отвору були постійні. У такий спосіб були отримані заготовки з діаметрами виступу, рівними 80, 76 та 72 мм, та діаметрами уступу, рівними 64, 58 та 52 мм, загальна довжина кожної 81 мм та довжиною бурта 34 мм. Абсолютна деформація складала 1 мм. Тобто після кожного кола розкочування товщини стінок виступу та уступу зменшувалися на 1 мм. Після кожного кола замірялися розміри деформованої заготовки. Деформування відбувалося до відстані між інструментами 7 мм. Завдяки опитам отриманий великий масив даних для визначення закономірностей формозміни заготовки зі змінною товщиною стінки під час розкочування.

Для опису та обробки результатів досліджень експерименти були поділені на групи в залежності від відносного діаметра уступу заготовки

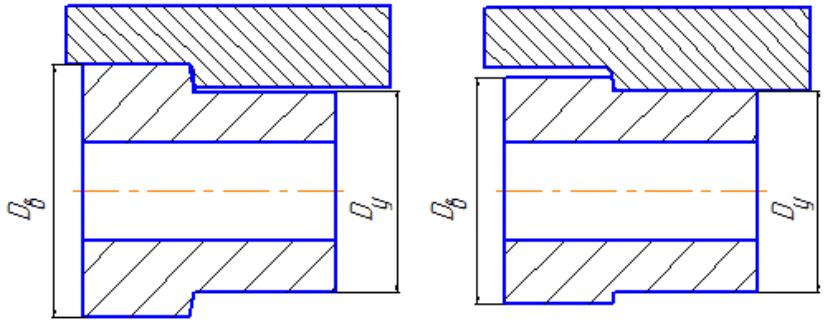
$D_y / d_{ср}$. В результаті, будуть встановлені регресійні закономірності відносного діаметра виступу поковки $D_{п.в} / d_{п.в}$, відносного діаметра уступу поковки $D_{п.у} / d_{п.у}$, співвідношення торцевих діаметрів отвору $d_{п.в} / d_{п.у}$ в залежності від ступеня деформації $\varepsilon$ та початкових розмірів заготовки.

При розкочуванні заготовок зі змінною товщиною стінки присутнє нерівномірне деформування виступу та уступу, що було встановлено при теоретичному досліджені. В результаті це призводить до виникнення конусності з більшим діаметром з боку виступу або уступу. Задача теоретичного дослідження полягала у визначенні параметрів заготовки, які впливають на утворення конусності. Тому шляхом експериментального дослідження необхідно вивчити механізми формозміни в процесі розкочування заготовки ступінчастим бойком [4.1].

На рисунку 4.1 зображені розкочені заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср}$ = 2,05. В результаті розкочування усі зразки мали конусну форму з більшим діаметром з боку уступу. Для даного співвідношення розмірів заготовок були характерні дві схеми розкочування. Перша – коли на початковій стадії розкочування деформується виступ (рис. 4.2, а), як в п. 3.3, друга (рис. 4.2, б), яка не розглядалася при теоретичному дослідженні, – коли спочатку процесу розкочування деформується уступ, а при зменшенні відстані між інструментами виступ та уступ одночасно.

а) б) в)

Рисунок 4.1 – Розкочені ($\varepsilon_y$ = 0,63) заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср}$ = 2,05 : а – $D_в / d_{ср}$ = 2,5; б – $D_в / d_{ср}$ = 2,4; в – $D_в / d_{ср}$ = 2,3




а) б)

Рисунок 4.2 – Схеми розкочування заготовок з відносним діаметром уступу заготовки $D_y / d_{ср}$ = 2,05

Аналіз результатів відносних ступенів деформації виступу та уступу в процесі розкочування дозволив виявити, що з кожним обтисканням заготовки відносний ступінь деформації металу в уступі більший, ніж у виступі, та інтенсивніше збільшується (рис. 4.3). Встановлено, що зменшення відносного діаметра виступу, відповідно і товщини стінки виступу, призводить до збільшення різниці між відносними ступенями деформації. Це пояснюється тим, що при одночасному обтисканні виступу та уступу на однакову абсолютну величину більш інтенсивне збільшення діаметру буде виникати в місці тонкої стінки, тобто з боку уступу, і, як результат, тангенціальна деформація металу, яка сприяє збільшенню діаметрів, в уступі більша. Нерівномірність деформацій пояснює більшу інтенсивність збільшення діаметрів отворів з боку уступу.

Отже, нерівномірна зміна відносних діаметрів отворів призводить до утворення конусної форми поковки. Згідно з формулою 2.7 конусність поковки залежить від трьох параметрів: діаметру отвору з боку виступу $d_{п.в}$, діаметру отвору поковки з боку уступу $d_{п.у}$ та довжини поковки $L_п$. Під час розкочування довжина суттєво не змінюється, отже на форму поковки впливають діаметри отвору, віднімаючи $d_{п.у} / L_п$ від $d_{п.в} / L_п$ отримуємо її конусність. З цього приводу доцільним буде дослідити взаємодію цих двох складових конусності в процесі розкочування.

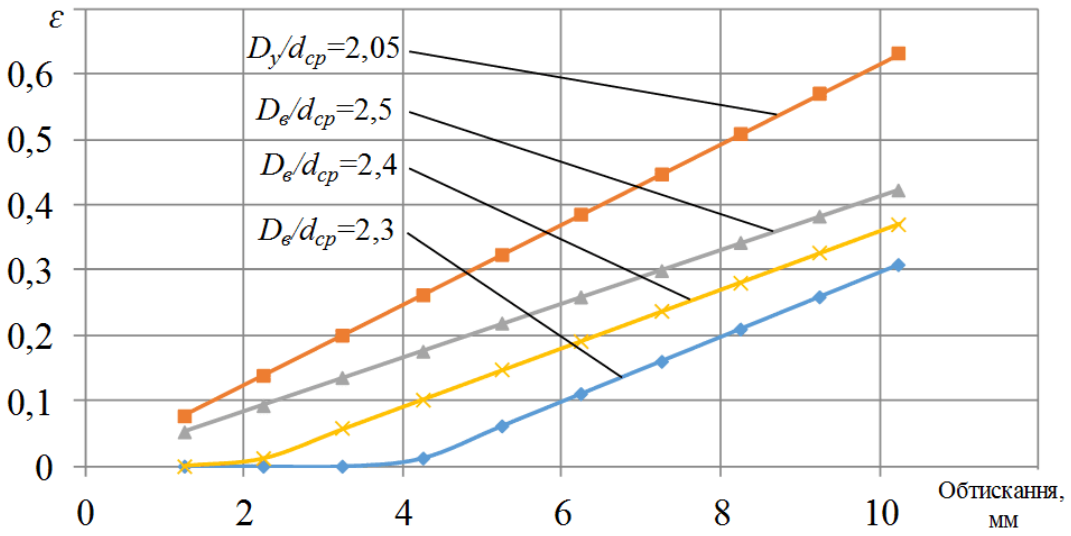



Рисунок 4.3 – Закономірності зміни відносних ступенів деформації $\varepsilon$ від обтискання для заготовок з $D_y/d_{cp}=2{,}05$ та різними $D_в/d_{cp}$

Аналізуючи зміну відносних діаметрів отвору з боку виступу та уступу в процесі розкочування (рис. 4.4) було встановлено, що відносні діаметри отвору з боку уступу, як і відносний ступінь деформації, збільшуються інтенсивніше, ніж з боку виступу, що підтверджує теоретичні дослідження. Зі зменшенням відносних діаметрів виступів $D_в/d_{cp}$ зменшуються відносні діаметри отворів виступів $d_{п.в}/L_п$, крива, відповідна $D_в/d_{cp}$=2,5, проходить найвище, а $D_в/d_{cp}=2{,}3$ – найнижче. З іншого боку зі зменшенням відносних діаметрів виступів $D_в/d_{cp}$ збільшуються відносні діаметри отворів уступів $d_{п.у}/L_п$, крива, відповідна $D_в/d_{cp}=2{,}3$, проходить найвище, а $D_в/d_{cp}$=2,5 – найнижче. Отже, для досліджуваної групи заготовок з $D_y/d_{cp}=2{,}05$ зі зменшенням відносного діаметра $D_в/d_{cp}$ різниця між відносними діаметрами отворів $d_{п.в}/L_п$ та уступу $d_{п.у}/L_п$ постійно зростає, що спричиняє зміну форми поковки, а саме призводить до утворення конусності.

Для відносних діаметрів виступу заготовки $D_в/d_{cp}$ = 2,4 та 2,3 відповідні криві $d_{п.в}/L_п$ та $d_{п.у}/L_п$ не перетинаються, це свідчить про утворення конусної форми поковки з більшим діаметром з боку уступу вже на

початковій стадії розкочування, а під час подальшого деформування конусність постійно збільшується. У цьому разі під час всього процесу розкочування відносний діаметр отвору з боку виступу менший, ніж відносний діаметр отвору з боку уступу ($d_{п.в}/L_n < d_{п.у}/L_n$), що відбувається через деформування уступу на початковій стадії розкочування, причому виступ не деформується, про що свідчить графік утворення деформації (див. рис. 4.3).

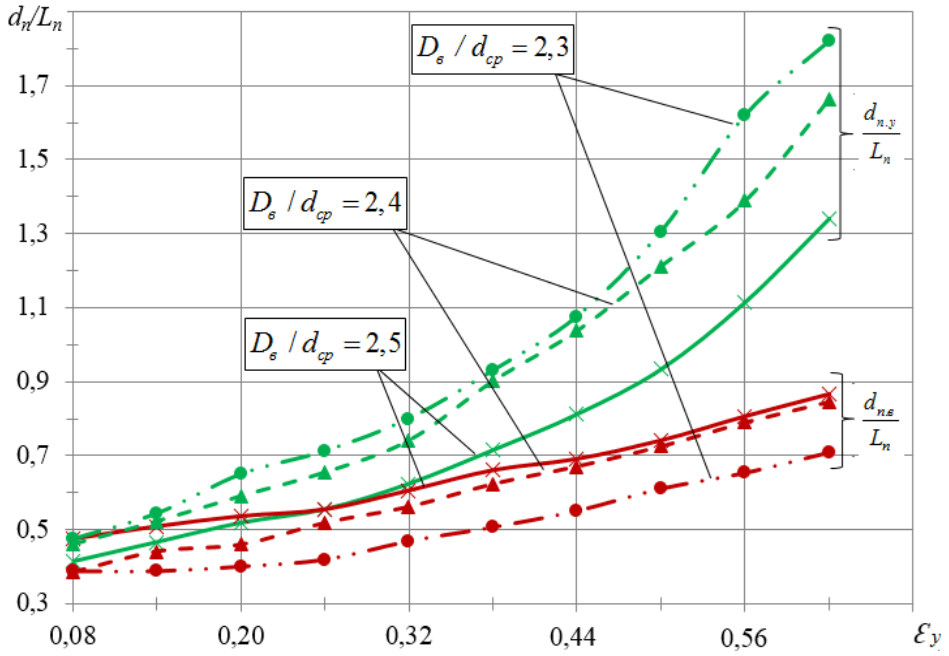



Рисунок 4.4 – Закономірності зміни відносних діаметрів отвору $d_п/L_n$ від відносного ступеня деформації уступу $\varepsilon_y$ для заготовок з $D_y/d_{ср} = 2,05$

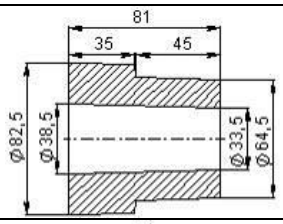
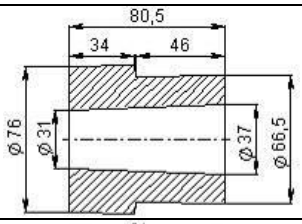
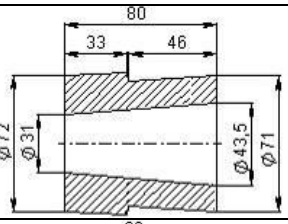
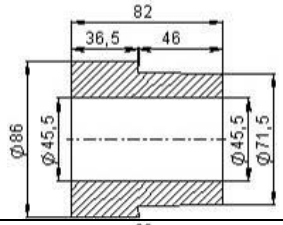
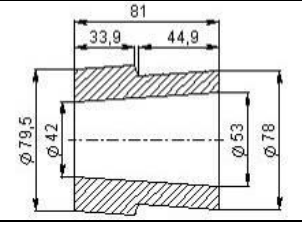
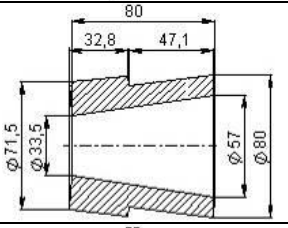
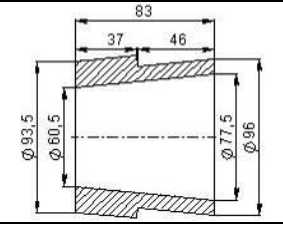
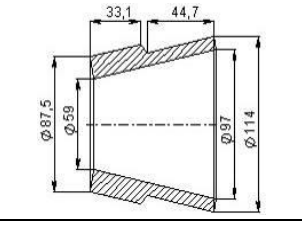
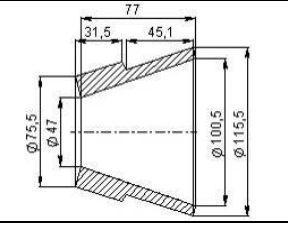
Для відносного діаметра виступу заготовки $D_в/d_{ср} = 2,5$, спостерігається інша закономірність. На початковій стадії процесу розкочування відносний діаметр отвору виступу більший, ніж відносний діаметр отвору уступу ($d_{п.в}/L_n > d_{п.у}/L_n$), що пояснюється деформуванням виступу, причому уступ не деформується. Досягаючи відносного ступеня деформації виступу 0,26, діаметри отвору з боку виступу та уступу вирівнюються ($d_{п.в}/L_n = d_{п.у}/L_n$), після чого відбувається інтенсивніше зростання відносного діаметра отвору уступу ($d_{п.в}/L_n < d_{п.у}/L_n$).

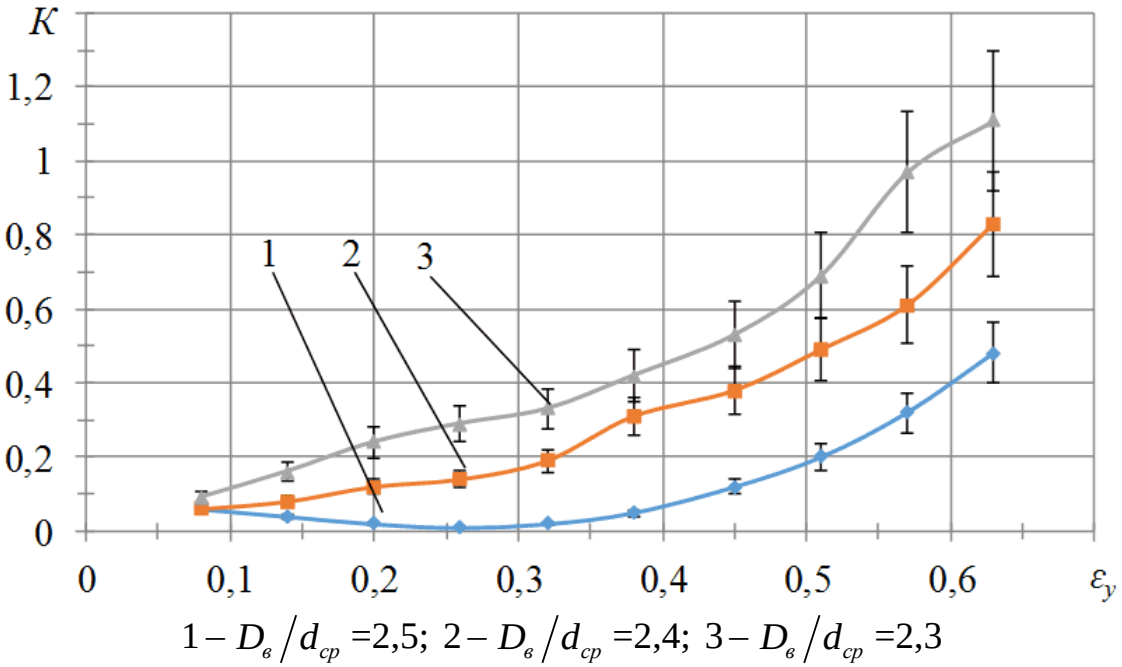
Для заготовок з $D_в / d_{ср}$ = 2,4 та 2,3 конусність постійно зростає, тому що на початковій стадії розкочування деформується уступ. У таблиці 4.1, показано стадійна зміна зразків для ступенів деформації уступу 0,08; 0,26 та 0,51. Окрему увагу необхідно приділити зміні зразка з $D_в / d_{ср}$ = 2,5. Для нього на початковій стадії розкочування утворилася конусна форма з більшим діаметром з боку виступу. При $\varepsilon_y$ = 0,26 форма зразка стала циліндричною, діаметри отвору з обох боків рівні. На рисунку 4.4 цьому моменту відповідає перетин двох кривих для $D_в / d_{ср}$ = 2,5. В міру зменшення відстані між бойком та дорном (збільшення обтискання) ступінь деформації уступу збільшується, що сприяє утворенню більшого діаметра з боку уступу. Для інших двох зразків конусність постійно збільшується.

Аналіз отриманих результатів утворення конусності поковки від відносного ступеня деформації уступу дозволив встановити (рис. 4.5), що для відносного діаметра заготовки $D_y / d_{ср}$ = 2,05 збільшення відносного ступеня деформації уступу призводить до збільшення конусності поковки. Збільшення конусності пов'язане з інтенсивним збільшенням діаметру отвору з боку уступу $d_{п.у}$ під час розкочування. Зниження конусності для заготовки з відносним діаметром виступу 2,5 при ступені деформації $\varepsilon < 0,26$ пов'язане з деформуванням на першому колі розкочування виступу поковки, за такої умови уступ не деформується. Отже, діаметр отвору зі сторони виступу починає збільшуватися, а зі сторони уступу не змінюється. Утворюється конусна поковка з більшим діаметром отвору з боку виступу (див. табл. 4.1, $D_в / d_{ср}$ =2,5, $\varepsilon$=0,08). При подальшому одночасному деформуванні виступу та уступу конусність знижується до нуля при деформації $\varepsilon$=0,26, що вказує на рівність діаметрів отвору з боку виступу та уступу ($d_{п.в}$=$d_{п.у}$). Зростання конусності для заготовки з відносним діаметром виступу 2,05 пов'язане з більш інтенсивним збільшенням діаметру отвору з боку уступу, що

пояснюється більшим плином металу у тангенціальному напрямку при обтисканні тоншої стінки.

Таблиця 4.1 – Ескізи зразків у процесі розкочування з різними ступенями деформації для різних співвідношень розмірів заготовок

| $D_в / d_{ср}$ | 2,5 | 2,4 | 2,3 |
|---|---|---|---|
| $\varepsilon_y$ = 0,08 |  |  |  |
| $\varepsilon_y$ = 0,26 |  |  |  |
| $\varepsilon_y$ = 0,51 |  |  |  |




$1 - D_в / d_{ср}$ =2,5; $2 - D_в / d_{ср}$ =2,4; $3 - D_в / d_{ср}$ =2,3

Рисунок 4.5 – Закономірності зміни конусності $K$ від відносного ступеня деформації уступу $\varepsilon_y$ для заготовок з $D_y / d_{ср}$ = 2,05

Значний інтерес являє зміна співвідношення діаметрів отвору з боку виступу та уступу в процесі розкочування, що дозволяє встановити якісне та кількісне змінення діаметрів на торцях заготовки при сталій довжині заготовки.

Аналізуючи зміну співвідношень діаметрів отвору поковки з боку виступу та уступу $d_{п.в}/d_{п.у}$ від ступеня деформування $\varepsilon_y$ (рис. 4.6) для відносного діаметра уступу заготовки $D_y/d_{ср} = 2{,}05$, можна відзначити, що зі збільшенням ступеня деформування $\varepsilon_y$ співвідношення діаметрів отвору поковки зменшується. Точка, відмічена колом на кривій 1, відповідає відсутності конусності. Тобто на початку деформування, до цієї точки, діаметр отвору зі сторони виступу більший, ніж зі сторони уступу ($d_{п.в} > d_{п.у}$), що пов'язано з деформуванням виступу на початковій стадії розкочування. У відміченій точці вказані діаметри сходяться ($d_{п.в} = d_{п.у}$), та при подальшому деформуванні діаметр отвору з боку уступу збільшується інтенсивніше, ніж з боку виступу, і співвідношення торцевих діаметрів отвору поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ стає менше, ніж 1 ($d_{п.в} < d_{п.у}$).

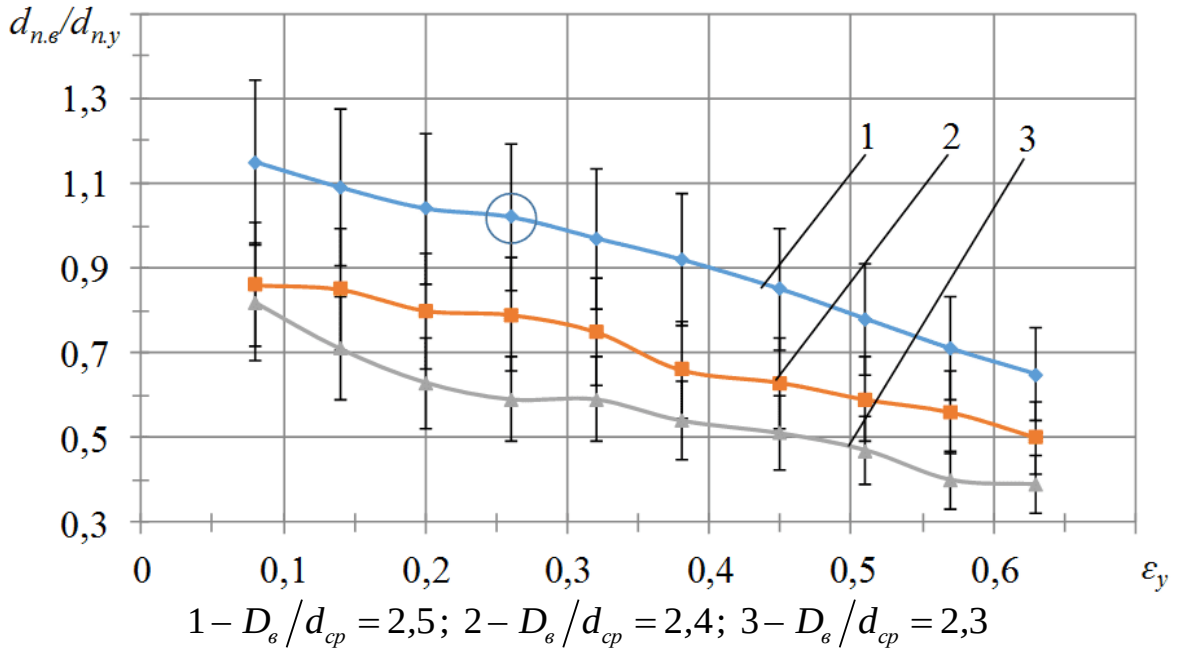
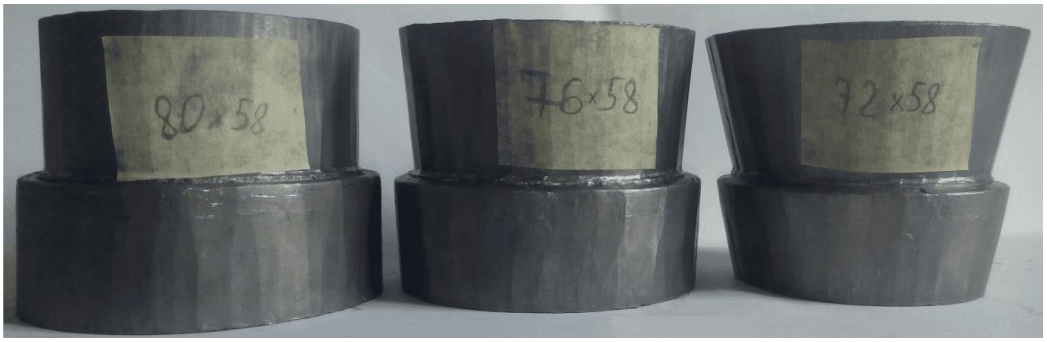



Рисунок 4.6 – Закономірності зміни співвідношення діаметрів отвору $d_{п.в}/d_{п.у}$ від відносного ступеня деформації $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_y/d_{ср} = 2{,}05$

Криві 2 та 3 не перевищують одиниці, що відповідає деформуванню уступу на початку розкочування, та зменшуються поступово через те, що інтенсивніше збільшується діаметр уступу внаслідок більшого накопичення деформацій. Причому отримані закономірності мають практично лінійний характер.

### 4.2 Розкочування заготовки з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср} = 1{,}85$

В результаті розкочування заготовок з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср} = 1{,}85$ найменшу конусність мала поковка, яка була розкочена із заготовки з відносним діаметром виступу $D_в / d_{ср}$ рівним 2,5, а найбільшу з $D_в / d_{ср}$ = 2,3 (рис. 4.7). Для даного співвідношення розмірів заготовок також характерні дві схеми розкочування. Перша – на початковій стадії розкочування деформується виступ (рис. 4.8, а), як в п. 3.3 та 4.1, друга – спочатку процесу розкочування деформується виступ та уступ (рис. 4.8, б), як в п. 3.1.

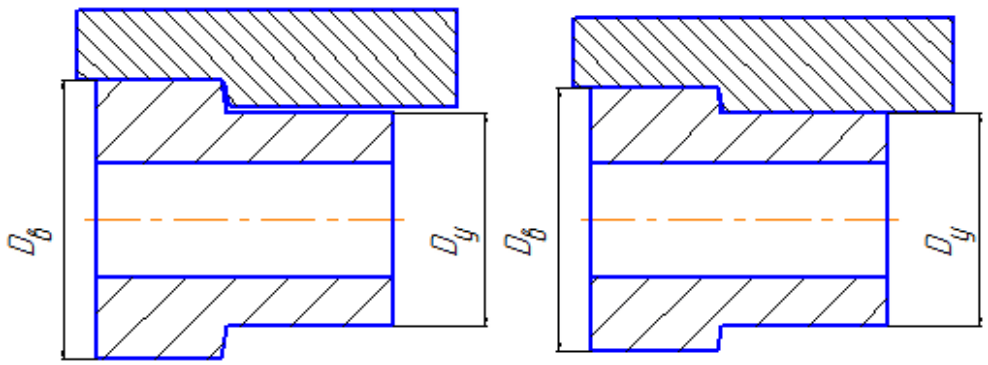



а) б) в)

Рисунок 4.7 – Розкочені ($\varepsilon_y$ = 0,55) заготовки з відносним діаметром $D_y / d_{ср}$ = 1,85: а – $D_в / d_{ср}$ = 2,5; б – $D_в / d_{ср}$ = 2,4; в – $D_в / d_{ср}$ = 2,3

Аналіз відносних ступенів деформації виступу та уступу в процесі розкочування, розрахованих згідно з формулою 2.13, дозволив виявити, що зменшення відносного діаметра виступу спричиняє зменшення його

відносного ступеня деформації, що пояснюється зменшенням початкової товщини стінки виступу, через що зменшилася кількість обтискань. Для заготовки з $D_в / d_{ср}$ = 2,5 (рис. 4.9, а) відносний ступінь деформації у виступі на початку процесу розкочування більший, ніж в уступі, що можна пояснити більшою різницею між діаметрами виступу та уступу, ніж величина сходинки бойка. Через це уступ на початку розкочування не деформується. При подальшому розкочуванні починає деформуватися уступ і його відносний ступінь деформації збільшується інтенсивніше, ніж виступу.




а) б)

Рисунок 4.8 – Схеми розкочування заготовок з $D_y / d_{ср} = 1{,}85$

Для заготовки з $D_в / d_{ср}$ = 2,4 (рис. 4.9, б) відносний ступінь деформації виступу більший за відносний ступінь деформації уступу при перших обтисканнях. Розходження між відносними деформаціями для уступу та виступу зменшується, коли починається деформуватися уступ і надалі збільшується. У випадку $D_в / d_{ср}$ = 2,3 (див. рис. 4.9, в) відносний ступінь деформації уступу більший, ніж виступу з самого початку процесу розкочування, що також характеризує схему розглянуту у п. 3.1. Відносний ступінь деформації уступу зростає одразу, тому, що виступ і уступ деформуються одночасно з першого ж натискання. Через це відносний діаметр з боку уступу збільшується інтенсивніше, ніж з боку виступу [4.4].

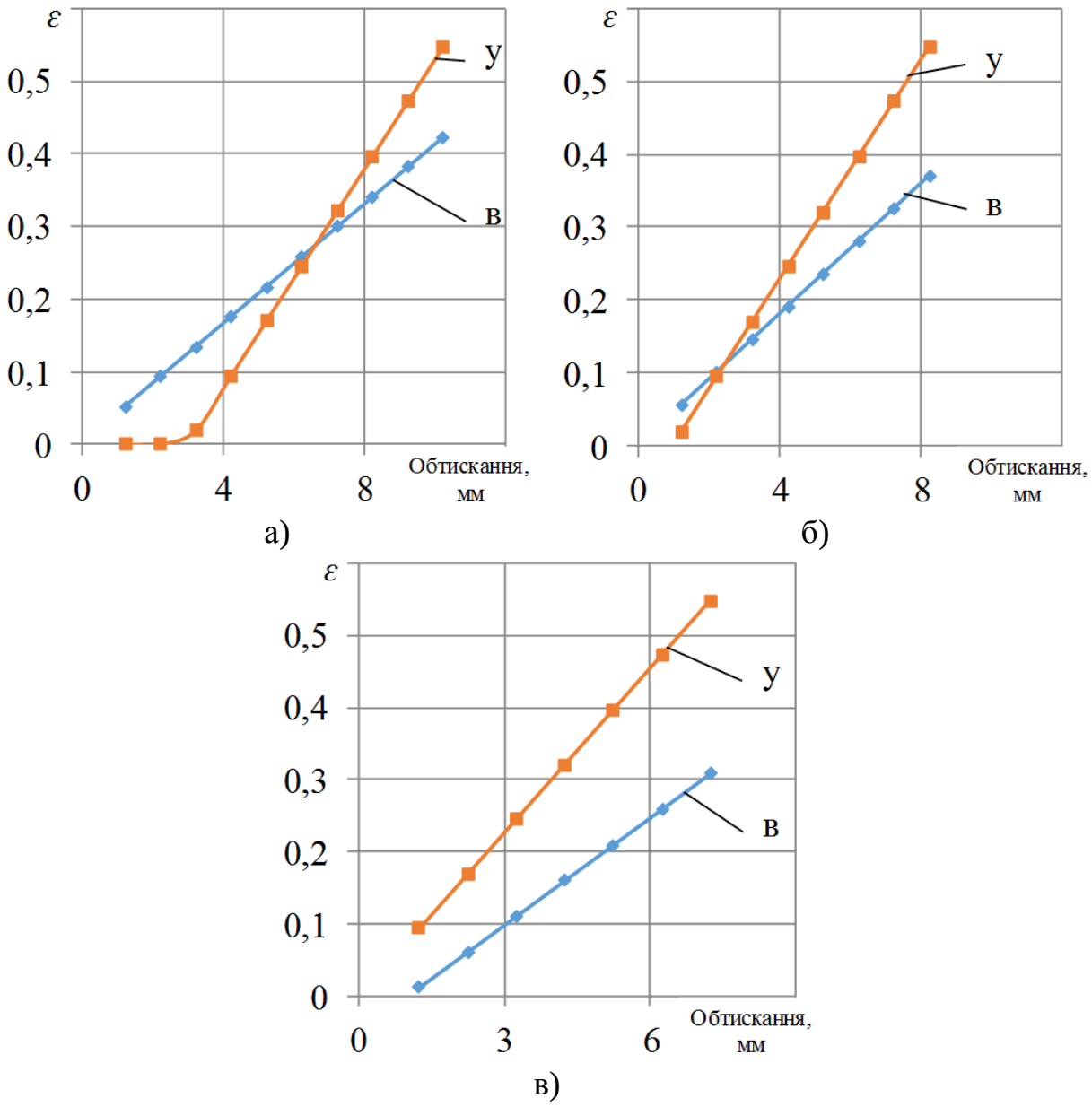



Рисунок 4.9 – Закономірності зміни відносних ступенів деформації $\varepsilon$ від обтискання для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}85$: а – $D_в/d_{ср}=2{,}5$; б – $D_в/d_{ср}=2{,}4$; в – $D_в/d_{ср}=2{,}3$

Аналіз отриманих результатів зміни відносних діаметрів отвору з боку виступу та уступу від ступеня деформації виступу для заготовок з $D_y/d_{ср}=$ 1,85 (рис. 4.10) дозволив встановити, що зі збільшенням ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ відносні діаметри отвору з боку уступу збільшуються інтенсивніше, ніж з боку виступу. Результати експериментів вказують на те, що для відносних діаметрів виступу заготовки $D_в/d_{ср}$, рівних 2,5 та 2,4, при

ступені деформації виступу менше, ніж 0,15 та 0,1 відповідно, різниця між відносними діаметрами виступу та уступу збільшується, водночас зростають відносні діаметри з боку виступу $d_{п.в}/L_n$. Це пов'язано з розкочуванням виступ, деформація уступу на цій стадії відсутня. Для відносного діаметра виступу заготовки 2,5 відносні діаметри отвору поковки практично рівні після $\varepsilon_в$=0,4. Для відносного діаметра виступу заготовки рівного 2,4, після ступеня деформації 0,3 відбувається перетин відносних діаметрів отворів поковки $d_{п.у}/L_n$ та $d_{п.в}/L_n$, тобто в цій точці діаметри отвору з боку виступу та з боку уступу рівні.

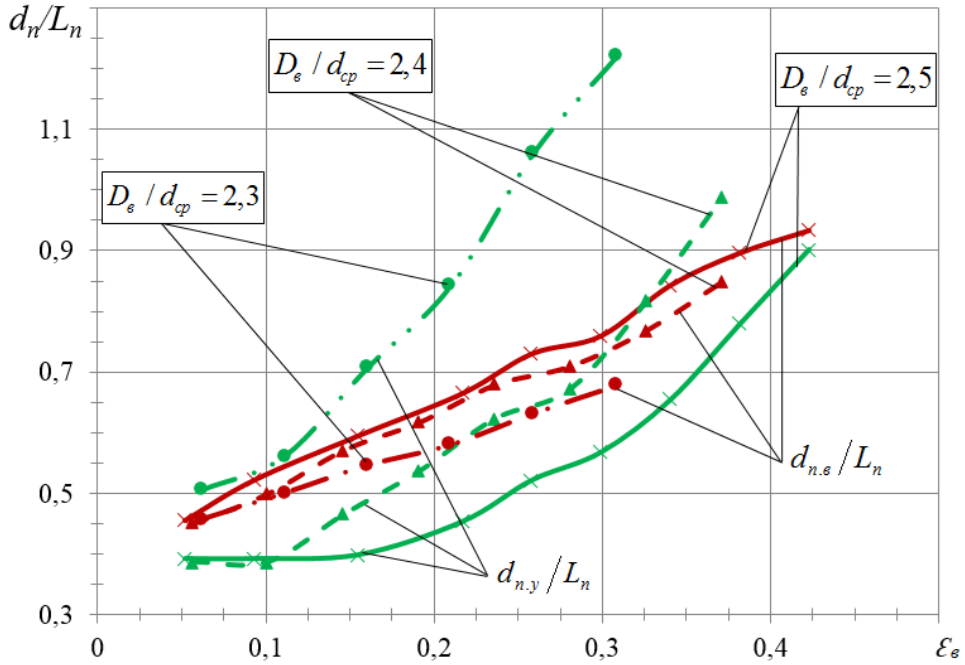



Рисунок 4.10 – Закономірності зміни відносних діаметрів отвору $d_п/L_n$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_у/d_{ср}=1,85$

Для заготовки з відносним діаметром виступу заготовки 2,3 діаметр отвору $d_{п.у}/L_n$ на початковому етапі розкочування зростає інтенсивніше, ніж $d_{п.в}/L_n$, однак криві не перетинаються, що вказує на утворення конусної форми на початковій стадії процесу розкочування. Інтенсивніше зростання

$d_{п.у}/L_{п}$ в усіх випадках можна пояснити швидшим зростанням відносного ступеня деформації уступу, ніж виступу, через тоншу стінку уступу, яка отримує більший ступінь деформації в порівнянні зі стінкою виступу при однаковій абсолютній величині деформування [4.3].

В пункті 4.1 було встановлено, що при відносному діаметрі уступу заготовки 2,05 для усіх відносних діаметрів виступу отримується конусна поковка з більшим діаметром отвору з боку уступу. Аналіз даних зміни конусності для заготовок з $D_{у}/d_{ср}$ = 1,85 (рис. 4.11) дозволив встановити, що зі збільшенням відносного ступеня деформації виступу конусність поковки має змінний характер. Для заготовки з $D_{в}/d_{ср}$ = 2,5 на початковій стадії розкочування конусність збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу при меншому ступені деформації, ніж 0,2. Далі конусність має постійне значення, що пояснюється рівномірним збільшенням діаметрів отвору з боку уступу та виступу. Подальше зниження конусності пов'язане з більш інтенсивним зростанням діаметру отвору з боку уступу. Різниця між сумарними ступенями деформації для уступу та виступу зменшується, завдяки чому зменшується різниця між відносними діаметрами отвору і, як наслідок, зменшується конусність.

Для заготовки з $D_{в}/d_{ср}$ = 2,4 на початковій стадії конусність збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу при $\varepsilon_{в}$<0,1. На відміну від деформування заготовки з $D_{в}/d_{ср}=2{,}5$, конусність знижується при меншому ступені деформації, що пояснюється меншою різницею між діаметрами виступу та уступу. Подальше зниження пов'язане з деформуванням уступу та більш інтенсивним зростанням діаметру отвору з боку уступу. Зростання конусності при ступені деформації $\varepsilon_{в}$ >0,3 пов`язано з інтенсивнішим зростанням діаметру отвору з боку уступу, через що він починає перевищувати діаметр отвору з боку виступу. Інтенсивніше збільшення відносного ступеня деформації уступу призводить до того, що він

починає перевищувати відносний ступінь деформації виступу і, як наслідок, відносний діаметр отвору з боку уступу стає більшим, ніж з боку виступу, що викликає збільшення конусності.

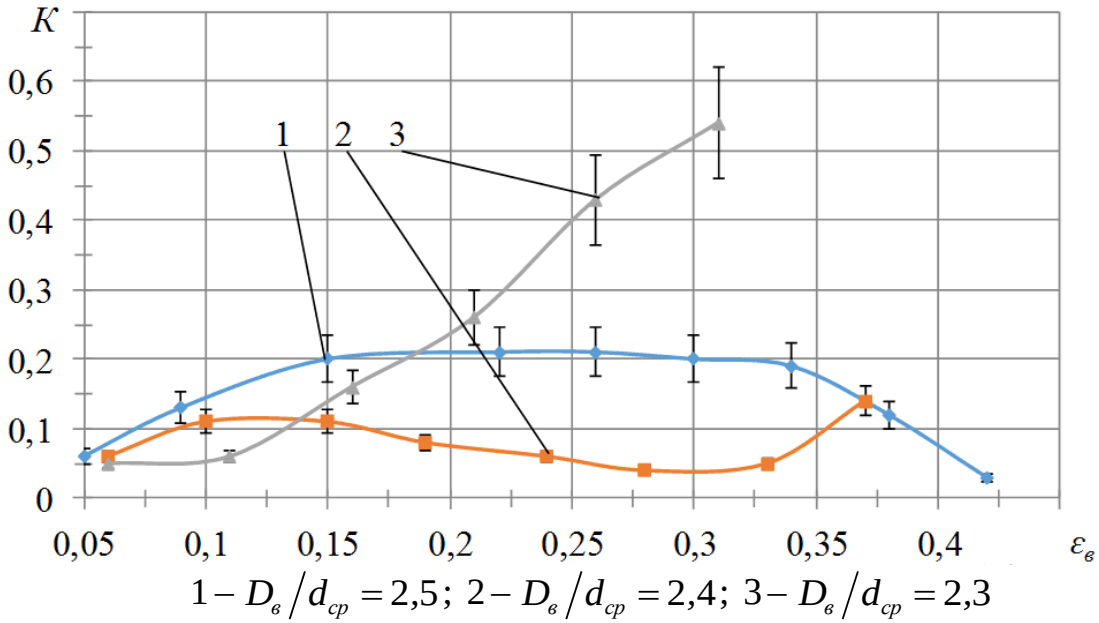



Рисунок 4.11 – Закономірності зміни конусності $K$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}85$

Для заготовки з $D_в/d_{ср}=2{,}3$ конусність одразу починає збільшуватися, через одночасне розкочування виступу та уступу, що підтверджує теоретичні дослідження п. 3.1. У цьому разі відносний діаметр з боку уступу збільшується інтенсивніше, ніж з боку виступу.

Аналізуючи змінення співвідношень діаметрів отвору поковки з боку виступу та уступу від ступеня деформування $\varepsilon$ (рис. 4.12) для різних відносних діаметрів уступу заготовки 1,85, можна відзначити, що зі збільшенням ступеня деформації $\varepsilon$ співвідношення діаметрів отвору поковки зменшується. Водночас на початковій стадії розкочування спостерігається збільшення співвідношення діаметрів для заготовок з відносними діаметрами виступу 2,5 та 2,4, що пов'язано з деформуванням виступу заготовки на початковій стадії розкочування. Співвідношення діаметрів отвору поковки для заготовки з $D_в/d_{ср}=2{,}5$ наближається до одиниці, про що свідчить зменшення

різниці між діаметрами отвору з боку виступу та уступу і, як наслідок, до зменшення конусності.

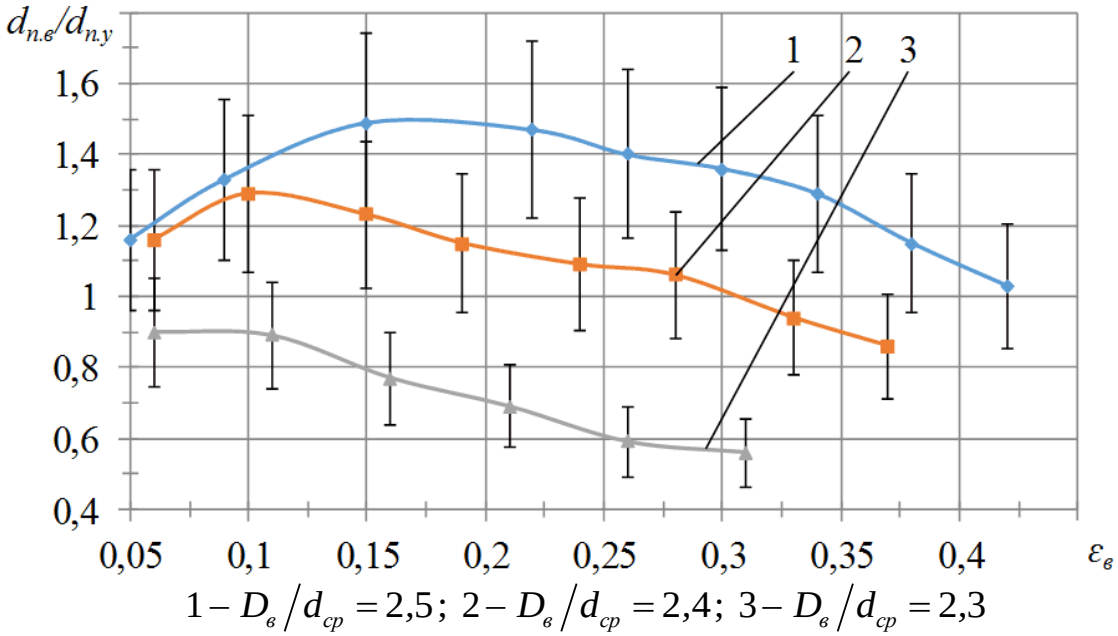


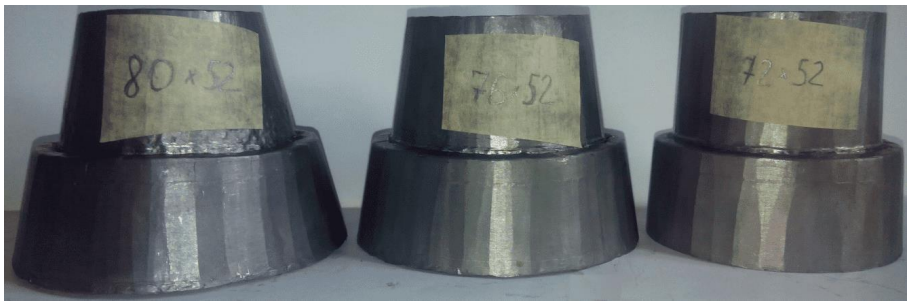

Рисунок 4.12 – Закономірності зміни співвідношення діаметрів отвору поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}85$

Крива 2 знижується нижче одиниці, що вказує на зміну напрямку конусності під час розкочування. Крива 3 не перевищує одиниці, що відповідає одночасному деформуванню виступу та уступу на початковій стадії розкочування. Через те, що інтенсивніше збільшується діаметр уступу внаслідок більшого сумарного ступеня деформацій, співвідношення діаметрів отвору знижуються.

### 4.3 Розкочування заготовки з відносним діаметром уступу $D_y/d_{ср}=1{,}65$

В результаті розкочування заготовок з відносним діаметром уступу $D_y/d_{ср}$ = 1,65 найменшу конусність мала поковка, яка була розкочена із заготовки з відносним діаметром виступу 2,3, а найбільшу – з відносним

діаметром виступу 2,5 (рис. 4.13). На відміну від попередніх експериментів для досліджуваної групи заготовок була характерна одна схема розкочування, коли на початковій стадії розкочування деформується виступ (див. рис. 4.8, а). Різниця полягала у різній висоті виступу, що впливало на ступінь деформації виступу та величину конусності.




а) б) в)

Рисунок 4.13 – Розкочені ($\varepsilon_y$=0,42)заготовки з відносним діаметром $D_y / d_{ср}$ = 1,65: а – $D_в / d_{ср}$ = 2,5; б – $D_в / d_{ср}$ = 2,4; в – $D_в / d_{ср}$ = 2,3

Різницю між відносними діаметрами отвору, як і в попередніх випадках, можна пояснити різним відносним ступенем деформації, який був розрахований за формулою 2.13. Аналіз результатів відносних ступенів деформації утворених в процесі розкочування (рис. 4.16) дозволив виявити, що зі зменшенням відносного діаметра виступу його відносний ступінь деформації зменшується. Це пояснюється зменшенням початкової товщини стінки виступу, що призвело до меншої кількості обтискань. Точки, які дорівнюють нулю, відповідають випадку, коли деформується лише виступ і в міру зменшення їх кількості уступ деформується раніше.

Аналіз експериментальних даних дозволили встановити, що збільшення відносного діаметра виступу призводить до збільшення різниці між діаметрами отвору з боку виступу та уступу (рис. 4.15), причому на початковій стадії розкочування різниця між діаметрами отвору збільшується через деформування виступу. Для заготовки з $D_в / d_{ср} = 2{,}5$ відносні діаметри отвору $d_{п.в} / L_п$ та $d_{п.у} / L_п$ в кінцевій стадії розкочування мають найбільшу різницю, причому відносні ступені деформації практично рівні (див. рис. 4.14, а).

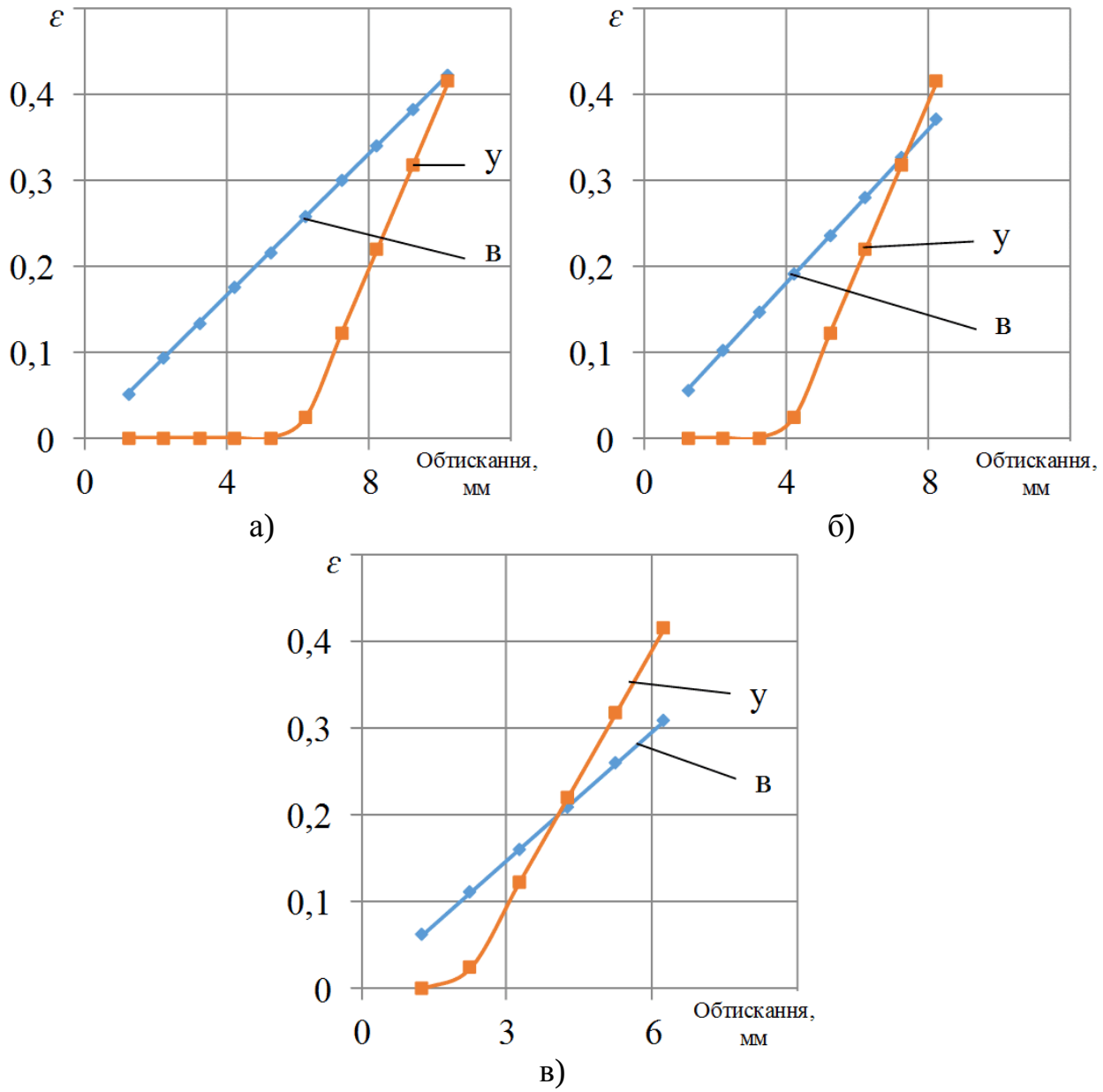



Рисунок 4.14 – Закономірності зміни відносних ступенів деформації $\varepsilon$ від обтискання для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}65$: а – $D_в/d_{ср}=2{,}5$; б – $D_в/d_{ср}=2{,}4$; в – $D_в/d_{ср}=2{,}3$

Це пов’язано з тим, що спочатку деформується виступ, а після його відносного ступеня деформації 0,25 починає деформуватися уступ. Тобто на момент деформування уступу виступ вже мав ступінь деформації рівний більше ніж половина від відносного ступеня деформації уступу за весь процес деформування. Через велику різницю між діаметрами виступу та уступу товщина стінки уступу заготовки не забезпечує необхідної кількості металу

для утворення достатнього ступеня деформації під час розкочування, щоб зменшити різницю між відносними діаметрами отвору.

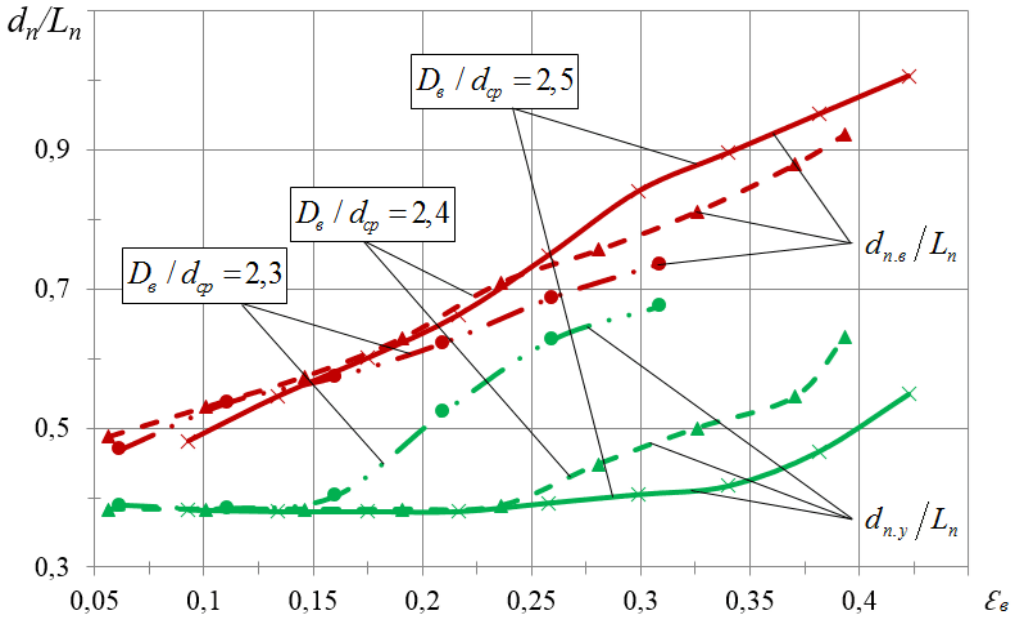



Рисунок 4.15 – Закономірності зміни відносних діаметрів отвору $d_n/L_n$ від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_y/d_{ср} = 1{,}65$

Для заготовки з відносним діаметром виступу 2,4 спостерігається подібна ситуація, але через менший діаметр виступу різниця між $d_{n.в}/L_n$ та $d_{n.у}/L_n$ в кінцевій стадії процесу розкочування менше. Завдяки меншому діаметру виступу, відповідно і меншій товщині стінки виступу, сумарний ступінь деформації виступу зменшився, а деформування уступу почалося раніше.

Для заготовки з відносним діаметром виступу 2,3, так само як в попередніх двох випадках, спочатку деформується виступ, що призводить до збільшення відносного діаметра отвору з боку виступу $d_{n.в}/L_n$. Зменшення відносного діаметра виступу заготовки призводить до зменшення його відносного ступеня деформації. Крім того, зменшується різниця між $D_в/d_{ср}$ та $D_y/d_{ср}$, що сприяє більш ранньому деформуванню уступу в порівнянні з попередніми випадками для $D_в/d_{ср} = 2{,}5$ та $2{,}4$. У виступі сформований менший ступінь деформації, ніж в уступі, що спричинило інтенсивніше збільшення діаметру отвору з боку уступу.

Отже, аналіз отриманих результатів формозміни відносних діаметрів отвору $d_{п.в}/L_п$ та $d_{п.у}/L_п$ для заготовок з $D_у/d_{ср}=1{,}65$ дозволив встановити, що зі збільшенням $\varepsilon_в$ відносні діаметри отвору з боку уступу $d_{п.у}/L_п$ збільшуються інтенсивніше, ніж з боку виступу. Проте зменшення відносного діаметра виступу заготовки $D_в/d_{ср}$ призводить до зменшення різниці між відносними діаметрами отвору поковки $d_{п.в}/L_п$ та $d_{п.у}/L_п$, що впливає формоутворення поковки. Для даної групи заготовок поковки мали конусну форму з більшим діаметром з боку виступу, на відміну від заготовок, отриманих в п. 4.1.

Аналіз отриманих результатів конусності поковки від відносного ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ (рис. 4.16) дозволив встановити, що для відносного діаметра заготовки $D_у/d_{ср}$, рівного 1,65, зі збільшенням ступеня деформації зміна конусності поковки має різний характер, як в п. 4.2. Для всіх трьох випадків, $D_в/d_{ср}=2{,}5;\ 2{,}4;\ 2{,}3$, конусність починає збільшуватися, що пов'язано з деформуванням виступу. Зменшення конусності відбувається в різний момент для всіх трьох випадків, а саме при різних $\varepsilon_в$, що пов'язано зі зміною різниці між $D_в/d_{ср}$ та $D_у/d_{ср}$. Зменшення цієї різниці сприяє тому, що уступ починає деформуватися раніше і в ньому виникає більший ступінь деформації, через що зменшується різниця між діаметрами отвору $d_{п.в}/L_п$ та $d_{п.у}/L_п$, що призводить до зменшення конусності на більш ранній стадії деформування і до меншої конусності поковки відповідно до формули 2.7.

Аналізуючи зміну співвідношень діаметрів отвору поковки з боку виступу та уступу $d_{п.в}/d_{п.у}$ від ступеня деформування $\varepsilon$ (рис. 4.17) для різних відносних діаметрів уступу заготовки при $D_у/d_{ср}=1{,}65$, можна відзначити, що для усіх співвідношень $D_в/d_{ср}$ зі збільшенням ступеня деформування $\varepsilon_в$

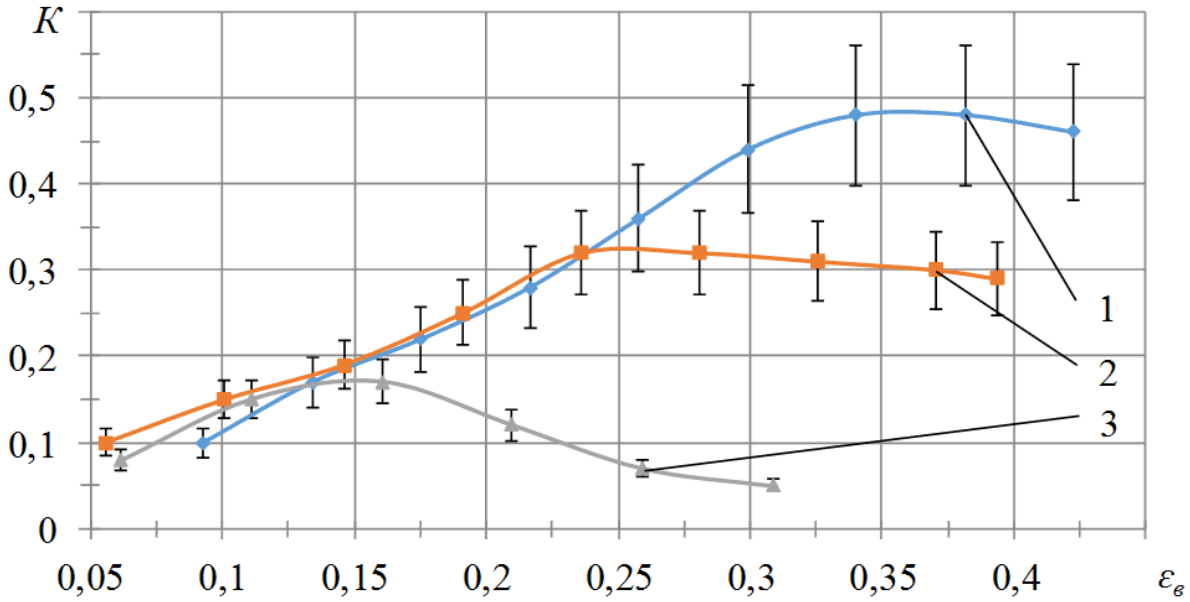



Рисунок 4.16 – Закономірності зміни конусності $K$ від ступеня деформування виступу $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}65$

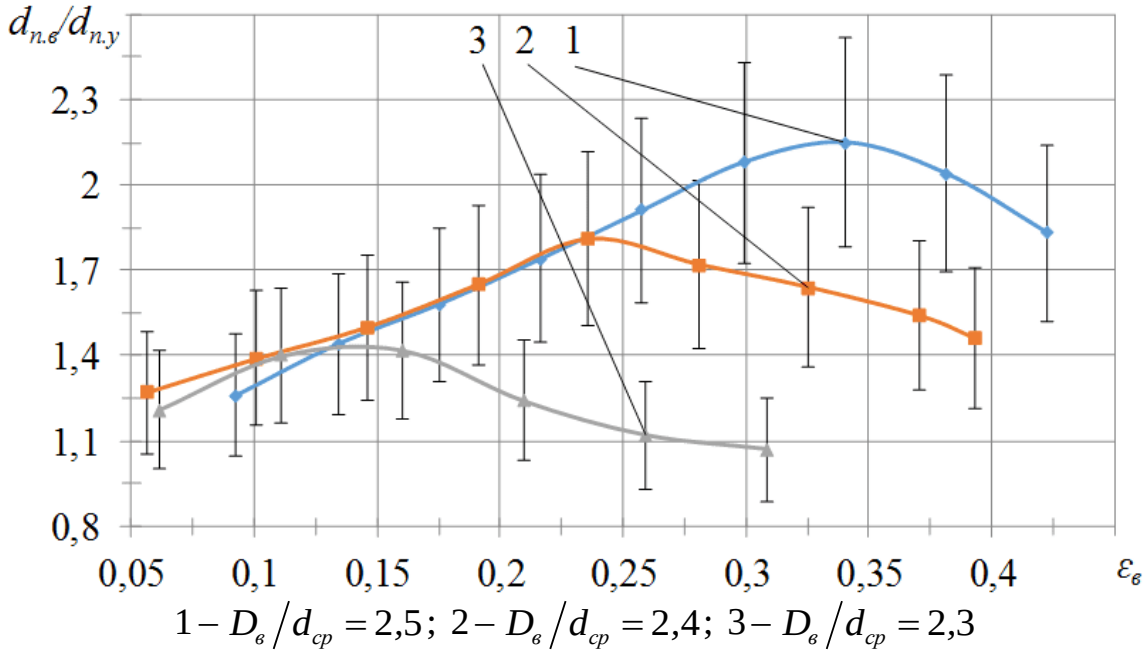



Рисунок 4.17 – Закономірності зміни співвідношення діаметрів отвору $d_{п.в}/d_{п.у}$ поковки від ступеня деформування виступу $\varepsilon_в$ для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}65$

співвідношення діаметрів отвору поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ на початковому етапі розкочування збільшуються, а надалі зменшуються. Водночас для заготовок з відносними діаметрами виступів $D_в/d_{ср}$, рівними 2,5 (крива 1) та 2,4 (крива 2), після ступеня деформації 0,33 та 0,23 відповідно, $d_{п.в}/d_{п.у}$ зменшується, що свідчить про зменшення різниць між діаметрами отвору з боку виступу та уступу внаслідок більш інтенсивного зростання діаметрів отворів з боку уступів [4.6]. Для заготовки з $D_в/d_{ср}$, рівному 2,3 (крива 3), співвідношення діаметрів отвору з боку виступу та уступу знижується практично до одиниці, що сприяє утворенню мінімальної конусності.

Для усіх трьох випадків при одночасному обтисканні виступу та уступу на однакову абсолютну величину інтенсивніше збільшується діаметр з боку уступу. Це пояснюється різним ступенем деформації металу виступу та уступу через різну товщину стінки. Як результат, уступ деформується більше, оскільки тангенціальна деформація в уступі більша. Більша тангенціальна деформація уступу призводить до інтенсивного збільшення діаметра з боку уступу [4.5].

За проведеними експериментальними дослідженнями можна зробити висновок, що змінюючи різницю між діаметрами виступу та уступу заготовки $\bar{h}$ можна регулювати напрям конусності поковки. Так для $\bar{h}$ = 0,4, що відповідає $D_y/d_{ср} = 1{,}85$ та $D_в/d_{ср} = 2{,}4$, при ступенях деформації від 0,1 до 0,3 конусність під час розкочування змінюється найменшими темпами. Отже, її легше контролювати. При $\bar{h} < 0{,}4$ отримана поковка має конусність з більшим діаметром з боку уступу, причому зі зменшенням $\bar{h}$ конусність змінюється інтенсивніше, що характерно для схем, коли на початковій стадії деформується уступ або виступ та уступ одночасно. За такої умови конусність змінюється нерівномірно. При $\bar{h} > 0{,}45$ отримана поковка має конусність з більшим діаметром з боку виступу, причому зі збільшенням $\bar{h}$ конусність змінюється інтенсивніше, що характерно для схем, коли на початковій стадії

деформується виступ. За такої умови конусність також змінюється нерівномірно.

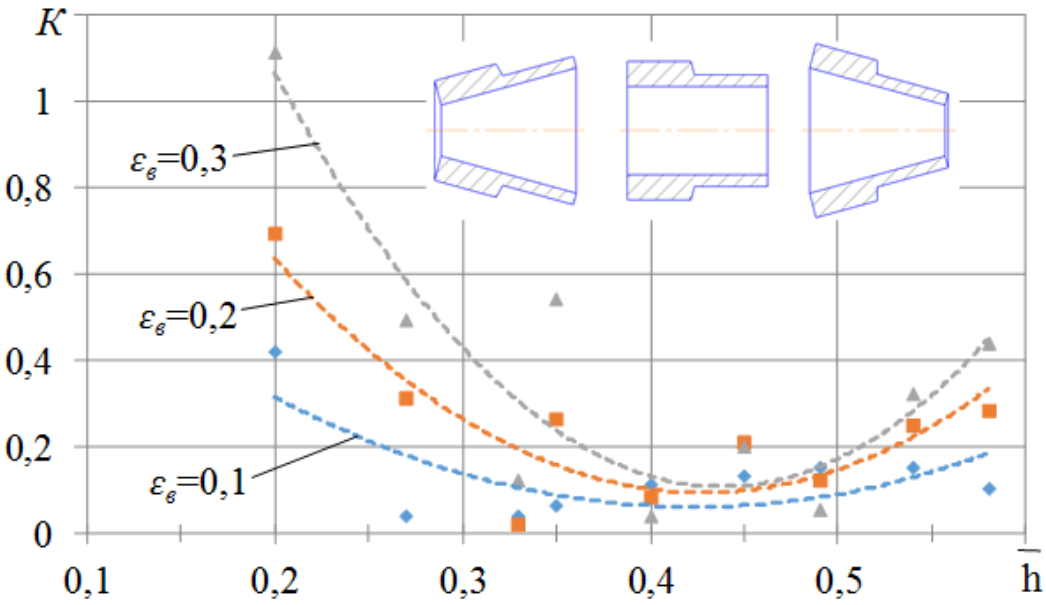



Рисунок 4.18 – Закономірність зміни конусності поковки $K$ в залежності від відносної різниці між діаметрами виступу та уступу $\bar{h}$

Відносна різниця між діаметрами виступу та уступу визначалася за формулою:

$$\bar{h} = \frac{(D_в - D_у)/2}{S_в}, \qquad (4.1)$$

де $S_в$ – товщина стінки виступу.

### 4.4 Регресійна модель процесу розкочування ступінчастих обичайок

За методикою, описаною у п. 2.3, були отримані регресійні моделі для співвідношення торцевих діаметрів отвору $d_{п.в}/d_{п.у}$, для відносного діаметра уступу $D_{п.у}/d_{п.у}$ та для відносного діаметра виступу $D_{п.в}/d_{п.в}$. Перехід від умовних параметрів до натуральних наведено у п. 2.4.

Для заготовок зі співвідношенням торцевих діаметрів отворів $d_{п.в}/d_{п.у}$ регресійна модель виглядає наступним чином:

$$d_{п.в}/d_{п.у} = 1{,}147 + 0{,}391 \times X_1 - 0{,}487 \times X_2 + 0{,}17 \times X_1 \times X_2 \times X_3 \qquad (4.2)$$

Довірчий інтервал при рівні значимості 0,05: Δb=0,17. Перевірка адекватності моделі виконувалася за критерієм Фішера: $F_{розр}=1{,}667<F_{0,05;23;27}=1{,}94$. Розрахунок наведено у додатку В.

Для побудови регресійної моделі були взяті значення експериментів у діапазоні відносного ступеня деформації від 0,1 до 0,3. Для заготовок з відносними діаметрами уступів, рівними 2,05, у вказаному діапазоні усі криві знижуються, що говорить про постійне зростання діаметру уступу. На цьому етапі деформування виступ та уступ деформуються одночасно, а в такому випадку швидше збільшується діаметр уступу, тому криві знижуються (див. додаток Д, табл. Д1, І стовпчик).

Для заготовок з відносними діаметрами уступів, рівними 1,85, верхня крива спочатку збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу (див. додаток Д, табл. Д1, ІІ стовпчик). Після ступеня деформації 0,2 при одночасному деформуванні виступу та уступу діаметр отвору зі сторони уступу починає збільшуватися інтенсивніше і співвідношення діаметрів отвору знижується, через що конусність поковки збільшується. Інші дві криві постійно знижуються, через те, що в даному діапазоні ступенів деформації виступ та уступ деформуються одночасно.

Для заготовок з відносними діаметрами уступів $D_y/d_{ср}=1{,}65$ для усіх трьох випадків спостерігається різна закономірність зміни співвідношень діаметрів отворів в діапазоні ступенів деформації від 0,1 до 0,3 (див. додаток Д, табл. Д1, ІІІ стовпчик). Для заготовки з відносним діаметром виступу, рівним 2,5, крива постійно зростає, що можна пояснити деформуванням виступу заготовки в заданому діапазоні ступенів деформації 0,1–0,3, при чому розкочування уступу не відбувається. Для заготовки з відносним діаметром виступу, рівним 2,4, крива також постійно зростає, що пояснюється деформуванням виступу заготовки. Лише після ступеня

деформації 0,25 співвідношення діаметрів отворів знижується. Для заготовки з відносним діаметром виступу, рівним 2,3, експериментальні дані знижуються, коли починається деформування уступу. В цьому випадку виступ і уступ деформуються одночасно, через що діаметр уступу збільшується інтенсивніше і це призводить до зростання конусності.

Для заготовок з відносними діаметрами уступів $D_{п.у}/d_{п.у}$ регресійна модель виглядає наступним чином:

$$D_{п.у}/d_{п.у} = 1{,}465 + 0{,}185 \times X_1 - 0{,}166 \times X_2 + 0{,}57 \times X_3 + 0{,}163 \times X_3^2 + 0{,}2 \times X_1^2 \times X_2^2 \times X_3^2 - \\ -0{,}191 \times X_2^2 \times X_3 - 0{,}16 \times X_1^2 \times X_3^2 - 0{,}147 \times X_2^2 \times X_3 + 0{,}099 \times X_1^2 \times X_2 \quad (4.3)$$

Довірчий інтервал при рівні значимості 0,05: Δb=0,09. Перевірка адекватності моделі виконувалася за критерієм Фішера: $F_{розр}=1{,}993<F_{0,05;17;27}=2{,}018$. Розрахунок наведено у додатку Г. З графіків можна встановити, що для усіх випадків відносний діаметр уступу знижується (див. додаток Д, табл. Д2). Це можна пояснити зменшенням товщини стінки поковки.

Для заготовок з відносними діаметрами виступів $D_{п.в}/d_{п.в}$ регресійна модель виглядає наступним чином:

$$D_{п.в}/d_{п.в} = 1{,}735 + 0{,}242 \times X_3 + 0{,}135 \times X_1^2 \times X_2^2 \times X_3^2 - 0{,}1 \times X_2 \times X_3^2. \quad (4.4)$$

Довірчий інтервал при рівні значимості 0,05: Δb=0,084. Перевірка адекватності моделі виконувалася за критерієм Фішера: $F_{розр}=1{,}86<F_{0,05;23;27}=1{,}94$. Розрахунок наведено у додатку Ґ.

Як і в попередньому випадку, усі криві знижуються, що говорить про постійне зменшення товщини стінки (див. додаток Д, табл. Д3).Підставляючи в отримані рівняння параметри поковки можна отримати розміри необхідної заготовки. Більш детально методика одержання заготовки описана в п’ятому розділі. Згадані математичні моделі та відхилення дійсні при $L_в/L = 0{,}4...0{,}5$.

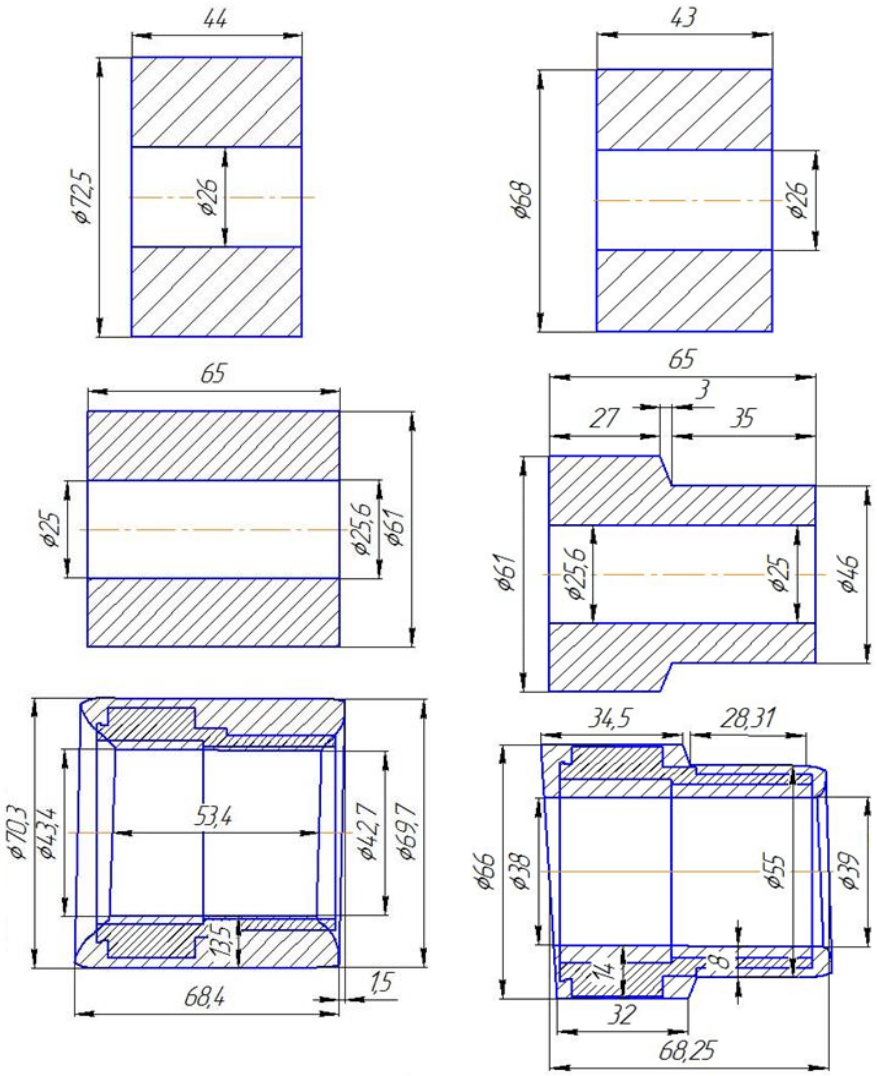
## 4.5 Дослідження механічних властивостей та структури металу на сталевих зразках

Первинну інформацію про опрацьовування структури металу після деформування, вияву переважної течії металу можна отримати після аналізу макроструктури заготовки після деформування. Відомо, що при розкочуванні метал тече переважно у тангенціальному напрямку, але в нашому випадку цікавою є пророблення металу в місці зміни товщини стінки, тому зразки були вирізані вздовж осі поковок.

Нова технологія отримання ступінчастої обичайки (рис. 4.19, а) передбачала нагрівання заготовки, протягування на оправці до Ø61 мм, нагрівання, протягування ділянки Ø46 мм, нагрівання, розкочування до потрібних розмірів. Базова технологія (рис. 4.19, б) передбачала нагрівання заготовки, протягування на оправці до Ø61 мм, нагрівання, розкочування до потрібних розмірів. Обидва зразки підігрівалися до температури 1100°С з витримкою 10 хв в електричній печі, яка розташовувалася на відстані 1м від пресу. Експеримент виконувався на однокривошипному пресі КД1426А з максимальною силою деформування 400кН та швидкістю 140 ход./хв. Обтискання складало 1 мм за прохід як при протягуванні, так і при розкочуванні. Протягування, як по новій та і по базовій технологіям, виконувалося у вирізних бойках, які були попередньо підігріті разом з оправкою до 150°С. Для розкочування застосовувалися розкочувальні стояки, дорн Ø25 мм та бойки для розкочування з відповідними профілями. Після кування заготовки (рис. 4.20, а) охолоджувалися на повітрі. Заготовки отримувалися у масштабі 1:52, що пов’язано з наявністю оснащення та габаритами робочого простору лабораторного обладнання. Надалі заготовки були оброблені механічно до потрібних розмірів (рис. 4.20, б).

Після механічної обробки вздовж обичайок були вирізані зразки для механічних досліджень. З метою запобігти розігріванню металу та зростанню зерна зразки вирізалися на мінімальних обертах (100 об/хв) на

фрезерувальному станку. Надалі для отримання механічних властивостей з однієї сторони зразки шліфувалися та замірялася твердість через кожні 4 мм за схемою наведеною на рисунку 4.21.




а) б)

Рисунок 4.19 – Послідовність операцій базової (а) та нової (б) технологій

а) б)

Рисунок 4.20 – Заготовки після кування (а) та механічної обробки (б)

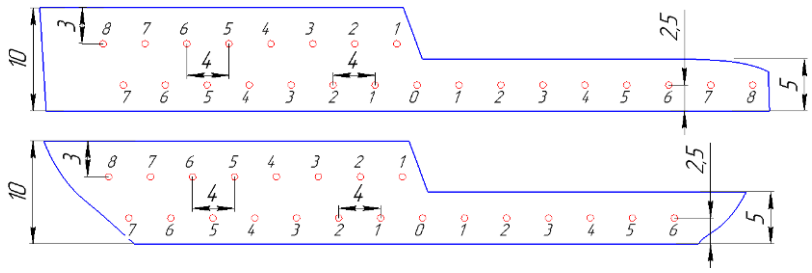
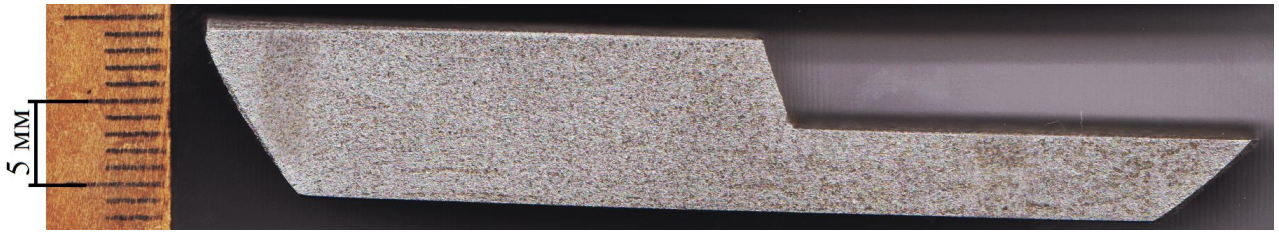


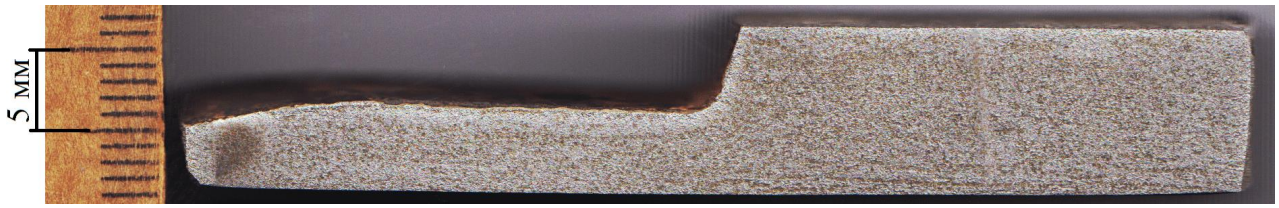
Рисунок 4.21 – Схема вимірювання твердості по Роквеллу (HRb)

Макроструктурний аналіз поковки, отриманої за базовою технологією, дозволив встановити, що виріб має направлену структуру, волокна якої паралельні осі (рис. 4.22, а, в), а поковка, отримана за новим способом, має структуру, волокна якої повторюють профіль отриманої поковки (рис. 4.22, б, г). З отриманих зображень можна бачити, що завдяки новій технології кування в місці переходу з виступу на уступ волокна металу звужуються і в уступі їхня концентрація більша, ніж у виступі. У такий спосіб після механічної обробки отримано виріб з волокнистою структурою, подібною до його контуру.

Для двох схем розкочування – з застосуванням плоского бойка та з застосуванням ступінчастого – було проведено аналіз мікроструктури (додаток Е). Місце фотографування співпадало зі схемою розташування відбитків для вимірювання твердості (див. рис. 4.21). Для першої схеми розкочування, яка передбачала деформування кільцевої заготовки плоским бойком, характерна наявність зерен перліту, оточених карбідною сіткою, що виділився по границях зерен аустеніту. Карбіди спостерігаються у вигляді сітки, що говорить про слабке пророблення металу по перерізу поковки. Для другої схеми розкочування, яка передбачала деформування заготовки зі змінною товщиною стінки ступінчастим бойком, також спостерігається наявність зерен перліту та карбідної сітки. Але на відміну від попередніх досліджень, сітка менш виражена, а зерна перліту менші за розміром. Це свідчить про більш високу проробку структури металу. Особливо різниця у розмірах зерен спостерігається в уступах поковок. Уступ поковки, який отримав додаткову деформацію під час його кування в вирізних бойках, має

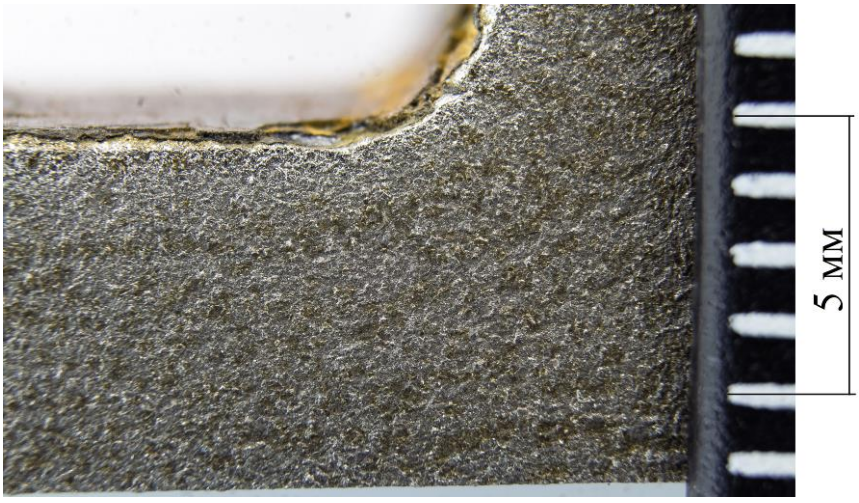



а)




б)

в)




г)

Рисунок 4.22 – Макроструктурний аналіз поковок, отриманих за базовою (а) та новою (б) технологіями та збільшені місця зміни товщини стінки для поковок, отриманих за базовою (в) та новою (г) технологіями

менші за розміром зерна перліту. У виступі поковки, що отримана за новою технологією, більш подрібнені зерна спостерігаються біля зони переходу з виступу на уступ, а ближче до торця виступу зерна більші, причому біля торця карбідна сітка є більш чіткою, що свідчить про менший ступінь деформації виступу.

Для розрахунку балу зерна були зроблені зображення мікроструктури на середньому діаметрі виступу та уступу у трьох характерних місцях (рис. 4.23). Аналіз розміру зерен дозволив становити, що в уступі поковки, яка отримана за новою технологією, зерна в уступі менші на 0,025 мм, ніж у поковці отриманою за базовою технологією, а бал зерна складає 4 одиниці проти 3. Це пояснюється більшим ступенем деформації, який утворився завдяки протягуванню уступу та розкочуванню, в той час коли базова технологія передбачала деформування цієї частини поковки тільки шляхом розкочування. У виступі поковки бал зерна для обох поковок однаковий і складає 3 одиниці, що вказує на однаковий ступінь деформації – з 20 мм товщина стінки зменшується до 14 мм шляхом розкочування.

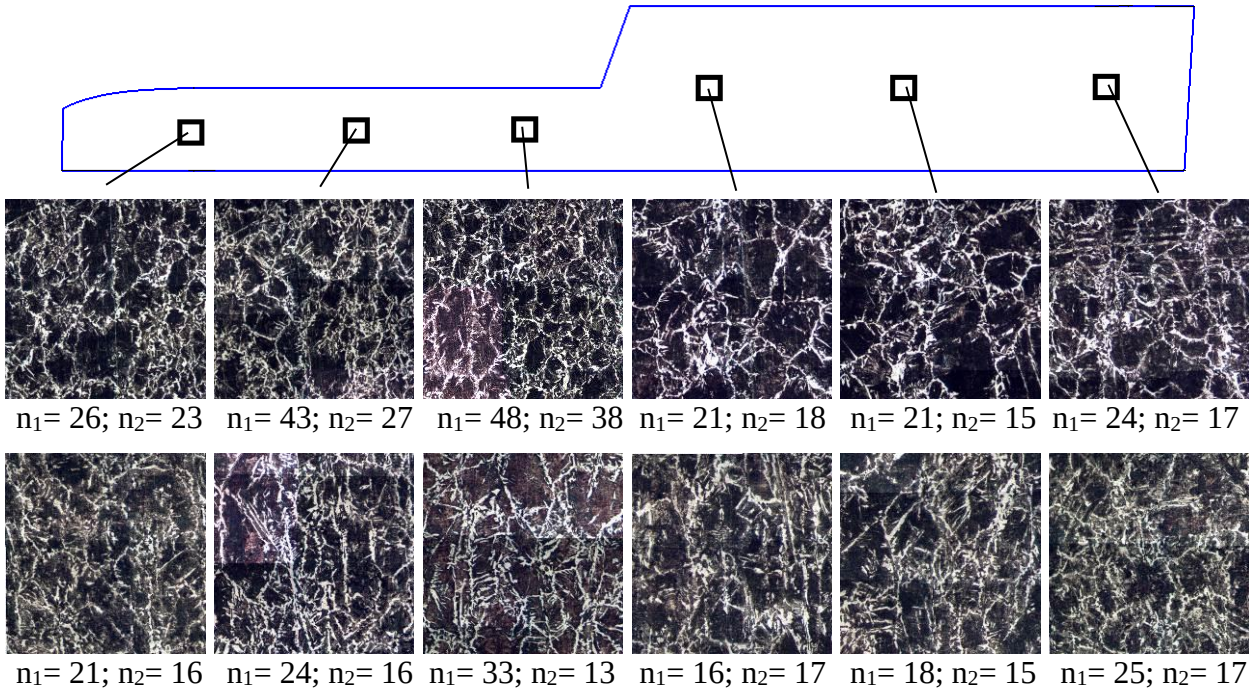



Рисунок 4.23 – Аналіз мікроструктури для поковок, отриманих за новою технологією (верхній ряд) та за базовою (нижній ряд). Збільшення х125

Вимірювання твердості є одним з широко поширених видів механічних випробувань металів. Дане дослідження проводиться, як правило, без руйнування деталі, отже, може проводитися безпосередньо на готовій деталі. Але в нашому випадку доцільно провести дослідження не на поверхні, а в тілі готового виробу. Через це були вирізані зразки для визначення твердості металу. Аналіз результатів дозволив встановити, що у виступі поковки твердість за обома способами кування приблизно однакова: для нової технології вона, в середньому, дорівнює 82,17 HRb, для базової – 82,86 HRb. Причому за новою технологією твердість у виступі збільшується від місця зміни товщини стінки до торця виступу поковки. В уступі поковки отриманої за новим способом кування твердість в середньому склала 85,4 HRb, а за базовим способом – 81,65 HRb. Це вказує на більший деформований стан уступу за новим способом, через меншу його товщину перед розкочуванням.

## Висновки

1. При розкочуванні заготовок зі змінною товщиною стінки ступінчастим бойком збільшення відносного діаметра уступу призводить до збільшення ступеня деформації уступу $D_y / d_{ср}$, що викликає збільшення діаметру з боку уступу. Збільшення відносного діаметра виступу заготовок $D_в / d_{ср}$ призводить до збільшення ступеня деформації виступу, що викликає збільшення діаметру отвору з боку виступу. Через це різниця між діаметрами виступу та уступу впливає на зміну конусності під час розкочування. Менша різниця призводить до виникнення більшого діаметру отвору з боку уступу, а більша різниця – до більшого діаметру отвору з боку виступу. Оптимальною є різниця між діаметрами 0,4 тому, що під час розкочування вона змінюється рівномірно та мінімальними темпами.

2. При розкочуванні заготовок з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср} = 2{,}05$, збільшуючи ступень деформації $\varepsilon$, збільшується відносний

діаметр отвору з боку уступу $d_{п.у}/L_{п}$, співвідношення діаметрів отворів виступу та уступу поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ зменшується. Це пояснюється інтенсивним тангенціальним напрямком течії металу при обтисканні тоншої стінки уступу. Більш того, підвищення конусності відбувається при зменшенні відносного діаметра виступу заготовки $D_{в}/d_{ср}$. Це свідчить про те, що розкочування ступінчастих заготовок відносним діаметром уступу $D_{у}/d_{ср}=2{,}05$ призводить до утворення конусності з боку уступу.

3. При розкочуванні заготовок з відносним діаметром уступу $D_{у}/d_{ср}=1{,}85$, збільшуючи ступень деформації $\varepsilon$ конусність має змінний характер. Для заготовок з $D_{в}/d_{ср}$ = 2,5 та 2,4, при деформуванні виступу конусність зростає. Зміна конусності відбувається під час одночасного розкочування виступу та уступу. Спочатку конусність зменшується, а при подальшому деформуванні збільшується, але в протилежному напрямку. Це виникає через більшу тангенціальну течію металу в уступу. Більша тангенціальна течія металу в уступі призводить до збільшення конусності при $D_{в}/d_{ср}$ рівному 2,3 на початковій стадії розкочування.

4. При розкочуванні заготовок з відносним діаметром уступу $D_{у}/d_{ср}=1{,}65$, зі збільшенням ступеня деформації $\varepsilon$ збільшується відносний діаметр отвору з боку виступу $d_{п.в}/L_{п}$, співвідношення діаметрів отворів виступу та уступу поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ збільшується. Це виникає, через те що тонка стінка уступу не отримує достатнього ступеня деформації $\varepsilon$, щоб діаметр отвору з боку уступу був рівним діаметру отвору з боку виступу.

5. На основі експериментальних досліджень на свинцевих та сталевих зразках встановлено, що найбільш сприятливим параметром заготовок для керування течією металу у тангенціальному напрямку при розкочуванні є величина сходинки $\overline{h}$ у діапазоні 0,4…0,45, завдяки чому можна отримувати поковки з мінімальною конусністю.

6. За допомогою методів статистичного аналізу були отримані регресійні моделі для розрахунку параметрів поковки, які узгоджуються з результатами експерименту на 82–91%. Отримані регресійні моделі дійсні у діапазоні ступеня деформації 0,1…0,3 та при співвідношенні довжини виступу до загальної довжини $L_в / L = 0{,}4...0{,}5$.

7. Аналіз структури дозволив встановити, що завдяки протягуванню уступу та розкочуванню заготовки зі змінною товщиною стінки ступінчастим бойком волокна металу повторюють контур виробу, що сприяє підвищенню його механічних властивостей. Насамперед твердість в уступі за новою технологією більша на 4-6 одиниці HRB, ніж за базовою. Це виникає через подрібнення кристалічної будови під час протягування уступу при отриманні заготовки для розкочування та виникненню більшої деформації в уступі при розкочуванні ступінчастим бойком.

## Список використаних джерел

4.1 Способы получения пустотелых поковок для энергетической промышленности / М. С. Косилов, Е. В. Инчаков // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2017»: Сб. тезисов докладов в 3-х томах. Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017– С. 174–175.

4.2. Марков О. Є. Алгоритми проектування технологічних процесів кування великогабаритних поковок : навчальний посібник для самостійної роботи студентів всіх форм навчання спеціальностей «Обробка металів тиском» і «Машини для обробки тиском» з дисципліни «Технологія кування» / О. Є. Марков. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – 183 с. Гриф МОНУ лист № 1/11-3998 від 21.03.2014, ISBN 978-966-379-681-9.

4.3. Дослідження формозміни та деформованого стану східчастих заготовок під час розкочування профільованим бойком / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, Є. В. Інчаков // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2017. – №5. – С. 82–88.

4.4. Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування / О. Є. Марков, М. С. Косілов, О. В. Герасіменко, С. О. Шевцов // Mechanics and advanced technologies. – 2017. – №3. – С. 47–53. – http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.115224

4.5. Моделювання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Вісник НТУ «ХПІ». Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПИ», 2017. – № 35. – С. 25–29.

4.6. Косілов М. С. Аналіз формозміни обичайок з виступом при розкочуванні профільованим бойком / М. С. Косілов, О. В. Герасіменко // Матеріали XXV МНТК студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25 – 26 квітня 2018 р., Кременчук – 2018. – С. 75–76.

# 5 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ ОБИЧАЙОК З ФЛАНЦЕМ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО КОНСТРУЮВАННЯ СТУПІНЧАСТОГО БОЙКА ДЛЯ РОЗКОЧУВАННЯ

## 5.1 Методика проектування технологічних процесів розкочування обичайок з фланцем та загальні рекомендації

Аналіз напрацювань за тематикою дисертаційної роботи дозволив встановити, що в останні роки кількість крупних поковок відповідального призначення для енергетичного машинобудування збільшується [5.1]. Це пов’язано зі збільшенням потужностей та кількості реакторних установок. Один з напрямків удосконалення технологічних процесів деформування заготовок відповідального призначення – використання складно профільованого інструменту. Використання такого інструменту дозволить змінити НДС заготовки в процесі деформування з метою інтенсифікації прооблення литої структури металу [5.2]. Зміна форми інструменту є перспективним напрямком забезпечення утворення макропотоків металу для забезпечення сприятливої анізотропії механічних властивостей [5.3].

Технологія кування ступінчастих обичайок залежить від вимог, які висуваються до деталі. Основним параметром, що визначає технологію кування, є конусність поковки, яку також можна виразити співвідношенням діаметрів отвору поковки з боку виступу та уступу $d_{п.в}/d_{п.у}$. Розробка технологічного процесу кування обичайки з фланцем шляхом використання ступінчастого інструменту зводиться до отримання необхідної заготовки для розкочування, яку у свою чергу отримують стандартними ковальськими операціями та стандартною методикою розрахунку. З цього приводу у роботі наведено алгоритм розрахунку заготовки для розкочування (рис. 5.1), який охоплює наступні етапи:

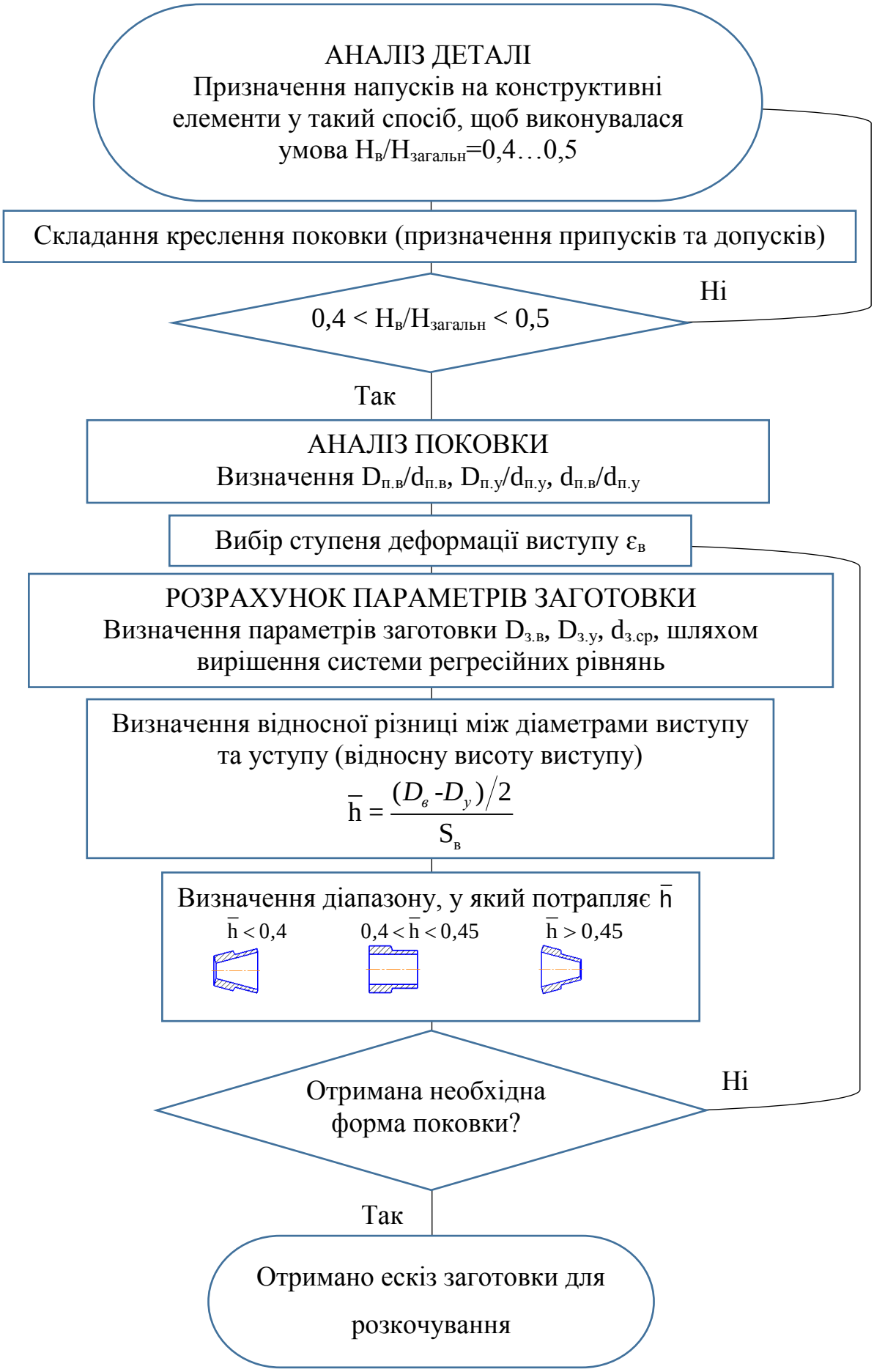



Рисунок 5.1 – Алгоритм для розрахунку заготовки для розкочування

1. Аналіз деталі, який полягає спрощенні форми деталі до двох конструктивних елементів виступу та уступу. На цьому етапі необхідним є виконання умови, при якій співвідношення довжини виступу до загальної довжини поковки знаходилося у діапазоні 0,4…0,5.

2. Складання креслення поковки згідно стандарту.

3. Після призначення припусків та визначення гарячих розмірів зміняться довжини поковки, тому необхідно перевірити умову зазначену у пункті 1, співвідношення довжини виступу до загальної довжини поковки повинно залишитися у діапазоні 0,4…0,5. Якщо умова виконується розрахунок ведеться далі, в іншому випадку необхідно повернутися до пункту 1 та змінити напуски.

4. Визначити ключові співвідношення геометричних розмірів поковки $D_{п.в}/d_{п.в}$, $D_{п.у}/d_{п.у}$, $d_{п.в}/d_{п.у}$, які необхідні для подальшого визначення розмірів заготовки.

5. Вибір ступеня деформування виступу. Під час проведення дослідження виступ заготовки деформувався в більшості дослідів з початку процесу розкочування, на відміну від уступу, тому при визначенні коефіцієнтів регресії саме він брався до уваги. Якщо брати ступінь деформації уступу, то виникає ситуація коли виступ вже деформований, а уступ ні, за такої умови заготовка має конічну форму. Тому отримані дані були б не коректні та визначали б заготовку з конусною формою. Ступінь деформації виступу повинен знаходитися у діапазоні від 0,1 до 0,3, тому що саме для цього діапазону визначалися коефіцієнти регресії.

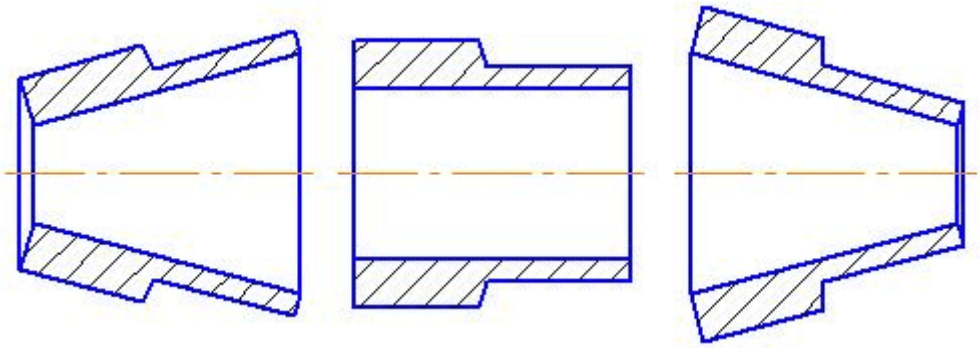
6. Розрахунок параметрів заготовки. Для розрахунку параметрів заготовки необхідно використати регресійні рівняння (4.2), (4.3), та (4.4). Вони мають три невідомих $X_1$, $X_2$, $X_3$, замість яких необхідно підставити формули 2.14 для переходу від умовних параметрів до натуральних. Вихідними даними є розміри готової поковки, конусність якої виражається співвідношенням діаметрів отвору поковки з боку виступу та уступу $d_{п.в}/d_{п.у}$. Додатковими є параметри $D_{п.в}/d_{п.в}$, $D_{п.у}/d_{п.у}$, які відповідають за зменшення товщин стінок

виступу та уступу заготовки в процесі розкочування. Отримана система рівнянь має показник ступеня деформації ε, який також визначений у п.5 алгоритму.

У системі рівнянь відомі співвідношення розмірів поковки. У такий спосіб отримуємо три рівняння з трьома невідомими – діаметром виступу заготовки, діаметром уступу заготовки та середнім діаметром отвору. Вирішивши систему з наведених рівнянь, отримуємо вищезгадані параметри заготовки $D_в$, $D_у$, $d_{ср}$. Розроблена модель дійсна для поковок зі співвідношенням висоти виступу до загальної висоти поковки $L_в / L = 0{,}4...0{,}5$. Для інших співвідношень експерименти не виконувалися. Але результати моделювання дозволили встановити, що зменшуючи цей показник, шляхом зміни довжини виступу, необхідно збільшувати діаметр виступу. Це необхідно для того, що б на початкових стадіях деформування утворити таку конусність, яка б компенсувала подальше інтенсивніше збільшення діаметральних розмірів заготовки під час деформування уступу.

7. Визначити відносну різницю між діаметрами виступу та уступу заготовки за формулою 4.1. Завдяки отриманій системі рівнянь можна розраховувати профільовані заготовки для розкочування поковок зі змінною товщиною стінки як циліндричних, так і конусних. При чому конусні поковки можуть бути з більшим діаметром з боку виступу або уступу. Основний параметр, який буде впливати на напрямок конусності поковки, це різниця між діаметрами виступу та уступу заготовки перед розкочуванням. У розділі 4 (див. рис. 4.18) було встановлено, що відносній різниці між діаметрами більший ніж 0,45 призведе до утворення конусної поковки з більшим діаметром з боку виступу, тому що у виступі буде формуватися більший ступінь деформації в порівнянні з уступом. Зменшення різниці між діаметрами виступу та уступу заготовки, призведе до утворення більшого ступеня деформації в уступі та більш інтенсивного збільшення діаметра отвору з боку уступу, а відповідно і до зміни напрямку конусності. Для ступенів деформації від 0,1 до 0,3 при відносній різниці між діаметрами від 0,4 до 0,45 буде отримана циліндрична поковка для

досліджуваних діапазонів відносних розмірів. Тому виходячи з цього можна зробити висновок, що завдяки розробленій системі регресійних рівнянь є можливість отримувати три виду поковок: перша – конусна поковка з більшим діаметром отвору з боку уступу (рис. 5.2, а), друга – циліндрична поковка з рівними діаметрами з боку виступу та уступу (рис. 5.2, б), третя – конусна поковка з більшим діаметром отвору з боку виступу (рис. 5.2, в).



а) б) в)

г)

Рисунок 5.2 – Отримувані поковки: а – з більшим діаметром з боку уступу, б – циліндрична поковка, в – з більшим діаметром з боку виступу, г – свинцеві зразки після розкочування

8. Визначити, у який діапазон потрапляє відносна різниця між діаметрами. Якщо $\bar{h} < 0{,}4$ буде отримана конусна поковка з більшим

діаметром з боку уступу, при $0{,}4 < \bar{h} < 0{,}45$ – циліндрична поковка з рівними діаметрами отвору, а при $\bar{h} > 0{,}45$ – конусна поковка з більшим діаметром з боку виступу.

9. Якщо порівнюючи $\bar{h}$ з зазначеними діапазонами форма поковки співпадає з відповідною до діапазону формою, то розміри заготовки отримано вірно і подальший розрахунок ведуть за стандартною методикою, визначаючи масу та розміри злитка, режими нагрівання та розміри по переходах. Якщо необхідна форма відрізняється від відповідної до діапазону форми, то необхідно повернутися до пункту 5 алгоритму змінити ступінь деформації та перерахувати розміри.

Якість кожної поковки залежить від заготовки, з якої вона буде отримана. В даній роботі проведено дослідження з отримання пустотілої поковки. Для такої поковки зазвичай використовується два типи злитків – звичайний та пустотілий [5.4, 5.5]. У першому розділі наведені приклади використання обох цих типів злитків для отримання продукції для атомної енергетики. Перевагами використання звичайних злитків є те, що під час утворення отвору дефекти, які зосередженні в осьовій зоні, практично повністю видаляються з тіла поковки. Залишки дефектів зосереджуються або ближче до торця або на поверхні отвору, в залежності від способу прошивання – з однієї сторони або з двох. Під час подальшого кування ці дефекти вигорають та залишаються в окалині. Також операція осаджування для прошивання підвищує сумарне уковування. Однак саме операція осаджування є найбільш енерговитратною. В залежності від марки сталі осаджування складає 40% – 50% від загального часу нагрівання. А для крупних злитків на нагрівання витрачається від 50 до 54 годин. Саме через це від неї намагаються відмовитися, як що це можливо.

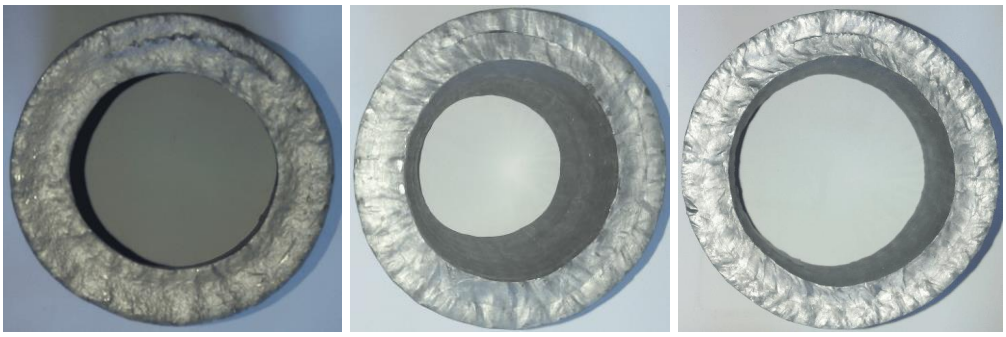
З огляду на великі витрати, насамперед енергетичні, під час використання звичайного злитка була розроблена технологія отримання пустотілих злитків. Переваги використання пустотілих злитків полягають у

знижені кількості використовуваного металу та затрачуваних енергоресурсів. Через відсутність операції осаджування значно знижується використання енергоресурсів. Відсутність операції прошивання зменшує кількість використовуваного металу, внаслідок відсутності видри, приблизно на 10%. Використання пустотілого злитка може звести технологічний процес кування до трьох виносів: протягування та рубка торців, отримання на оправці профільованої заготовки та остаточне розкочування [5.6].

Якщо у звичайному злитку дефектна зона виникає у центральній частині, по осі, то у пустотілому злитку дефекти розташовуються у середині стінки, утворюючи кільцеву дефектну зону. Але з моменту винайдення, технологія отримання пустотілих злитків була значно удосконалена, внаслідок контролю кристалізації розплавленого металу. Керування кристалізацією здійснюється двома способами [5.7]. Перший, як і у звичайному злитку, – це створити отвори у виливниці. Цими отворам подається охолоджувач, в більшості випадків вода. В цьому способі дефектна кільцева зона зміщується до середини, тобто до отвору. Другий полягає в охолодженні центральної частини. По трубі, яка утворює отвір, подається охолоджене повітря. Отже, дефектна кільцева зона зміщується до зовнішньої поверхні злитка. Тому якість отримуваних з пустотілих злитків постійно покращується. Однак, це були, в більшості випадків, поковки з постійною товщиною стінки: циліндричні або конусні.

В роботі досліджується формоутворення пустотілої поковки зі змінною товщини стінки. Під час виконання експериментів заготовки були відлиті у виливниці з кімнатною температурою та у підігріті до 200°С. В обох випадках утворювалася кільцева усадкова раковина. Після видалення прибуткової частини, в тілі заготовки залишалися пустоти, які, у свою чергу, входили у тіло поковки (рис. 5.3), що погіршує якість виробу. Тому, спираючись на результати експериментів, пустотілі злитки не рекомендується використовувати для поковок відповідального призначення. З огляду на це,

для розробки технології кування пустотілої поковки зі змінною товщиною стінки буде вирисовуватися звичайний злиток.



а) б) в)

Рисунок 5.3 – Вид усадкових раковин в поковці для заготовок з $D_y/d_{ср}=1{,}65$: а – $D_в/d_{ср}=2{,}5$; б – $D_в/d_{ср}=2{,}4$; в – $D_в/d_{ср}=2{,}3$

Білетирування злитка рекомендується виконувати за загальною технологією у комбінованих бойках, які дозволяють обробляти значний діапазон діаметрів. Попри всі недоліки такого поєднання бойків у порівнянні з вирізними бойками, вони найбільш широко використовуються під час білетирування. Використання комбінованих бойків при виконанні операції білетирування дозволяє без додаткового переналаджування виконати, вирубку блока, прикріпивши сокиру до верхнього бойка. Для додаткового пророблення металу збілетировану заготовку можна протягнути випуклими бойками. Це дозволить більше сконцентрувати осьову рихлість у середині [5.8, 5.9] і у такий спосіб отримати поковку з меншими дефектами на поверхні внутрішнього діаметра. Після того, як отримано блок, його поміщають у піч.

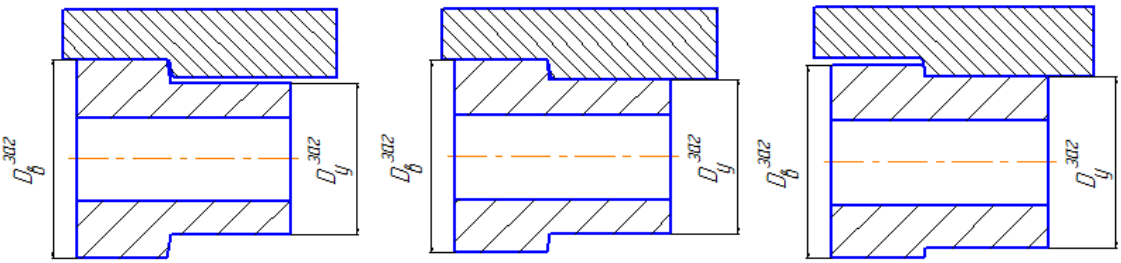
Нагрітий та витриманий при необхідній температурі вирубаний блок рекомендується осаджувати сферичною плитою, щоб запобігти утягуванню металу при прошиванні. Встановлювати блок перед осаджуванням необхідно прибутковою стороною до низу. Це пов’язано з тим, що під час прошивання осадженої заготовки усадкова раковина та осьові порожнини повністю видавилися з тіла поковки, а їхні залишки сконцентрувалися з однієї сторони поковки, яка надалі буде відрізана для проб. В залежності від співвідношення

діаметру отвору до зовнішнього діаметра осадженої заготовки вибирається суцільний або пустотілий прошивень. Задирку, що залишається після прошивання, слід відрізати газовим різаком. Осаджена та прошита заготовка кладеться у піч для подальшого нагрівання та витримки.

В залежності від того, який діаметр отвору отриманої заготовки, далі вона або розкочується до потрібного діаметру перед протягуванням на оправці або одразу протягується на оправці. Заготовка спочатку протягується на оправці до діаметра виступу заготовки $D_в$. Потім відмічається потрібна довжина бурта зі сторони меншого діаметра оправки. Далі кується уступ від відмітки до бурта. У такий спосіб заготовка легше зніметься з оправки. Після цього отримана для розкочування заготовка відправляється у піч.

Нагріта після протягування заготовка розміщується на дорні та розкочується з урахування схеми розкочування (рис. 5.4). Розкочування відбувається бойком з необхідною сходинкою або з переходом більшим ніж треба. Якщо застосовується другий варіант, то розкочування виконується до ступеня деформації уступу 0,1–0,2, після цього заготовка кладеться у піч і нагрівається до 1050°С, щоб попередити рекристалізацію та зростання зерна.

При плануванні експерименту були визначені розміри заготовок і схеми розкочування. Їх умовно можна поділити на схеми: першим деформується виступ (рис. 5.4, а), одночасне деформування виступу та уступу (рис. 5.4, б) та першим деформується уступ (рис. 5.4, в).



а) б) в)

Рисунок 5.4 – Схеми розкочування:

а – спочатку деформується виступ, б – одночасне деформування виступу та уступу, в – спочатку деформується уступ

При розкочуванні поковок за схемою, зображеною на рисунку 5.4 а, з відносним діаметром уступу $D_y / d_{ср} \le 1{,}85$ та з відносним діаметром виступу $D_в / d_{ср} \le 2{,}5$, спостерігалася різнотовщинність уступу до початку його деформування, що могло призвести до більшого розширення довжини цієї частини ніж при розкочуванні циліндричної заготовки. Це пояснюється тим, що при розкочуванні виступу отвір збільшується з відповідної сторони і поковка приймає конусну форму, а з боку уступу деформування виникає через те, що по внутрішній поверхні з цього боку поковка упирається у дорн і діаметр з цього боку також збільшується, через що стінка в цьому місці трохи збільшується. Тому, з огляду на це, пропонується виконувати розкочування поступово: спочатку деформувати заготовку бойком з величиною сходинки більшою, ніж потрібно, до розкочування ступеня деформації уступу 0,1 – 0,2. Потім бойком з необхідним профілем контуру розкочувати до потрібних розмірів.

## 5.2 Розширення технологічних можливостей отримання кільцевих поковок

Для підвищення якості отримуваних пустотілих поковок внаслідок покращення пророблення структури можна використовувати подвійне осаджування. Для цього в процесі білетирування злитку надають найбільшу увігнутість у прибутковій його частині. Після цього виконують перше осадження збілетированного злитка сферичною плитою. Осаджений злиток встановлюють на нижню плоску плиту так, щоб поздовжні їх осі були паралельні та сполучалися. Аналогічно до злитка розташовують верхній плоский бойок прикріплений до нерухомої траверси гідравлічного преса. Далі верхнім плоским бойком обтискають злиток від центру до периферії з перекриттям подач. Після повного проходу по всій поверхні злиток кантують на 180° навколо осі та знов обтискають заготовку аналогічним чином. Обтискання та кантування злитка на 180° виконують до отримання

співвідношення ширини до висоти пластини рівного 2,4-2,5. Далі заготовку кантують на 90° навколо осі, протягують плоскими бойками у поздовжньому напрямку за схемою квадрат-восьмигранник, а подальше кування на круг виконують у нижньому вирізному та верхньому плоскому бойках [5.10]. Після цього виконують рубку цапфи.

Друге осадження виконують у сферичних плитах, при чому нижня плита виконана з вставкою з глухим отвором. Хвостовик злитка спирається на дно підставної вставки з глухим отвором, розміщеної в отворі нижньої сферичної увігнутої плити з отвором для осадження, що запобігає затіканню металу з тіла злитка у хвостовик і тим самим дозволяє поліпшити умови закриття дефектів в підприбутковій частині злитка шляхом створення в ній деформацій стискання [5.11]. Крім того завдяки такому способу осадження осьові дефекти більше концентруються в осьовій зоні та надалі видаляються. Запропонований спосіб здійснюється наступним чином. На стіл преса встановлюють нижню сферичну увігнуту плиту з отвором для осадження, потім в отвір нижньої сферичної увігнутої плити з отвором для осадження укладають підставну вставку з глухим отвором. Після цього встановлюють вихідний злиток з хвостовиком в підставну вставку з глухим отвором. Далі на донну частину злитка укладають верхню сферичну увігнуту плиту для осаджування та осаджують злиток до заданого діаметра. При використанні запропонованого способу осаджування підвищується якість поковок внаслідок більшої концентрації осьових дефектів в центрі злитка, що зменшує вірогідність їх потрапляння у тіло поковки.

Друге осадження необхідно виконувати до 0,4-0,45 початкової висоти осаджуваної заготовки. Після цього осаджену заготовку знімають з плити та витягають вставку з глухим отвором. Заготовку встановлюють назад на сферичну плиту хвостовиком в отвір. Далі на заготовку встановлюють прошивень та за одне натискання пресу заготовку прошивають та проводять остаточне осаджування до потрібної висоти. В процесі прошивання видаляється неякісний метал донної та прибуткової частин заготовки разом з видрою. Остаточне осаджування забезпечує отримання прошитої заготовки

без торцевої утяжки, яка утворюється після прошивання. Це дозволяє отримати пустотілу поковку більш точних розмірів. Крім того переривання процесу осадження забезпечує більш повне протікання процесу знеміцнення, що дуже важливо при осаджуванні поковок з важко деформованих сталей та сплавів [5.12].

Одним зі способів виготовлення габаритних кільцевих деталей є складання їх з декількох напівкруглих частин, в більшості випадків 3-4. Подібні вироби застосовуються для конструкцій поворотних екскаваторів та для цементно-шиферної промисловості за допомогою нерівномірного деформування. Для виготовлення криволінійних частин можна застосовувати спосіб кування який полягає у куванні у спідку заготівки, завдяки чому їй надають трапецієподібну форму в поперечному перерізі. Далі виконують протягування плоскими бойками та обкочуванням бочкоподібності по криволінійній ширині вузьким бойком [5.13]. Здійснюється пропонований спосіб наступним чином. Збілетированний злиток протягують до пластини необхідного прямокутного перерізу та заданої довжини. Протягнуту заготівку розміщують у спідку трапецієподібної форми та обтискають її до трапецієвидної форми. Потім цю заготівку протягують у плоских бойках зі сторони більшої основи трапеції, до висоти рівній меншій основі. В результаті цього зі сторони більшої основи трапеції виникає більша течія металу, ніж з протилежної, і виникає вигин заготівки. Після цього заготівку встановлюють на нижню плиту на ребро і легкими обтисненнями прогладжують по всій ширині. Криволінійну заготівку встановлюють в підкладний штамп та частинами з поступовим поворотом обробляють до поковочних розмірів. Штамп виконується трапецієподібної форми у поперечному перерізі з метою легшого виймання. Застосування пропонованого способу кування криволінійних плит дозоляє знизити витрати металу, трудомісткість механічної обробки при виготовлені зазначених виробів, виключає використання унікальних штампів та зменшує небезпеку процесу кування.

## 5.3 Рекомендації щодо конструювання інструменту для розкочування обичайок з фланцем

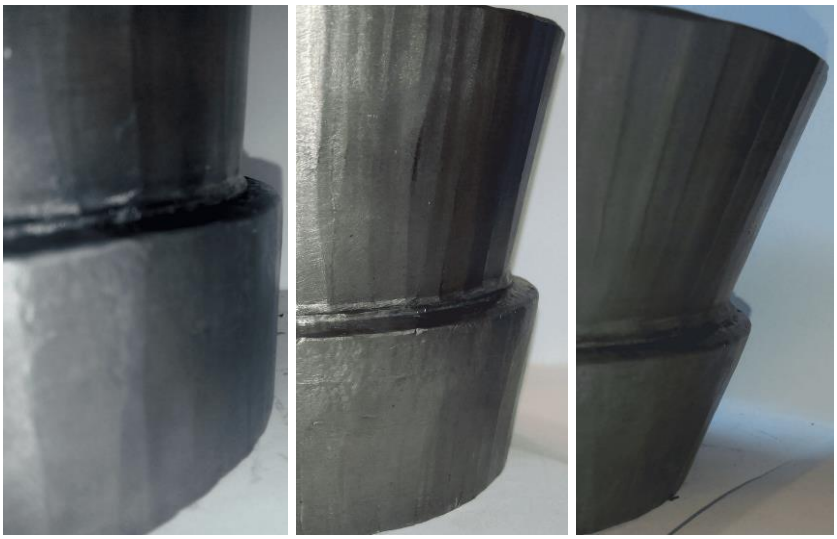
У сучасних економічних умовах будь-яке підприємство намагається розширити наявні, знайти та зайняти нові ринки для збуту своєї продукції. Це можливо здійснити, підвищивши якість пропонованої продукції та збільшивши її різноманітність, тобто розширивши номенклатуру продукції, що виготовляється. При виготовленні ступінчастої обичайки параметрами, внаслідок яких можна розширити номенклатуру виробів, є марка сталі, діаметри виступу, уступу, отвори, довжини виступу, уступу і загальна довжина. Марка сталі залежить від необхідних механічних властивостей і умов роботи деталі, тому це параметр в більшості залежить від замовника.

Під час експерименту та теоретичного дослідження для всіх трьох схем були виявлені затиски. Вони утворилися на переході уступу на виступ. Їх виникнення обумовлене кутом, під яким утворений виступ. В наведеному досліджені був використаний кут у перехідної зони 10°, як на заготовці, так і на бойку. Однак через те, що спочатку деформується виступ, в першому випадку, метал частково затікає під бойок, що спричиняє виникнення затиску. У другому випадку зажим утворюється через радіус округлення на бойку. Метал заповнює зазор між бойком та заготовкою. В третьому випадку, коли спочатку деформується уступ, збільшується конусність. З боку уступу виникає більший діаметр. Кут перехідної зони на заготовці зменшується, між бойком та заготовкою утворюється зазор, який заповнюється металом, що спричиняє виникнення затиску (рис. 5.5). З огляду на те, що для всіх схем характерною ознакою є виникнення затиску, для запобігання виникнення цього дефекту під час виконання експериментальних досліджень на сталевих зразках кут в перехідній зоні на бойку був збільшений з 10° до 20°, а на заготовці він отримувався при протягуванні уступу [5.14].

Як вже зазначалося, зменшення механічної обробки призводить до зниження собівартості продукції, а отже доцільно отримувати поковки,

найбільш наближені до форми необхідної деталі. У нашому випадку важливими параметрами для збільшення номенклатури продукції, що випускається будуть, діаметри виступу та уступу, а точніше різниця між ними. Тому слід використовувати декілька бойків, якими можна регулювати різницю між діаметрами.

При розробці нового ковальського бойка-«лягушки» було поставлено задачу удосконалення конструкції для можливості виготовлення великогабаритних обичайок зі ступінчастою зовнішньою поверхнею, для усунення напуску. Водночас форма поковки наближується до потрібної у межах припуску деталі. Це викликає підвищення механічних властивостей готової деталі внаслідок сприятливої волокнистої структури, а також для надійного кріплення робочої частини бойка до тіла бойка.



а) б) в)

Рисунок 5.5 – Затиски, утворені при розкочуванні:

а – спочатку деформується виступ, б – одночасне деформування виступу та уступу, в – спочатку деформується уступ

Поставлена задача була вирішена внаслідок того, що нижня частина тіла бойка має трапецієвидний виріз паралельний осі поковки й оправки, який розміщується по центру тіла бойка. Робоча частина ковальського бойка є змінною, водночас нижня його частина має ступінчасту форму з нахиленою

ділянкою між виступом та уступом під кутом β, який знаходиться в діапазоні 20°–30°. Форма бойка максимально наближена до потрібної форми обичайки в межах припуску деталі. Верхня поверхня робочої частини бойка має трапецієвидний виступ паралельний осі поковки й оправки, що знаходиться по центру робочої частини бойка і розміщується в трапецієвидному вирізі тіла бойка (кріплення типу «ластівчиний хвіст»), в отворах тіла та робочої частини ковальського бойка розміщується планка, яка фіксується клином.

Робоча частина ступінчастої форми дозволяє отримувати обичайки зі ступінчастою зовнішньою поверхнею, виключає напуск та знижує витрати металу. Завдяки змінній робочій частині ступінчастої форми тіло бойка є універсальним, що дозволяє зменшити парк інструмента для кування. Крім цього, змінна робоча частина ступінчастої форми, призводить до утворення у процесі розкочування сприятливої волокнистої будови у деталі, завдяки виключенню перерізу волокон при подальшій механічній обробці, що підвищує механічні властивості великогабаритних ступінчастих обичайок. Змінюючи робочу частину ступінчастої форми, яка виконана з більш міцної сталі, можна варіювати висоту та довжину виступу великогабаритних ступінчастих обичайок. Нахилена ділянка між виступом та уступом під кутом β, який знаходиться у діапазоні від 20° до 30°, запобігає утворенню затиску на виступі. Максимальна $L_y^{max}$ та мінімальна $L_y^{min}$ довжини, максимальна $H_y^{max}$ та мінімальна $H_y^{min}$ висоти змінної робочої частини ступінчастої форми залежать від розмірів великогабаритної ступінчастої обичайки. Планка запобігає руху змінної робочої частини вздовж тіла бойка під час розкочування.

На рисунку 5.6 зображено універсальний бойок для розкочування ступінчастих обичайок. У основній частині бойка 1 за допомогою «ластівчиного хвоста» розміщується зміна вставка для деформування уступу 2. Завдяки цій частині буде регулюватися різниця між діаметрами виступу та уступу та їх довжини. Кут β запобігає утворенню затиску на бурті або фланці та знаходиться у діапазоні від 20° до 30°.

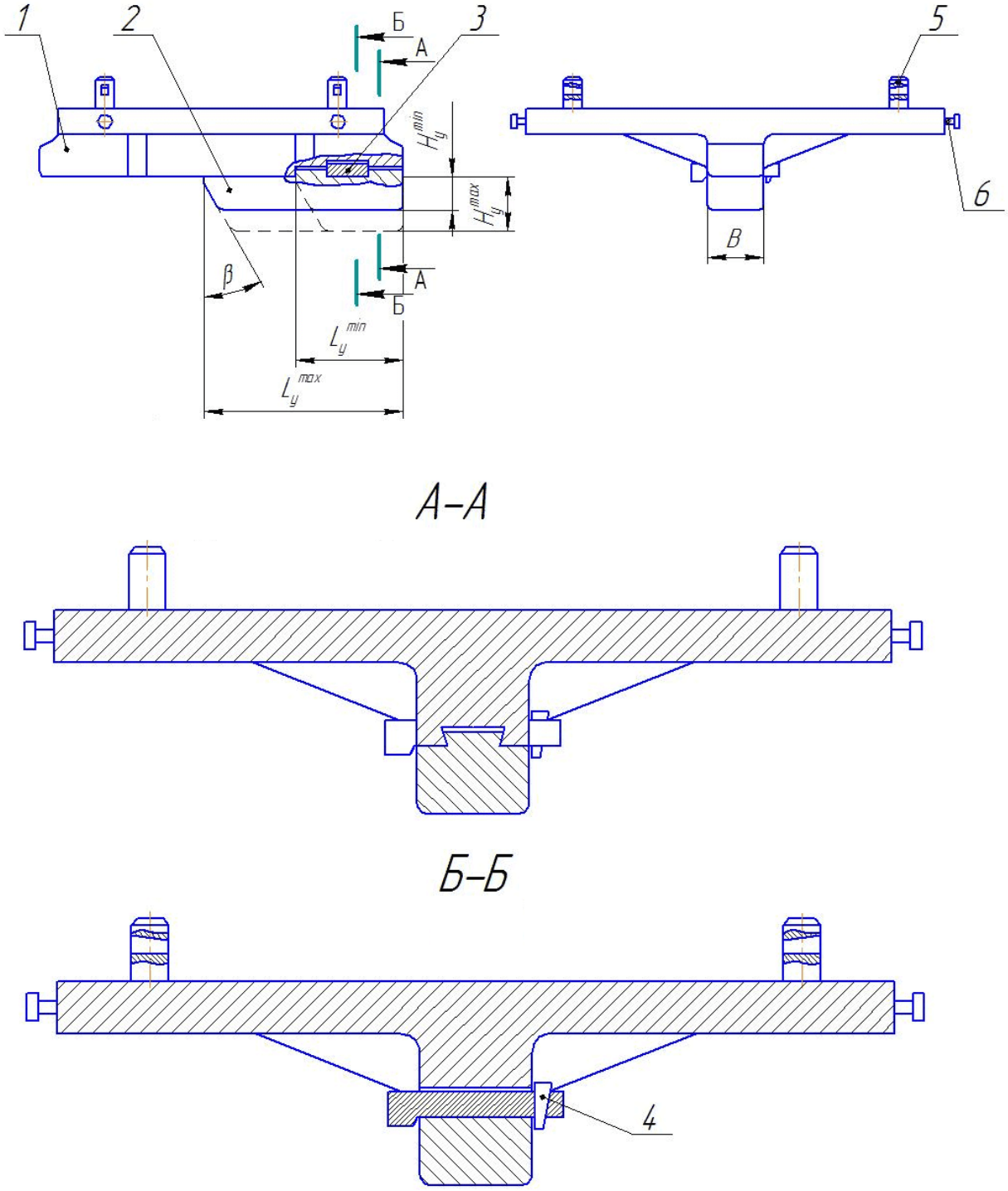



Рисунок 5.6 – Бойок для розкочування ступінчастих обичайок

Мінімальна довжина вставки $L_y^{min}$ не може бути меншою, ніж паз для з'єднання, для забезпечення стійкості інструменту. Максимальна довжина вставки $L_y^{max}$ вибирається в залежності від необхідних розмірів поковки. Максимальна $H_y^{max}$ та мінімальна $H_y^{min}$ висоти змінної планки обираються в залежності від параметрів одержуваної обичайки.

Ширина В вставки 2 дорівнює ширині основної частини бойка 1. Планка 3 запобігає руху змінної вставки 2 вздовж основної частини 1 під час розкочування. Клин 4 запобігає випадінню планки 3 під дією вібраційних сил, які виникають під час кування. Завдяки штирям 5 увесь бойок кріпиться до траверси пресу. Для транспортування і збирання бойка призначені цапфи 6.

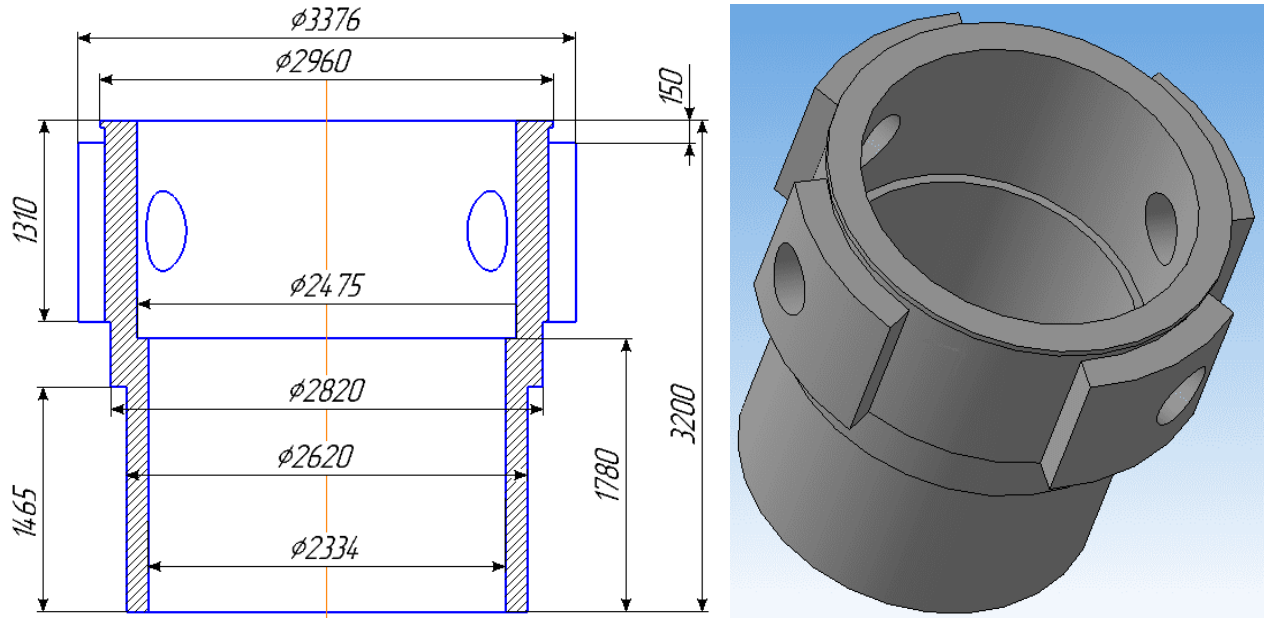
Складання ковальського бойка для розкочування великогабаритних ступінчастих обичайок виконується наступним чином. У тіло бойка 1 розміщеному на ланцюгах крану вставляється змінна робоча частина 2 з необхідними розмірами деформувальної частини. В отвори, що виконані в тілі бойка 1 та робочій частині ступінчастої форми бойка 2, вставляється планка 3, яка перешкоджає зсуву змінної робочої частини ступінчастої форми 2 вздовж тіла бойка 1. У планку 3 вставляється клин 4. Зібраний ковальський бойок кріпиться до траверси пресу за допомогою штирів 5. На столі пресу розміщуються розкочувальні стояки 8. Заготовка великогабаритної ступінчастої обичайки 6 для розкочування розміщується на циліндричній оправці 7. Після цього циліндричну оправку 7 з заготовкою розміщують на розкочувальних стояках 8, заводять під ковальський бойок та починають кування.

Застосування даного бойка дозволяє знизити металомісткість поковки завдяки зменшенню величини напусків і наближенню форми поковки до форми деталі, підвищити якість виробу внаслідок керованої течії металу та створення внутрішньої волокнистої будови, яка повторює форму деталі.

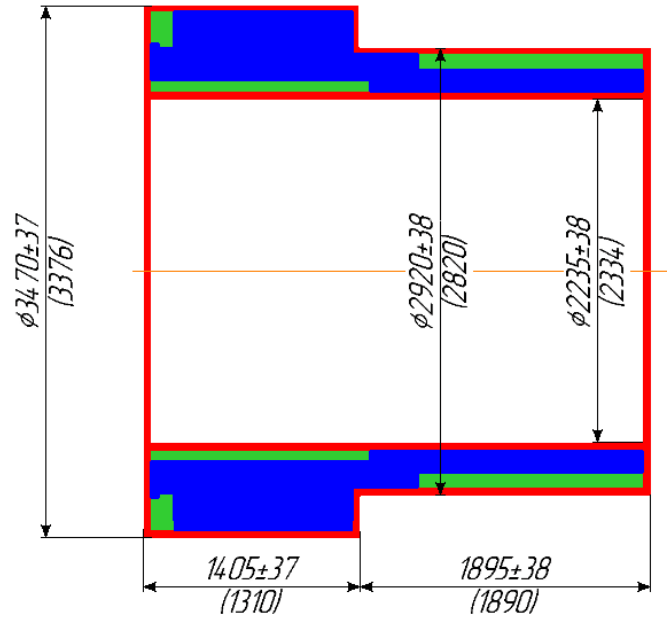
### 5.4 Розробка промислової технології кування обичайок з фланцем

Нова технологія кування ступінчастих обичайок (табл. 5.1) розроблена на прикладі обичайки зони патрубків для реакторної установки РИТМ-200 (рис. 5.7, а, б), вага якої складає 46 т. Форму деталі спрощено до двох конструктивних елементів виступу та уступу. Отже, отриманий напівфабрикат після видалення припусків буде мати наступні розміри: діаметр отвору –

2235 мм, діаметр виступу 3376 мм, довжина виступу – 1310 мм, діаметр уступу – 2820 мм, довжина уступу –1890 мм. Згідно ГОСТ 7062-90 було призначено припуски та допуски (рис. 5.7). Вага поковки склала 106,5 т, а коефіцієнт вагової точності ($М_д/М_п$) – 0,43.




а) б)




в)

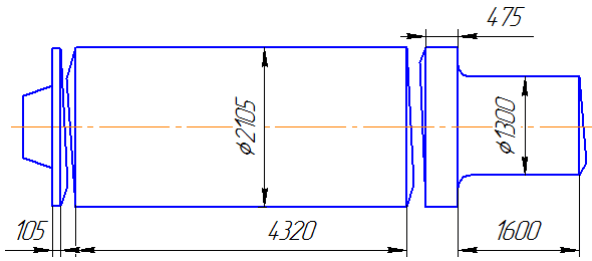
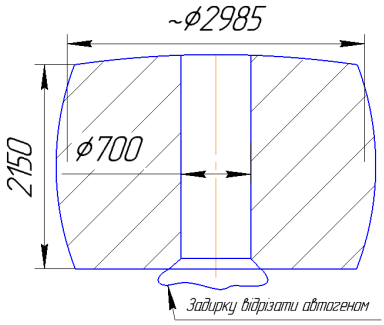
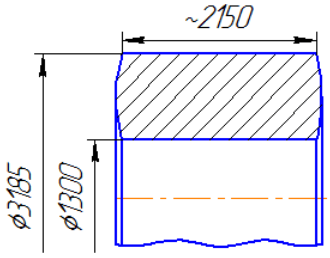
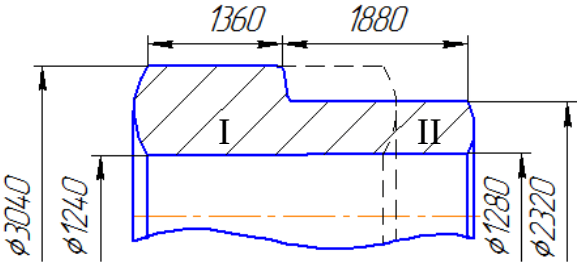
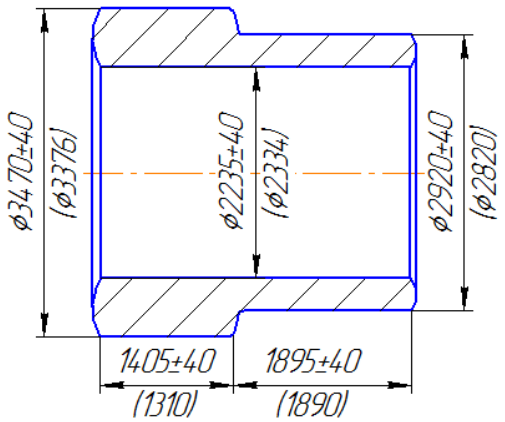
Рисунок 5.7 – Ескіз (а), 3D-модель деталі реактору (б) та розроблена поковка (в)

Наступним кроком є визначення розмірів заготовки для розкочування (табл. 5.1, 4 нагрів). Для цього необхідно використати математичну модель, яка була отримана за результатами експериментальних досліджень. Вихідними даними для отримання заготовки є розміри поковки. Під час розрахунку заготовки для розкочування необхідно враховувати сталість об'ємів, діаметр отвору заготовки та ступінь деформації. Ступінь деформації грає важливу роль тому, що від неї залежить напряму залежить формоутворення поковки через різну товщину стінок виступу та уступу. Для цього необхідно визначитися з діаметром отвору заготовки від чого будуть залежати товщини стінок виступу та уступу, а відповідно їх діаметри та різниця між ними, яка впливає на конусність поковки. Тому для визначення розмірів заготовки пропонується використовувати регресійні рівняння, які отримані на основі експериментальних досліджень. Три рівняння з трьома невідомими потрібно поєднати в систему. Через взаємодію змінних факторів, які покладені в кожне рівняння, їх вирішення є доволі складним, тому пропонується застосовувати математичні програми для їх обчислення, наприклад MathCAD.

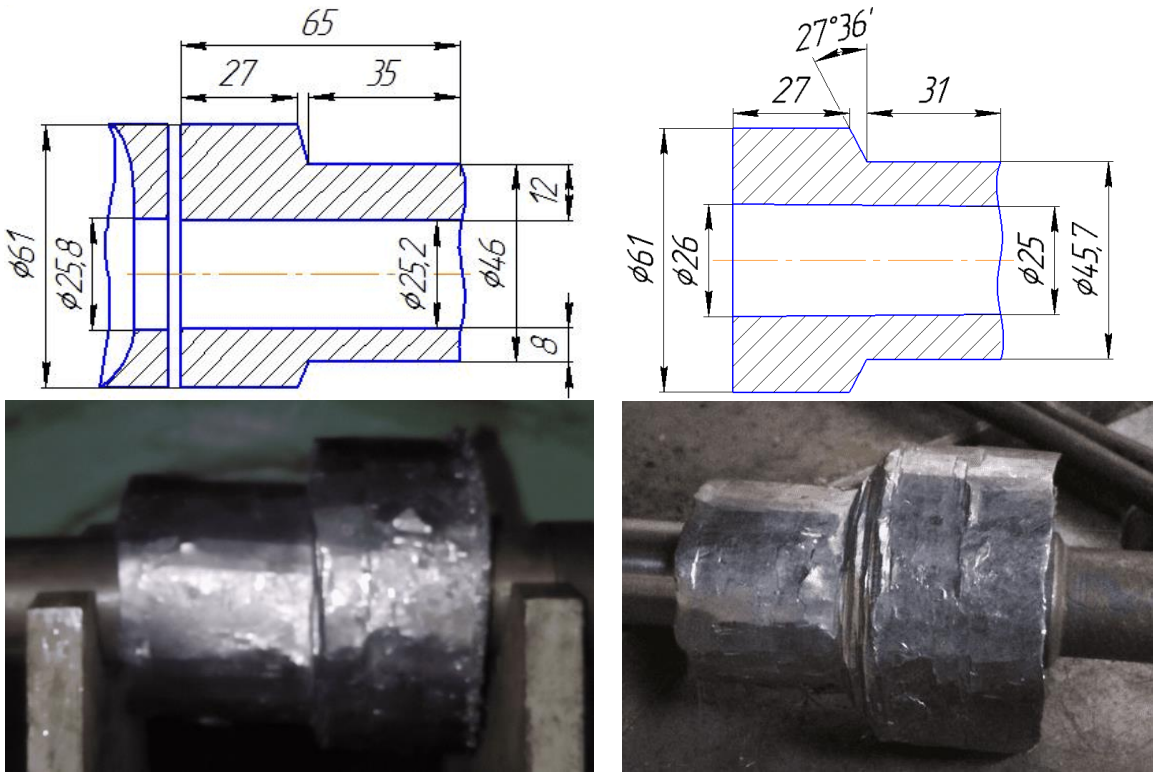
Визначившись з заготовкою необхідно перевірити її відносні розміри, а саме відносну різницю між діаметрами. Якщо вона менша чи більша, ніж 0,4…0,45, то буде утворена поковка з більшим діаметром з боку виступу або з боку уступу відповідно. Якщо відносна різниця між діаметрами знаходиться у вказаному діапазоні буде отримана циліндрична поковка, конусність якої буде знаходитися у межах припусків. Після цього, для уточнення форми поковки необхідно скористатися графіками конусності (рис. 4.3, 4.9, 4.14), які розділені в залежності від відносного діаметра уступу. За такої умови орієнтуватися потрібно на ступінь деформації виступу.

Протягування заготовки для розкочування рекомендується виконувати вирізними бойками (див. табл. 5.1, 4 нагрів). Під час підготовки до експериментальних досліджень на сталі були виконані аналогічні експерименти на свинцевих заготовках, які дозволили встановити, що використання комбінованих бойків заготовка для розкочування має різнотовщинність як

Таблиця 5.1 – Нова технологія кування обичайки з фланцем

| Найменування | Ескіз |
|---|---|
| 1 нагрівання<br>Видати злиток з печі.<br>Взяти за донний край.<br>Збілетирувати на Ø 2105 мм.<br>Відтягнути цапфу. Розвернути.<br>Обтиснути донний край. Розмітити.<br>Відрубати піддон і прибуткову частину.<br>Відправити у піч. |  |
| 2 нагрівання<br>Видати блок з печі.<br>Встановити прибутковою частиною до низу.<br>Осадити сферичною плитою до Н 2150 мм.<br>Прошити отвір Ø 700 мм.<br>Відправити у піч. |  |
| 3 нагрівання<br>Видати заготовку з печі.<br>Виконати розкочування до $Ø_{вн}$ 1300 мм.<br>Відправити у піч. |  |
| 4 нагрівання<br>Видати заготовку.<br>Одягнути заготовку на оправку Ø 1240/1290.<br>Протягнути до Ø 3040 мм, L≈2370 мм.<br>Відмітити 1360 мм.<br>Обжати ділянку II на Ø2320 мм, L≈1880 мм.<br>Відправити у піч. |  |
| 5 нагрівання<br>На дорні ступінчастим бойком виконати розкочування виступу до контакту з уступом з величиною обтискання 40…20 мм за хід пресу.<br>Виконати розкочування фланцю та уступу з одночасним обтисканням на 40…20 мм за хід пресу в міру.<br>Маркувати.<br>Передати на т/відділ. |  |

виступу, так і уступу, та їх неспіввісність (рис. 5.8, а). Застосування вирізних бойків дозволило уникнути цих недоліків (рис. 5.8, б). Зазор між оправкою і заготовкою в початковий момент кування для прискорення розміщення заготовки на оправці був рівний 0,5…1 мм, що у реальних масштабах становить 20…40 мм на сторону. Завдяки зазору отримується чиста від окалини внутрішня поверхня. Під час протягування Ø3040 мм кування на оправці ведеться у напрямку до упорного бурта, що скорочує конусність отвору поковки і полегшує сход поковки з оправлення, проте Ø2320 мм виконують від бурта. Для того, щоб заготовку можна було легше зняти, оправлення слід покривати водографітовим мастилом.

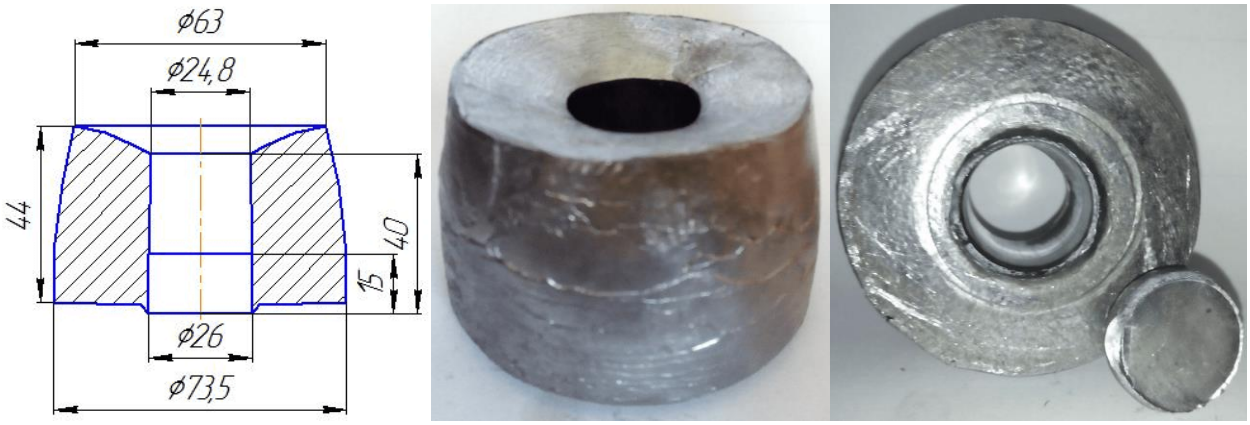



а) б)

Рисунок 5.8 – Заготовки для розкочування отримані протягуванням у комбінованих (а) та вирізних (б) бойках

При виконанні експериментів на свинцевих зразках осадження виконувалося плоскими плитами, що призвело до утяжки (рис. 5.9) під час прошивання, яка збільшилась при подальшому протягуванні уступу. Тому

осадження рекомендується виконувати сферичною плитою для запобігання отримання утяжки. Задирку необхідно відрізати автогеном тому, що вона є концентратором напружень при розкочуванні, від чого можуть виникнути тріщини. При роботі зі злитками більше, ніж 150 т, їх попередньо осаджують до D/H ≥ 0,8 – 1. Отвори більші, ніж 400…450 мм, необхідно виконувати пустотілим прошивнем [5.15].




а) б) в)

Рисунок 5.9 – Ескіз осадженої заготовки (а), утяжка (б) та задирка (в)

Для кування ступінчастої обичайки за новою технологією необхідно використати злиток масою 170 т. Коефіцієнт виходу придатного ($M_п/M_з$) складає 0,63, що пов’язано з великим прибутковим відходом та з наявністю відходу видри.

Розкочування ступінчастим бойком виконується починаючи з деформування виступу заготовки, через різницю між діаметрами виступу та уступу заготовки 360 мм при тому, що на поковці вона складає 275 мм. Тобто необхідно використовувати бойок з величиною 275 мм тому, що це кінцевий розмір. Через такий перепад виступу на заготовці та на поковці на початковій стадії розкочування між виступом та бойком буде зазор. Дорн повинен мати діаметр 0,85 – 0,95 від діаметра отвору заготовки для меншого розширення. При розкочуванні виступу на початковій стадії його діаметр буде збільшуватися і буде утворюватися конусна поковка. В міру зменшення

товщини виступу починає деформуватися уступ. Розкочування слід проводити зі ступенем деформації виступу 0,05, завдяки цьому довжина виступу суттєво не збільшиться, що було встановлено при виконанні експериментальних досліджень.

При одночасному однаковому абсолютному деформуванні виступу та уступу внутрішній діаметр з боку уступу буде збільшуватися інтенсивніше, через більший ступінь деформації. На цій стадії кування необхідно робити невеликі натискання і ретельно контролювати внутрішній діаметр з боку виступу та уступу, через інтенсивніше збільшення внутрішнього діаметра з боку уступу може утворитися поковка з конусністю протилежною той, що утворювалась на початку процесу розкочування при деформуванні виступу [5.16]. На дану технологічну операцію отримано патент на корисну модель №122773.

Запропонована технологія кування дозволяє значно заощадити на використовуваному металі. Зазвичай подібні деталі отримують нариваючи напуском частину II (рис. 5.10). Потім за допомогою механообробки отримують необхідну форму. Наступні розрахунки вказують на те, що використовуючи запропоновану технологію кування при виготовленні виробу вагою 46 т економія металу складає 28,6% внаслідок зменшення напуску:

– об'єм поковки за новою технологією

$$V_н = \frac{3,14}{4} \times [(D_в^2 - d^2) \times H_в + (D_в^2 - d^2) \times H_в];$$

$$V_н = \frac{3,14}{4} \times [(3470^2 - 2235^2) \times 1405 + (2920^2 - 2235^2) \times 1895] =$$

$$= \frac{3,14}{4} \times [9899173375 + 6691576625] = 13023738750 \ мм^3;$$

– об’єм поковки за базовою технологією

$$V_б = \frac{3,14}{4} \times [(D^2 - d^2) \times H$$

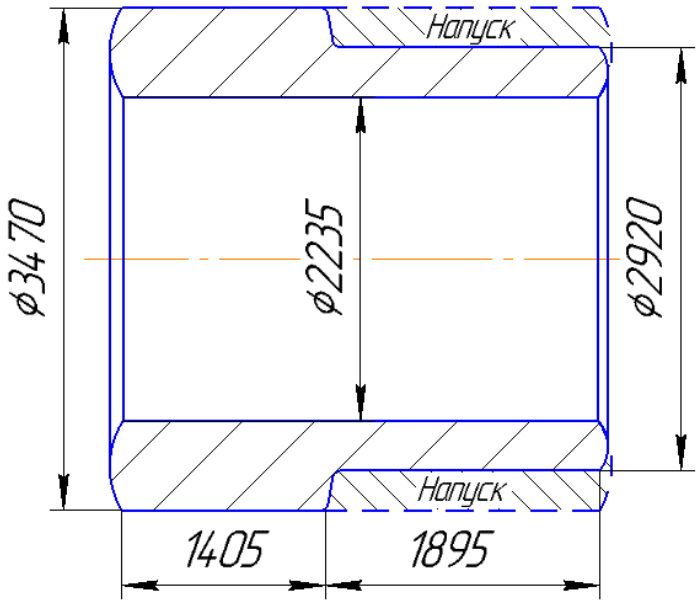



Рисунок 5.10 – Порівняння базової поковки та нової

$$V_б = \frac{3,14}{4} \times [(3470^2 - 2235^2) \times (1405 + 1895) = 18251821088 \ мм^3;$$

– об’єм та маса напуску

$$V_{напуск} = V_б - V_н = 18251821088 - 13023738750 = 5228082338 \ мм^3;$$

$$M_{напуск} = 5228082338 \times 7,8 \times 10^{-6} = 40779,04 \ кг;$$

– відсоток напуску у поковці за базовою технологією

$$\frac{V_{напуск}}{V_б} \times 100\% = 28.6\%.$$

Зі збільшенням різниці між діаметрами виступу та уступу ці показники економії будуть збільшуватися. Завдяки зміні форми поковки в цілому собівартість виготовлення пустотілих деталей з односторонніми виступами знизилася на 10-15% в умовах виробництва ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», що підтверджено актом впровадження (Додаток Є).

## Висновки

1. Надані методика та рекомендації щодо проектування технологічного процесу кування обичайки з фланцем, які полягають у використанні регресійної моделі для розрахунку розмірів заготовки перед розкочуванням, що дозволяє знизити металомісткість поковки. Встановлені основні дефекти, які виникають під час розкочування ступінчастим бойком, та надано рекомендації, щодо їх усунення, які полягають у збільшені кута нахилу ділянки між виступом та уступом до 20°–30°. Рекомендації були використані при розробці нової конструкції бойка.

2. Наведені способи розширення технологічних можливостей для отримання кільцевих поковок, які полягають в удосконаленні операції осаджування, завдяки чому створюється більш жорстка схема напруженого стану, що сприяє концентрації осьових дефектів у центрі заготовки, та отриманні напівкруглих поковок, з яких можна виготовляти складені кільцеві вироби великих діаметрів. Завдяки запропонованим способам підвищується якість та номенклатура кільцевих виробів, які виготовляються.

3. Надано рекомендації щодо конструювання, складання та промислового застосування універсального інструменту для розкочування поковок зі змінною товщиною стінки, які полягають у застосуванні змінної вставки ступінчастої форми, що дозволяє збільшити номенклатуру пустотілих поковок та зменшити величину напусків для різних типорозмірів обичайок.

4. Розроблені та передані для промислового освоєння технологічні рекомендації для виготовлення пустотілих поковок на ЧАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». Застосування запропонованої технології внаслідок зменшення металоємності поковки призводить до значної економії ресурсів. Завдяки зміні форми поковки в цілому собівартість виготовлення пустотілих деталей з односторонніми виступами знизилася на 10 – 15% в умовах виробництва Новокраматорського машинобудівного заводу. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі, в розрахункових та проектних роботах студентів та магістрів спеціальностей ОМТ та МПФ.

## Список використаних джерел

5.1. Дослідження впливу технологічних параметрів осадки на механічні властивості та мікроструктуру поковок зі сталі / В. Л. Чухліб, А. В. Ашкелянець, А. О. Ящук, А. Ю. Борисенко // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер. : Машинобудування. – 2012. – № 66. – С. 116–120. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2012_66_21

5.2. Simulation of the new technology of forging of blanks such as slabs and plates made of ferrous metals and alloys / A. Naizabekov, S. Lezhnev, O. Krivtsova [et al.] // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. – 2014. – №2. – P. 75–80. – Режим доступу: http://jamme.acmsse.h2.pl/vol62_2/6224.pdf

5.3. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model / F. Chao, C. Zhenshan, L. Mingxiang [et al.] // Journal of materials processing technology. – 2016. – №237. – P. 371–385.

5.4. Розробка нових заготовок для поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, О. В. Герасименко, М. С. Косілов, С. О. Шевцов // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві: матеріали VI МНТК, 25–28 вересня 2017 р. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – 88 с.

5.5. Разработка новых заготовок для поковок ответственного назначения / О. Е. Марков, А. В. Герасименко, М. С. Косилов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – №2. – С. 124–130.

5.6. Современные тенденции изготовления тонкостенных пустотелых поковок для энергетической промышленности / О. Е. Марков, А. И. Лобанов, М. С. Косилов [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – №1. – С. 5–10.

5.7. Ichiki T. Cooling-Water Circulation Core for Casting Hollow Ingots / T. Ichiki, K. Miyamoto, K. Katou // Furukawa Review. – 2001. – №20. – P. 95–100.

5.8. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state / O. E. Markov, A. V. Perig, M. S. Kosilov

[et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2017. – №39. – P. 4649–4665. – https://doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y

5.9. Влияние угла клиновых бойков 160° на схему напряженного состояния поковки в процессе протяжки / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, П. П. Ризак // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2016. – №2 (43). – С. 51–56.

5.10. А. с. 742020 СССР, МПК B 21 J 1/04. Способ ковки поковок / П. П. Кальченко, В. П. Быков, В. О. Кононенко, Ю. А. Грушко. – 2607485/25-27 ; заявл. 25.04.78 ; опубл. 25.06.80, Бюл. №23. – 2 с.

5.11. Пат. 117176 Україна, МПК B 21 J 5/00 (2017.01). Спосіб кування опорних валків / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, М. С. Косілов, А. В. Коляденко ; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № 201609278; заявл. 05.09.2016; опубл. 26.06.2017, бюл. № 12. – 4 с.

5.12. А. с. 682312 СССР, МПК B 21 J 5/00, B 21 K 1/38. Способ изготовления пустотелых поковок / А. В. Котелкин, В. А. Петров, В. К. Воронцов, Ю. А. Холодаев, В. Н. Посаженников, Б. О. Темкин, В. Ф. Касатонов, В. С. Стрелков, Э. Л. Рагинский, Н. С. Жарницкий. – 2606315/25-27 ; заявл. 17.04.78 ; опубл. 30.08.79, Бюл. №32. – 2 с.

5.13. Пат. 118042 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб кування криволінійних плит / П. П. Кальченко, О. Є Марков, М. С. Косілов, А. О. Шарун ; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612114; заявл. 29.11.2016; опубл. 25.07.2017, бюл. № 14. – 5 с.

5.14. Дефектоутворення на обичайках з одностороннім уступом під час розкочування профільованим східчастим інструментом / М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. Є. Марков, А. С. Хващинський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2018. – №2(109). – С. 41–47. – DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2. – P. 41–47.

5.15. Марков О. Є. Алгоритми проектування технологічних процесів кування великогабаритних поковок : навчальний посібник для самостійної

роботи студентів всіх форм навчання спеціальностей «Обробка металів тиском» і «Машин для обробки тиском» з дисципліни «Технологія кування» / О. Є. Марков. – Краматорськ : ДДМА, 2014. –183 с. – ISBN 978-966-379-681-9.

5.16. Пат. 122773 Україна, МПК (2006) B 21 J 5 / 00. Спосіб кування кільцевих поковок зі ступінчастою поверхнею / О. Є. Марков, О. І. Лобанов, М. С. Косілов, А. О. Шарун, Є. В. Інчаков, заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № 201707819; заявл. 25.07.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2. – 4 с.

# ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена актуальному науково-технічному завданню з розширення можливостей процесів кування на гідравлічному пресі внаслідок використання профільованого інструменту для підвищення ефективності виготовлення виробів з профільованою поверхнею шляхом наближення форми поковки до форми деталі, що призводить до удосконалення процесу розкочування на основі профілювання поверхні пустотілих поковок, в результаті чого зменшується їх металомісткість, підвищується якість завдяки керованій течії металу та розширюється їх номенклатура.

1. Аналіз літературних джерел дозволив визначити, що ковані обичайки з фланцями та буртами набувають все більшого застосування у конструкціях реакторів АЕС оскільки подовжують строк їх роботи. Встановлено пріоритетні напрямки та завдання для виготовлення крупних кільцевих поковок, які полягають у застосуванні профільованого інструменту, який дозволяє підвищити якість виробів внаслідок отримання направленої волокнистої структури та зменшити матеріальні витрати.

2. Комп’ютерне моделювання процесу розкочування пустотілої поковки зі змінною товщиною дозволило визначити НДС та параметри процесу, які найбільше впливають на формоутворення при деформуванні. Встановлено, що зміна геометричних параметрів, ступеня деформації та схем деформування впливають на режими досліджуваних процесів розкочування, які відрізняються кількістю зон в осередку деформації.

3 Під час одночасного деформування виступу та уступу заготовки, різниця між відносними діаметрами яких дорівнює 0,43, поковка має конусну форму з більшим діаметром з боку уступу, що пояснюється більшою ступеню деформації в уступу, ніж у виступі. При розкочуванні заготовки з різницею відносних діаметрів 0,58, до ступеня деформації виступу $\varepsilon_в$ = 0,2 уступ не деформується й утворюється конічна поковка з більшим діаметром з боку виступу. При $\varepsilon_в > 0{,}2$ починає деформуватися уступ, що призводить зменшення

конусності через інтенсивніше збільшення діаметра уступу. В обох випадках інтенсивніше збільшення діаметра уступу пояснюється тоншою стінкою уступу, в якій формується більший ступінь деформації.

4. Експериментальні дослідження на модельних зразках дозволили встановити, що зі зміною різниці між діаметрами виступу та уступу заготовки (величиною сходинки) $\bar{h}$ змінюється форма і величина конусності поковки. При $\bar{h}$ > 0,45 буде отримана конусна поковка з більшим діаметром з боку виступу, а при $\bar{h}$ < 0,4 – з боку уступу. При відносній різниці у діапазоні 0,4…0,45 спостерігається мінімальна зміна конусності для усіх ступенів деформації. Це дозволяє розширити номенклатуру кільцевих виробів та підвищити їх точність.

5. За результатами експериментальних досліджень на свинцевих зразках на основі регресійного аналізу були отримані регресійні рівняння для визначення відносного діаметра виступу поковки, відносного діаметра уступу поковки та співвідношення діаметрів отвору з боку виступу та уступу поковки від відносного діаметра виступу заготовки $D_в / d_{ср}$, відносного діаметра уступу заготовки $D_у / d_{ср}$ та ступеня деформації $\varepsilon$. Отримані регресійні рівняння дійсні для $D_в / d_{ср}$ = 2,5… 2,3; $D_у / d_{ср}$ = 2,05…1,65 та $\varepsilon_в$ = 0,1…0,3 та при співвідношенні довжини виступу до загальної довжини $L_в / L = 0{,}4...0{,}5$.

6. Аналіз макро- та мікроструктури кільцевої поковки зі змінною товщиною стінки зі сталі ХВГ дозволив встановити, що завдяки використанню пропонованого способу кування, який полягає у протягуванні уступу у вирізних бойках та подальшому розкочуванні отриманої заготовки ступінчастим бойком, волокна металу повторюють контур деталі. Зерна в уступі за новою технологією менші на 0,025 мм, ніж за базовою, а бал зерна складає 4 та 3 одиниці відповідно, що сприяє підвищенню його механічних властивостей. Насамперед твердість в уступі за пропонованим способом більша на 4-6 одиниці HRb, ніж за базовою, яка полягала у розкочуванні пустотілої заготовки прямокутного перерізу плоским бойком. Зміна твердості виникає через більше подрібнення кристалічної будови

при використанні запропонованого способу кування завдяки протягуванню уступу та виникненню більшої деформації в уступі при розкочуванні.

7. На основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлена зміна НДС, що дозволило виявити дефект у вигляді кільцевого затиску, який виникає на перехідній зоні біля основи виступу під час розкочування ступінчастим бойком. Встановлено, що на утворення дефекту впливають геометрія зони зміни товщини стінки, кут нахилу на інструменті та схема деформування. Зі зменшенням величини сходинки розмір затиску зменшується. Надано рекомендації, щодо усунення дефектів, які були використані при розробці конструкції ступінчастого бойка для розкочування, які полягають у збільшені кута ступінчастого переходу до 20°.

8. На основі результатів досліджень розроблені рекомендації та методика проектування технологічних процесів кування обичайок з фланцем, яка полягає у розкочуванні профільованої заготовки ступінчастим бойком. На спосіб розкочування заготовок ступінчастим бойком отримано патент на корисну модель. Розроблено універсальний інструмент для розкочування, який розширює номенклатуру отримуваних кільцевих виробів завдяки змінній вставці, що дозволяє зменшити величину напусків шляхом варіювання висоти перехідної зони.

9. Методичні матеріали та рекомендації з проектування технологічного процесу та бойка для розкочування кільцевих поковок передані для промислового освоєння. Завдяки зміні форми поковки собівартість виготовлення пустотілих деталей з односторонніми виступами в цілому знизилася на 10-15% в умовах виробництва ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», що підтверджено актом впровадження. Розрахунки дозволили встановити, що завдяки отриманню обичайки з фланцем використання металу зменшується на 28,6% в порівнянні з отриманням обичайки прямокутного профілю. Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються студентами кафедр ОМТ та МПФ при виконанні проектних та практичних робіт.

# ДОДАТКИ

# ДОДАТОК А

## Список публікацій здобувача:

1. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state / O. E. Markov, A. V. Perig, M. S. Kosilov [et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2017. – №39. – С. 4649–4665. – https://doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y

*Автор виконав аналіз деформованого стану поковок на основі математичного моделювання.*

2. Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування / О. Є. Марков, М. С. Косілов, О. В. Герасіменко, С. О. Шевцов // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №3. – С. 47–53. – http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.115224

*Автор виконав моделювання процесу розкочування пустотілої поковки.*

3. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2. – С. 85–91. – DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575

*Автор виконав моделювання процесу розкочування пустотілої поковки з фланцем та проаналізував деформований стан поковки.*

4. Аналіз формозміни та деформованого стану тонкостінної трубної заготовки за новим способом деформування / О. Є. Марков, А. О. Шарун, О. В. Герасіменко, М. С. Косілов // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – №1 (82). – С. 28–33. – http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.112353

*Автор виконав аналіз деформованого стану трубної заготовки.*

5. Дослідження формозміни та деформованого стану східчастих заготовок під час розкочування профільованим бойком / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, Є. В. Інчаков // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2017. – №5. – С. 82–88.

*Автор виконав моделювання процесу розкочування поковок з виступом та провів експерименти на свинцевих зразках.*

6. Дефектоутворення на обичайках з одностороннім уступом під час розкочування профільованим східчастим інструментом / М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. Є. Марков, А. С. Хващинський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2018. – №2(109). – С. 41–47. – DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.p1.41-47

*Автор виконав експериментальні дослідження на свинцевих зразках та проаналізував причини утворення дефектів.*

7. Моделювання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Вісник НТУ «ХПІ». Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків, 2017. – № 35. – С. 25–29.

*Автор виконав аналіз деформованого стану розкоченої поковки.*

8. Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми / О. Є. Марков, М. С. Косілов, В. Ю. Станков, П. І. Різак // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – №40. – С. 130–137.

*Автор виконав аналіз деформованого стану розкоченої поковки з виступом.*

9. Влияние угла клиновых бойков 160° на схему напряженного состояния поковки в процессе протяжки / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, П. И. Ризак // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2016. – №2 (43). – С. 51–56.

*Автор виконав огляд літератури та визначив переваги використання клинових бойків.*

10. Современные тенденции изготовления тонкостенных пустотелых поковок для энергетической промышленности / О. Е. Марков, А. И. Лобанов,

М. С. Косилов [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – №1(40). – С. 5–10.

*Автором проаналізований стан питання виготовлення пустотілих поковок для енергетичної промисловості.*

11. Разработка новых заготовок для поковок ответственного назначения / О. Е. Марков, А. В. Герасименко, М. С. Косилов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – №2(41). – С. 124–130.

*Автор виконав огляд способів удосконалення наявних заготовок для кування.*

12. Пат. 122773 Україна, МПК (2006) B 21 J 5 / 00. Спосіб кування кільцевих поковок зі ступінчастою поверхнею / О. Є. Марков, О. І. Лобанов, М. С. Косілов, А. О. Шарун, Є. В. Інчаков, заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201707819; заявл. 25.07.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2. – 4 с.

*Автором виконано пошук та аналіз наявних способів розкочування пустотілих поковок та запропонована конструкція інструменту.*

13. Пат. 117176 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб кування опорних валків / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, М. С. Косілов, А. В. Коляденко; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201609278; заявл. 05.09.2016; опубл. 26.06.2017, бюл. № 12. – 4 с.

*Автором виконано пошук та аналіз способів осаджування для виготовлення поковок типу валків.*

14. Пат. 118042 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб кування криволінійних плит / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, М. С. Косілов, А. О. Шарун; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201612114; заявл. 29.11.2016; опубл. 25.07.2017, бюл. № 14. – 5 с.

*Автором виконано пошук та аналіз способів кування плит для виготовлення кільцевих збірних виробів.*

15. Косилов М. С. Способы получения пустотелых поковок для энергетической промышленности / М. С. Косилов, Е. В. Инчаков //

Міжнародна науковотехнічна конференція «Університетська наука-2017»: зб. тез доповідей у 3-х томах. Маріуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017– С. 174-175.

*Автором виконано пошук та аналіз існуючих способів розкочування пустотілих поковок.*

16. Дослідження процесів кування порожнистих поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, А. О. Шарун, М. С. Косілов, К. В. Орлик // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.) – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – С. 267-269.

*Автор виконав пошук альтернативних способів кування порожнистих поковок.*

17. Розробка нових заготовок для поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, О. В. Герасименко, М. С. Косілов, С. О. Шевцов // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 88.

*Автор виконав огляд способів удосконалення наявних заготовок для кування.*

18. Косілов М. С. Дослідження деформованого стану та формоутворення ступінчастої поковки під час розкочування / М. С. Косілов, О. В. Герасименко // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки металів тиском у машинобудуванні та металургії : матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції, 22–24 листопада 2017 р., Харків – 2017. – С. 35.

*Автор виконав моделювання процесу розкочування пустотілої поковки з виступом та проаналізував формоутворення поковки.*

19. Косілов М. С. Аналіз формозміни обичайок з виступом при розкочуванні профільованим бойком / М. С. Косілов, О. В. Герасіменко // Матеріали XXV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25 – 26 квітня 2018 р., Кременчук – 2018. – С. 75-76.

*Автор виконав обробку експериментальних даних деформування зразків ступінчастим інструментом.*

*Додатково наукові результати відображені в роботах:*

20. Разработка нового способа ковки днищ / [О. Е. Марков, В. Ю. Станков, М. С. Косілов и др.] // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2017. – №2(45). – С. 63–66.

*Автором оцінено особливості НДС поковки за результатами моделювання.*

21. Использование выпуклых бойков для повышения качества крупных плит / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, Н. И. Нагиев // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2016. – № 1 (19Е). – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2016_1_10

*Автор виконав аналіз НДС заготовок після протягування випуклими бойками.*

22. Современные способы получения тонкостенных деталей ответственного назначения / О. Е. Марков, А. О. Шарун, М. С. Косилов, Е. В. Инчаков // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2017. – №1(44). – С. 115–122.

*Автор виконав аналіз стану питання виготовлення поковок типу «днище».*

23. Пат. 118099 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб протягування заготівок з карбідних сталей / П. П. Кальченко, В. М. Олешко, О. Є. Марков, В. В. Антонов, М. С. Косілов, А. О. Шарун; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201700269; заявл. 10.01.2017; опубл. 25.07.2017, бюл. № 14. – 5 с.

*Автором проаналізовано покращення механічних властивостей при застосуванні протягування зі зміним ступенем деформації.*

# ДОДАТОК Б

## Апробація результатів дисертаційної роботи на Міжнародних конференціях

1. XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» 25-28 квітня 2016 року м. Краматорськ, очна форма участі
2. V Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 17-18 листопада 2016 року м. Тернопіль, заочна форма участі
3. XX Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» 24-27 квітня 2017 року м. Краматорськ, очна форма участі
4. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» 22-24 листопада 2017 р. м. Харків, заочна форма участі
5. Міжнародна науково-технічна конференція «Університетська наука – 2017» 18-19 травня 2017р. м. Маріуполь, заочна форма участі
6. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» 25-28 вересня 2017р. м. Краматорськ, очна форма участі
7. XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» 24-26 квітня 2018 року м. Краматорськ, очна форма участі
8. XXV Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» 25-26 квітня 2018 р. м. Кременчук, заочна форма участі

## ДОДАТОК В

**Програма для визначення коефіцієнтів рівнянь регресії та статичної обробки експериментальних даних для співвідношення діаметрів отвору $d_{n.в}/d_{n.у}$ :**

**Визначення рівняння регресії для плану типу ПФЕ 3 в кубі**

Введення вихідних даних:

Кількість експериментів $N := 27$

Кількість дублів в кожному експерименті $n := 2$

Рівень значимості $\alpha := 0.05$

Діапазони варіювання: опити $i := 1..27$

дублі $j := 1..2$

ORIGIN=1

Експериментальні значення

$$Y1ug := \begin{pmatrix} 1.082 & 1.687 & 2.07 & 0.555 & 1.055 & 1.337 & 0.406 & 0.508 & 0.765 & 1.191 & 1.645 & 1.705 & 0.685 & 1.14 & 1.4656 & 0.42 & 0.67 & 0.971 & 1.35 & 1.387 & 1.25 & 0.88 & 1.35 & 1.28 & 0.468 & 0.787 & 1.092 \\ 1.093 & 1.693 & 2.08 & 0.567 & 1.045 & 1.345 & 0.416 & 0.519 & 0.785 & 1.189 & 1.652 & 1.69 & 0.693 & 1.154 & 1.475 & 0.43 & 0.68 & 0.97 & 1.4 & 1.39 & 1.26 & 0.895 & 1.29 & 1.335 & 0.47 & 0.792 & 1.086 \end{pmatrix}$$

### 1.1 Розрахунок дисперсії опиту

Середньоарифметичне значення опиту: $Y1u_i := \dfrac{Y1ug_{1,i} + Y1ug_{2,i}}{2}$

Різниця між експериментальним та середнім значенням: $Y1_{j,i} := Y1ug_{j,i} - Y1u_i$

Число ступенів свободи: $fu1 := n - 1$

Построчна дисперсія: $Syu1_i := \dfrac{(Y1_{1,i})^2 + (Y1_{2,i})^2}{fu1}$

*Перевірка однорідності ряду дисперсії:*

(Через однорідність дублювання опитів, перевірка однорідності ряду дисперсії виконується за критерієм Кохрена)

$$Gрозр := \frac{\max(Syu1)}{\sum Syu1} = 0.312 \quad Gтабл := 0.343$$

Ряд дисперсії можна вважати однорідним через те що виконується умова $Gрозр < Gтабл$

Дисперсія опиту: $Sопиту := 2 \cdot \mathrm{var}(Y1ug)$

## 1.2 Розрахунок коефіцієнтів регресії

$X :=$

| $X0$ | $X1$ | $X2$ | $X3$ | $X1^2$ | $X2^2$ | $X3^2$ | $X1^2X2^2X3^2$ | $X1^2X2^2X3$ | $X1^2X2X3^2$ | $X1X2^2X3^2$ | $X1^2X2^2$ | $X2^2X3^2$ | $X1^2X3^2$ | $X1X2X3^2$ | $X1X2^2X3$ | $X1^2X2X3$ | $X1^2X3$ | $X2^2X3$ | $X1X3^2$ | $X2X3^2$ | $X1X2^2$ | $X1^2X2$ | $X1X2X3$ | $X1X2$ | $X2X3$ | $X1X3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Коефіцієнти регресії:

$$B := \left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot \left(X^T \cdot Ycp\right)$$

$B^T =$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.147 | 0.391 | -0.487 | 0.135 | -0.067 | 0.015 | 0.038 | 0.156 | 0.048 | -0.051 | 0.059 | -0.024 | -0.104 | ... |

$B^T =$

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.093 | $5.062 \cdot 10^{-3}$ | -0.016 | -0.031 | -0.062 | -0.141 | -0.091 | 0.043 | -0.127 | 0.114 | 0.17 | $9.5 \cdot 10^{-3}$ | 0.144 | ... |

Середньоквадратична похибка у визначенні коефіцієнтів регресії: $Sb1 := \frac{Sопиту}{2 \cdot N}$

Число ступенів свободи: $f1 := N \cdot (n - 1)$

Критерій Стьюдента: $t := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, f1\right) = 2.052$

Довірчий інтервал: $\Delta b1 := t \cdot \sqrt{Sb1} = 0.17$

Через те що коефіцієнти B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B17, B18, B19, B20, B21, B22, B23, B25, B26, B27, за модулем менші, ніж Δb1, тому їх виключаємо з рівняння.

Отримуємо рівняння виду:

$$Y_i := B_1 + B_2 \cdot X_{i,2} + B_3 \cdot X_{i,3} + B_{24} \cdot X_{i,24}$$

## 1.3 Перевірка адекватності моделі:

Кількість коефіцієнтів у отриманому рівняння, включно з B1 $K := 4$

Число ступенів свободи $f2 := N - K$

Дисперсія неадекватності: $Sнеад := \frac{27 \cdot \sum_{i=1}^{27} \left(Y1u_i - Y_i\right)^2}{f2}$

Критерій Фішера: $Fрозр := \frac{Sнеад}{Sопиту} = 1.667$ $Fтабл := qF(1 - \alpha, f2, f1) = 1.94$

Через те, що $F_{розр}$ менше $F_{табл}$ гіпотеза об адекватності моделі при заданому рівні значимості не заперечується.

## ДОДАТОК Г

**Програма для визначення коефіцієнтів рівнянь регресії та статичної обробки експериментальних даних для відносного діаметра уступу $D_{n.y}/d_{n.y}$ :**

**Визначення рівняння регресії для плану типу ПФЕ 3 в кубі**

Введення вихідних даних:

Кількість експериментів $N := 27$

Кількість дублів в кожному експерименті $n := 2$

Рівень значимості $\alpha := 0.05$

Діапазони варіювання: опити $i := 1..27$

дублі $j := 1..2$

ORIGIN=1

Експериментальні значення

$$Y1ug := \begin{pmatrix} 1.2 & 1.55 & 1.6 & 1 & 1.4 & 1.4 & 1.15 & 1.15 & 1.43 & 1.35 & 1.645 & 1.695 & 1.3 & 1.44 & 1.66 & 1.25 & 1.35 & 1.65 & 1.6 & 1.6 & 1.7 & 1.6 & 1.9 & 1.8 & 1.3 & 1.5 & 1.9 \\ 1.23 & 1.49 & 1.52 & 1.1 & 1.34 & 1.46 & 1.1 & 1.18 & 1.37 & 1.4 & 1.65 & 1.68 & 1.25 & 1.49 & 1.63 & 1.15 & 1.28 & 1.54 & 1.63 & 1.68 & 1.68 & 1.49 & 1.87 & 1.85 & 1.27 & 1.47 & 1.93 \end{pmatrix}$$

### 1.1 Розрахунок дисперсії опиту

Середньоарифметичне значення опиту: $Y1u_i := \frac{Y1ug_{1,i} + Y1ug_{2,i}}{2}$

Різниця між експериментальним та середнім значенням: $Y1_{j,i} := Y1ug_{j,i} - Y1u_i$

Число ступенів свободи: $fu1 := n - 1$

Построчна дисперсія: $Syu1_i := \frac{(Y1_{1,i})^2 + (Y1_{2,i})^2}{fu1}$

*Перевірка однорідності ряду дисперсії:*

(Через однорідність дублювання опитів, перевірка однорідності ряду дисперсії виконується за критерієм Кохрена)

$$Gрозр := \frac{\max(Syu1)}{\sum Syu1} = 0.125 \quad Gтабл := 0.343$$

Ряд дисперсії можна вважати однорідним через те що виконується умова $Gрозр < Gтабл$

Дисперсія опиту: $Sопиту := 2 \cdot var(Y1ug)$

## 1.2 Розрахунок коефіцієнтів регресії

$X :=$

| $X0$ | $X1$ | $X2$ | $X3$ | $X1^2$ | $X2^2$ | $X3^2$ | $X1^2X2^2X3^2$ | $X1^2X2^2X3$ | $X1^2X2X3^2$ | $X1X2^2X3^2$ | $X1^2X2^2$ | $X2^2X3^2$ | $X1^2X3^2$ | $X1X2X3^2$ | $X1X2^2X3$ | $X1^2X2X3$ | $X1^2X3$ | $X2^2X3$ | $X1X3^2$ | $X2X3^2$ | $X1X2^2$ | $X1^2X2$ | $X1X2X3$ | $X1X2$ | $X2X3$ | $X1X3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Коефіцієнти регресії:

$$B := \left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot \left(X^T \cdot Ycp\right)$$

$B^T =$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.465 | 0.185 | -0.166 | 0.257 | $-5\cdot10^{-3}$ | 0.016 | 0.163 | 0.2 | 0.076 | -0.016 | $8.75\cdot10^{-3}$ | -0.012 | -0.191 | ... |

$B^T =$

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.16 | 0.04 | 0.036 | -0.032 | -0.035 | -0.147 | -0.02 | 0.039 | $-8.125\cdot10^{-3}$ | 0.099 | 0.078 | 0.021 | 0.05 | ... |

Середньоквадратична похибка у визначенні коефіцієнтів регресії: $Sb1 := \frac{Sопиту}{2 \cdot N}$

Число ступенів свободи: $f1 := N \cdot (n - 1)$

Критерій Стьюдента: $t := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, f1\right) = 2.052$

Довірчий інтервал $\Delta b1 := t \cdot \sqrt{Sb1} = 0.09$

Через те що коефіцієнти B5, B6, B9, B10, B11, B12, B15, B16, B17, B18, B20, B21, B22, B24, B25, B26, B27 за модулем менші, ніж Δb1, тому їх виключаємо з рівняння.

Отримуємо рівняння виду:

$$Y_i := B_1 + B_2 \cdot X_{i,2} + B_3 \cdot X_{i,3} + B_4 \cdot X_{i,4} + B_7 \cdot X_{i,7} + B_8 \cdot X_{i,8} + B_{13} \cdot X_{i,13} + B_{14} \cdot X_{i,14} + B_{19} \cdot X_{i,19} + B_{23} \cdot X_{i,23}$$

## 1.3 Перевірка адекватності моделі:

Кількість коефіцієнтів у отриманому рівняння, включно з B1 $K := 10$

Число ступенів свободи $f2 := N - K$

Дисперсія неадекватності: $Sнеад := \frac{27 \cdot \sum_{i=1}^{27} \left(Y1u_i - Y_i\right)^2}{f2}$

Критерій Фішера: $F_{f2f1} := \frac{Sнеад}{Sопиту} = 1.993$ $\quad Fтабл := qF(1 - \alpha, f2, f1) = 2.018$

Через те, що $F_{розр}$ менше $F_{табл}$ гіпотеза об адекватності моделі при заданому рівні значимості не заперечується.

## ДОДАТОК Ґ

**Програма для визначення коефіцієнтів рівнянь регресії та статичної обробки експериментальних даних для відносного діаметра уступу $D_{п.в}/d_{п.в}$ :**

**Визначення рівняння регресії для плану типу ПФЕ 3 в кубі**

Введення вихідних даних:

Кількість експериментів $N := 27$

Кількість дублів в кожному експерименті $n := 2$

Рівень значимості $\alpha := 0.05$

Діапазони варіювання: опити $i := 1..27$

дублі $j := 1..2$

ORIGIN=1

Експериментальні значення

$$Y1ug := \begin{pmatrix} 1.47 & 1.51 & 1.47 & 1.46 & 1.57 & 1.57 & 1.47 & 1.53 & 1.6 & 1.61 & 1.69 & 1.68 & 1.66 & 1.72 & 1.71 & 1.61 & 1.69 & 1.76 & 1.8 & 1.88 & 2.14 & 1.89 & 2.01 & 2.05 & 1.84 & 1.7 & 2.02 \\ 1.39 & 1.57 & 1.45 & 1.4 & 1.56 & 1.34 & 1.41 & 1.51 & 1.78 & 1.59 & 1.65 & 1.69 & 1.69 & 1.75 & 1.77 & 1.53 & 1.68 & 1.87 & 1.5 & 1.89 & 2.26 & 1.89 & 2.09 & 2.03 & 1.87 & 1.79 & 2.09 \end{pmatrix}$$

### 1.1 Розрахунок дисперсії опиту

Середньоарифметичне значення опиту: $Y1u_i := \frac{Y1ug_{1,i} + Y1ug_{2,i}}{2}$

Різниця між експериментальним та середнім значенням: $Y1_{j,i} := Y1ug_{j,i} - Y1u_i$

Число ступенів свободи: $fu1 := n - 1$

Построчна дисперсія: $Syu1_i := \frac{(Y1_{1,i})^2 + (Y1_{2,i})^2}{fu1}$

*Перевірка однорідності ряду дисперсії:*

(Через однорідність дублювання опитів, перевірка однорідності ряду дисперсії виконується за критерієм Кохрена)

$$Gрозр := \frac{\max(Syu1)}{\sum Syu1} = 0.34 \quad Gтабл := 0.343$$

Ряд дисперсії можна вважати однорідним через те що виконується умова $Gрозр < Gтабл$

Дисперсія опиту: $Sопиту := 2 \cdot var(Y1ug)$

## 1.2 Розрахунок коефіцієнтів регресії

$X :=$

| $X0$ | $X1$ | $X2$ | $X3$ | $X1^2$ | $X2^2$ | $X3^2$ | $X1^2X2^2X3^2$ | $X1^2X2^2X3$ | $X1^2X2X3^2$ | $X1X2^2X3^2$ | $X1^2X2^2$ | $X2^2X3^2$ | $X1^2X3^2$ | $X1X2X3^2$ | $X1X2^2X3$ | $X1^2X2X3$ | $X1^2X3$ | $X2^2X3$ | $X1X3^2$ | $X2X3^2$ | $X1X2^2$ | $X1^2X2$ | $X1X2X3$ | $X1X2$ | $X2X3$ | $X1X3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Коефіцієнти регресії:

$$B := \left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot \left(X^T \cdot Ycp\right)$$

$B^T =$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.735 | 0.033 | $7.5 \cdot 10^{-3}$ | 0.242 | -0.028 | -0.057 | 0.073 | 0.135 | 0.057 | 0.059 | 0.034 | 0.018 | -0.078 | ... |

$B^T =$

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.077 | -0.058 | 0.028 | $8.75 \cdot 10^{-3}$ | 0.019 | -0.1 | 0.011 | -0.047 | 0.05 | 0.017 | -0.07 | 0.04 | -0.03 | ... |

Середньоквадратична похибка у визначенні коефіцієнтів регресії: $Sb1 := \frac{Sопиту}{2 \cdot N}$

Число ступенів свободи: $f1 := N \cdot (n - 1)$

Критерій Стьюдента: $t := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, f1\right) = 2.052$

Довірчий інтервал $\Delta b1 := t \cdot \sqrt{Sb1} = 0.084$

Через те що коефіцієнти B2, B3, B5, B6, B7, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B17, B18, B20, B21, B22, B23, B25, B26, B27 за модулем менші, ніж Δb1, тому їх виключаємо з рівняння.

Отримуємо рівняння виду:

$$Y_i := B_1 + B_4 \cdot X_{i,4} + B_8 \cdot X_{i,8} + B_{19} \cdot X_{i,19}$$

### 1.3 Перевірка адекватності моделі:

Кількість коефіцієнтів у отриманому рівняння, включно з B1 $K := 4$

Число ступенів свободи $f2 := N - K$

Дисперсія неадекватності: $Sнеад := \frac{27 \cdot \sum_{i=1}^{27} \left(Y1u_i - Y_i\right)^2}{f2}$

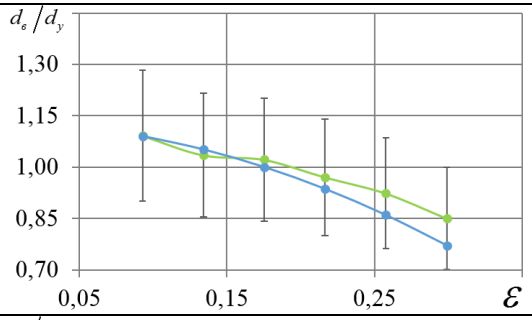
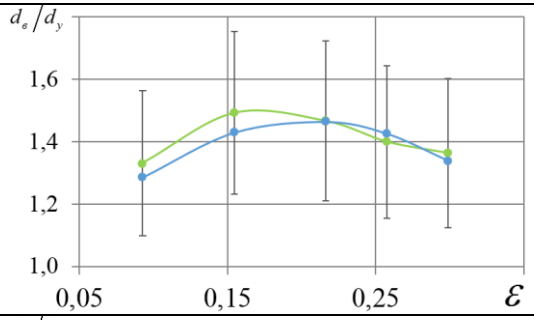
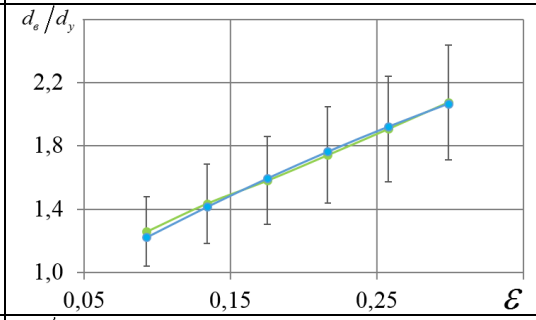
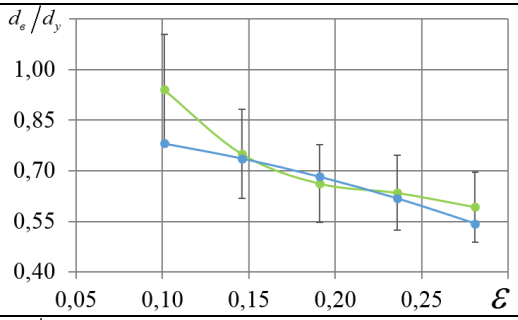
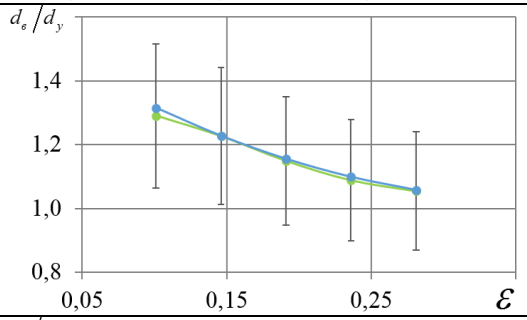
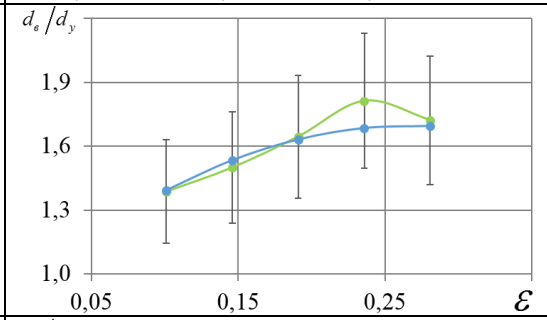
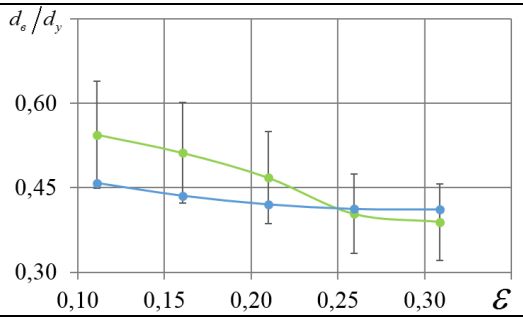
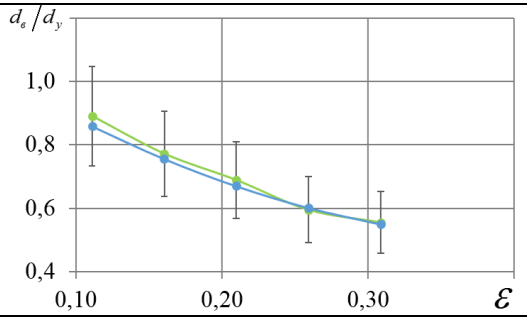
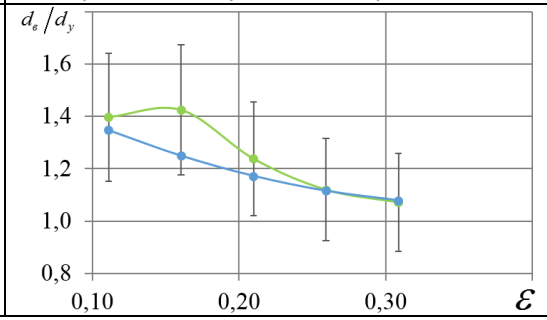
Критерій Фішера: $Fрозр := \frac{Sнеад}{Sопиту} = 1.86$ $Fтабл := qF(1 - \alpha, f2, f1) = 1.94$

Через те, що $F_{розр}$ менше $F_{табл}$ гіпотеза об адекватності моделі при заданому рівні значимості не заперечується.

# ДОДАТОК Д

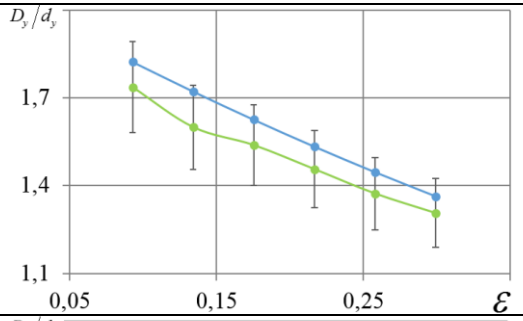
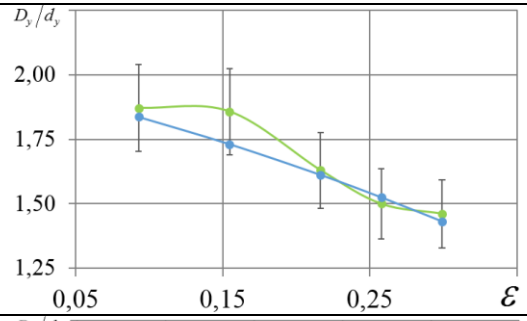
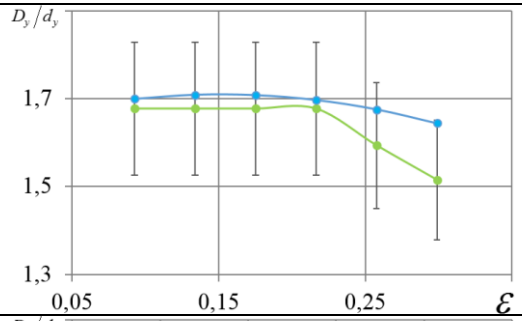
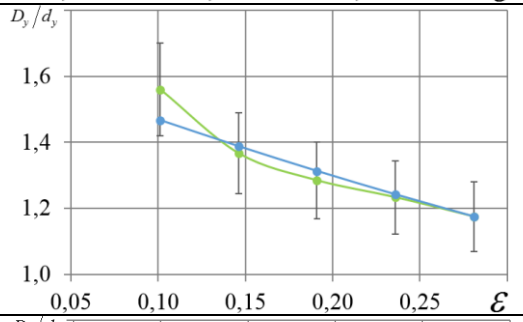
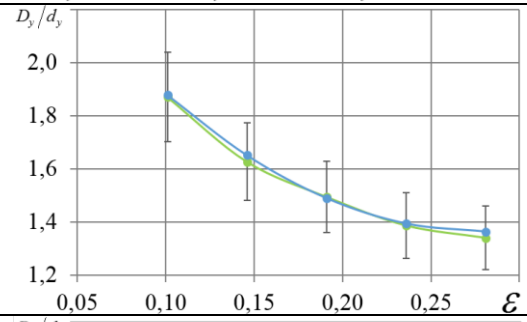
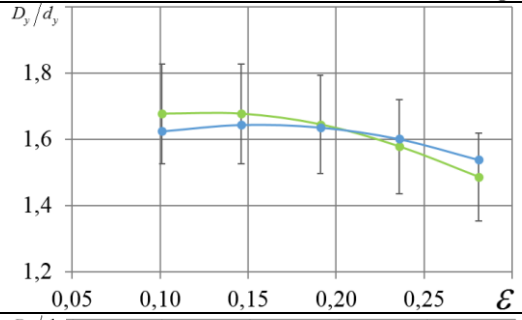
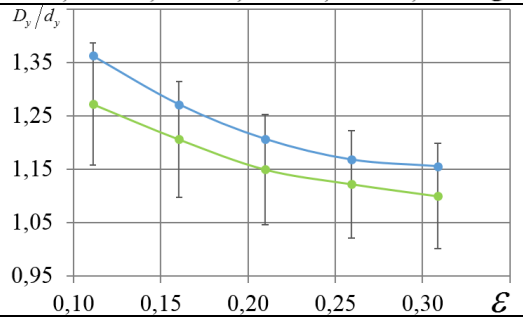
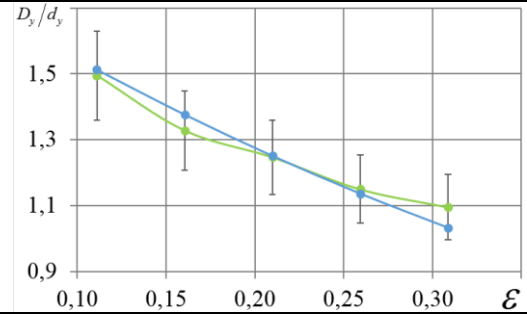
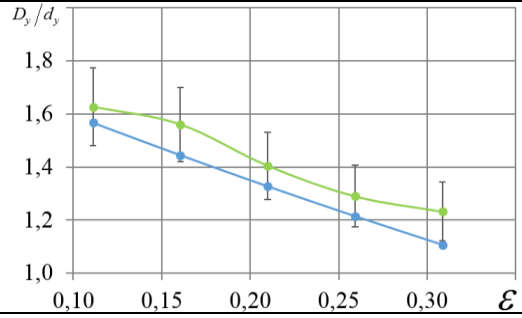
**Порівняння даних, розрахованих за регресійними моделями, та даних, отриманих з експериментів на свинці**

Таблиця Г.1 – Порівняння даних для співвідношень діаметрів отворів $d_{п.в}/d_{п.у}$, довірчий інтервал 17,5%

| | $D_y/d_{ср}=2,05$ | $D_y/d_{ср}=1,85$ | $D_y/d_{ср}=1,65$ |
|---|---|---|---|
| $D_в/d_{ср}=2,5$ |  |  |  |
| $D_в/d_{ср}=2,4$ |  |  |  |
| $D_в/d_{ср}=2,3$ |  |  |  |

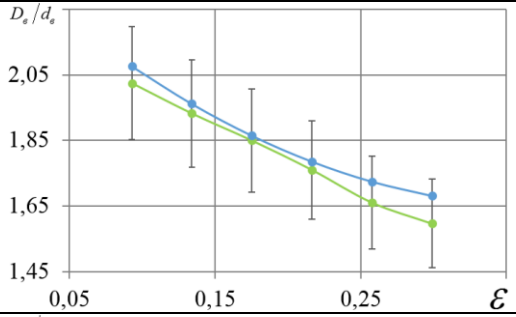
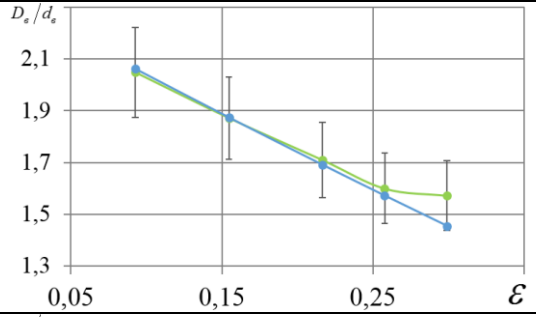
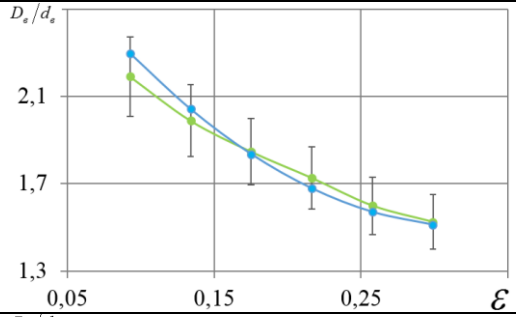
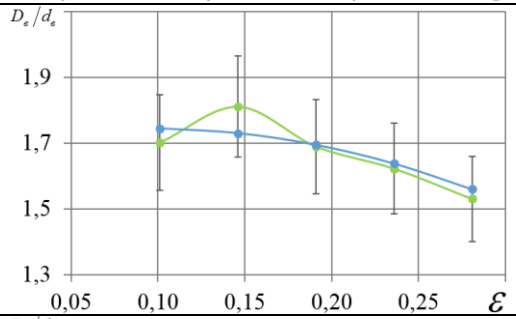
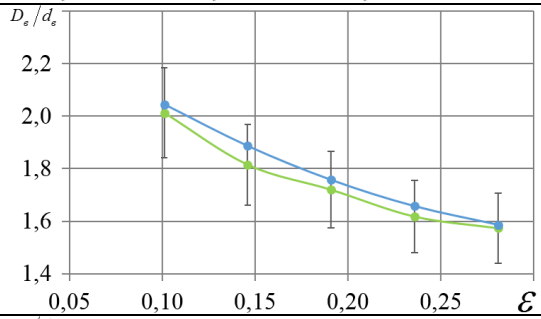
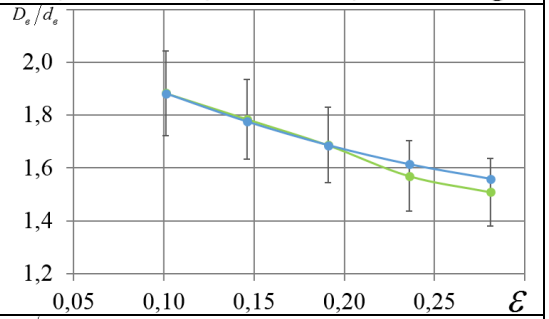
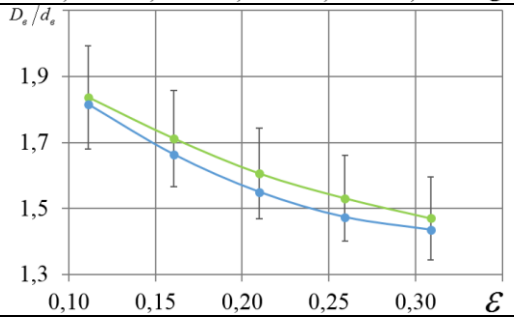
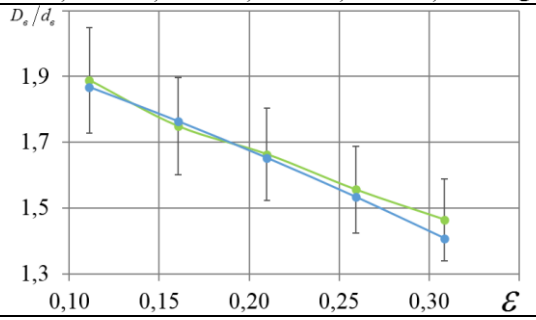
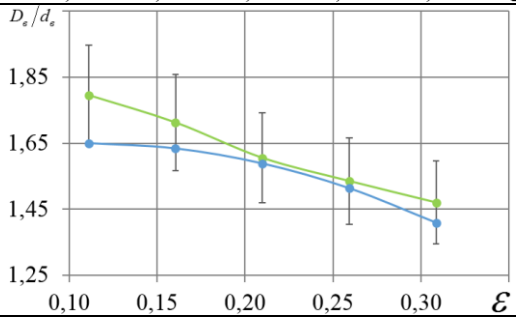
*зелена крива – експериментальні дані; синя крива – дані регресійної моделі;

Таблиця Г.2 – Порівняння даних для відносних діаметрів уступів $D_{n.y}/d_{n.y}$, довірчий інтервал 9%

| | $D_y/d_{cp}=2{,}05$ | $D_y/d_{cp}=1{,}85$ | $D_y/d_{cp}=1{,}65$ |
|---|---|---|---|
| $D_в/d_{cp}=2{,}5$ |  |  |  |
| $D_в/d_{cp}=2{,}4$ |  |  |  |
| $D_в/d_{cp}=2{,}3$ |  |  |  |

*зелена крива – експериментальні дані; синя крива – дані регресійної моделі

Таблиця Г.3 – Порівняння даних для відносних діаметрів виступів $D_{п.в}/d_{п.в}$, довірчий інтервал 8,5%

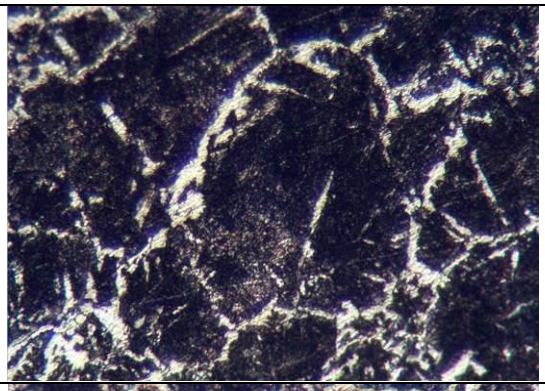
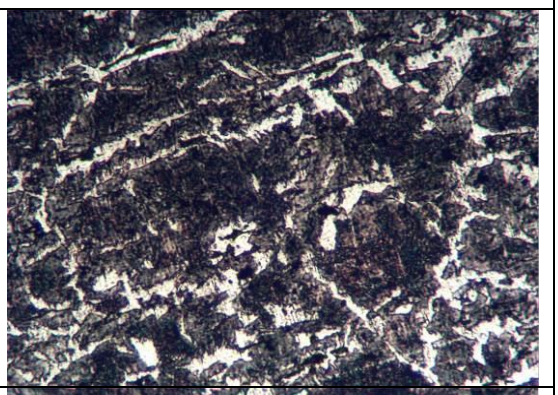
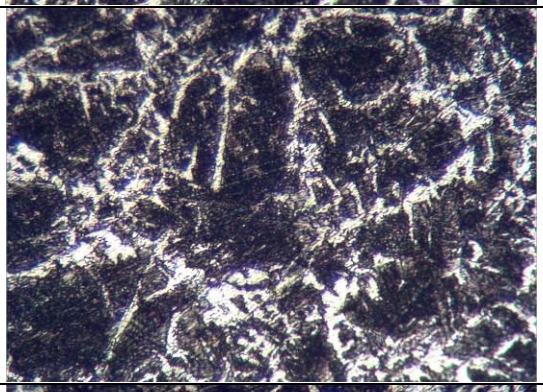
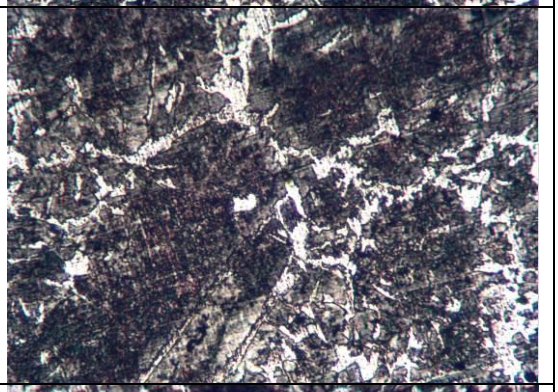
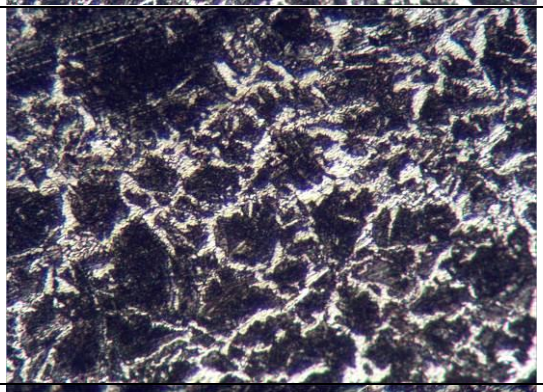
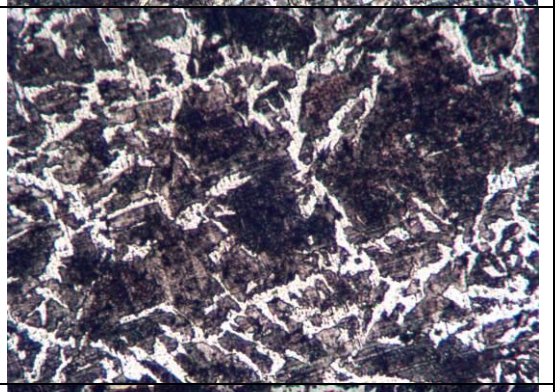
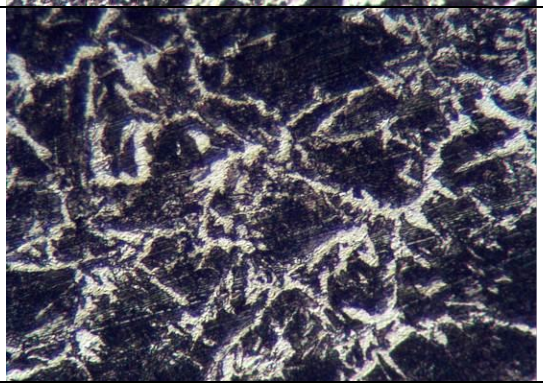
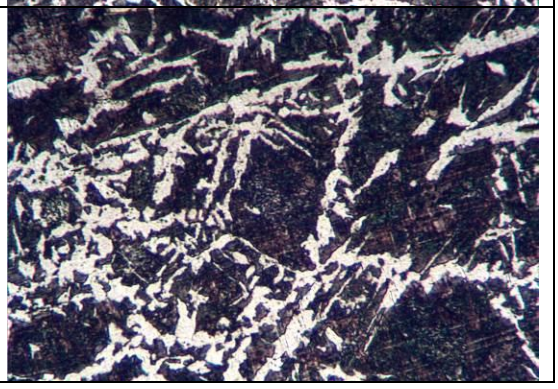
| | $D_y/d_{ср}=2{,}05$ | $D_y/d_{ср}=1{,}85$ | $D_y/d_{ср}=1{,}65$ |
|---|---|---|---|
| $D_в/d_{ср}=2{,}5$ |  |  |  |
| $D_в/d_{ср}=2{,}4$ |  |  |  |
| $D_в/d_{ср}=2{,}3$ |  |  |  |

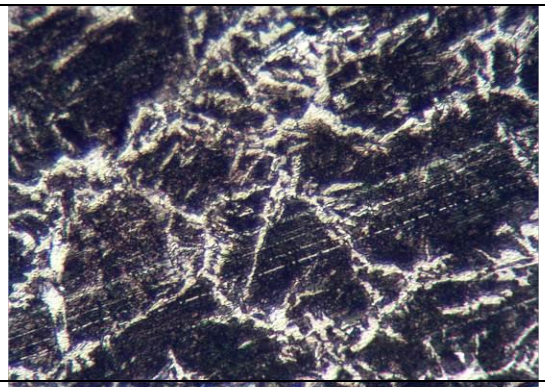
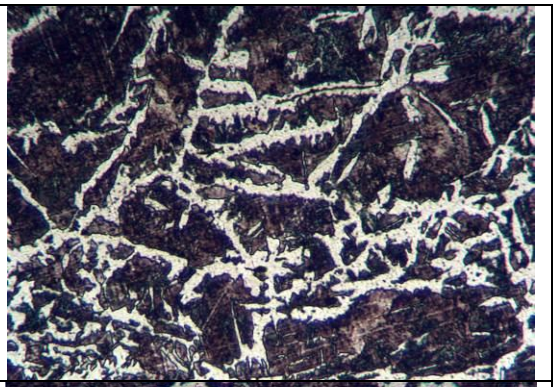
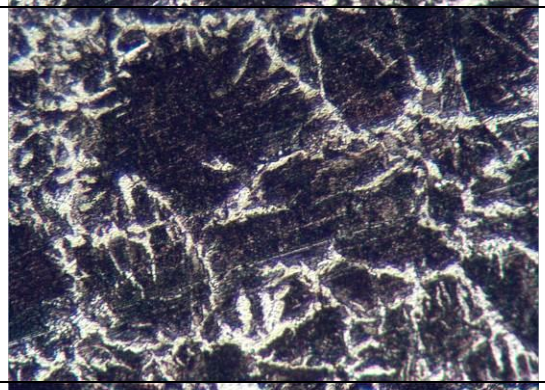
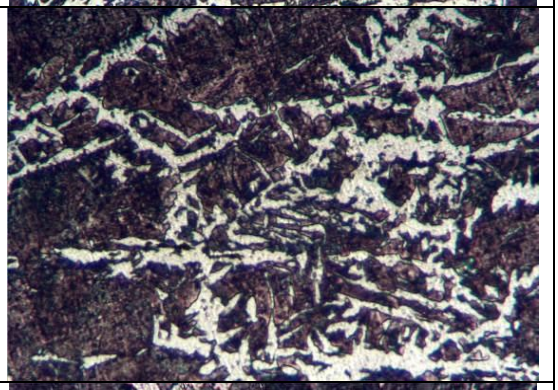
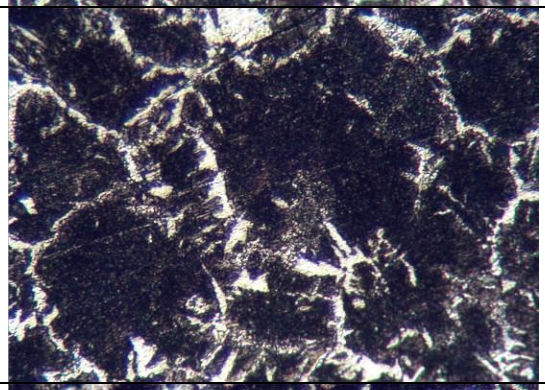
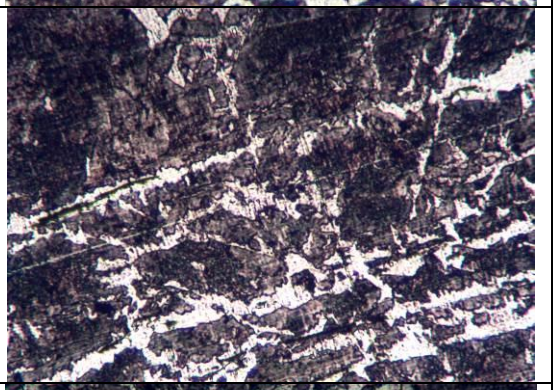
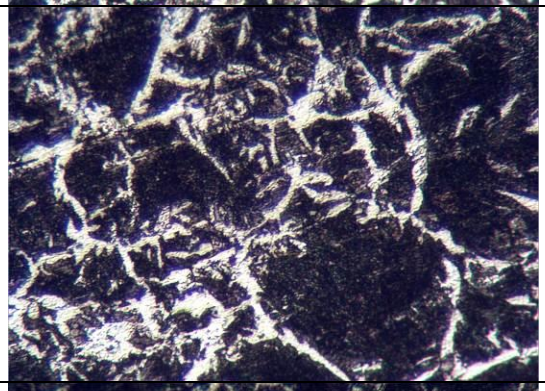
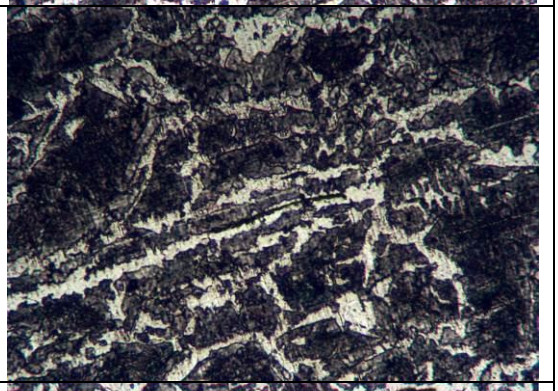
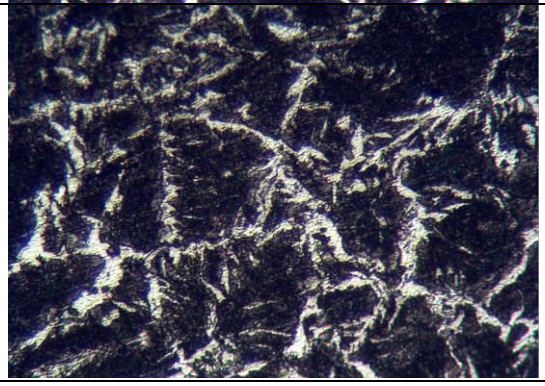
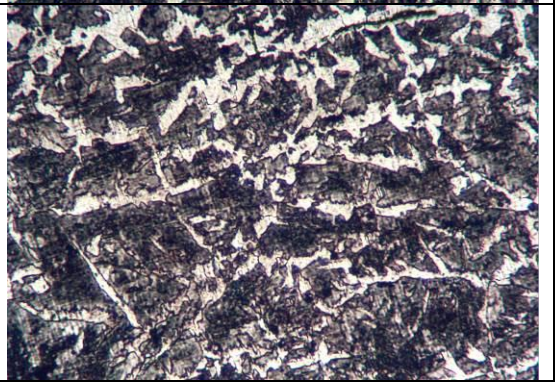
*зелена крива – експериментальні дані; синя крива – дані регресійної моделі

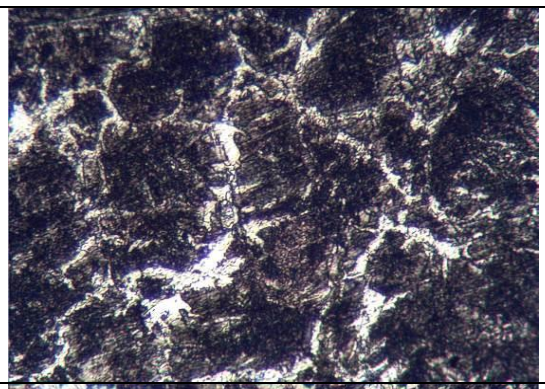
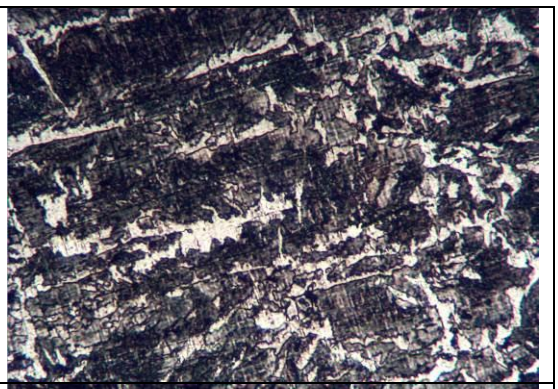
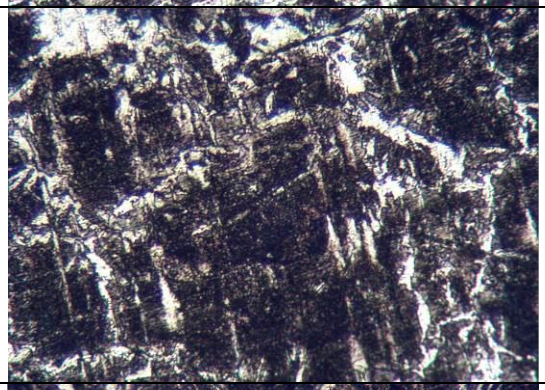
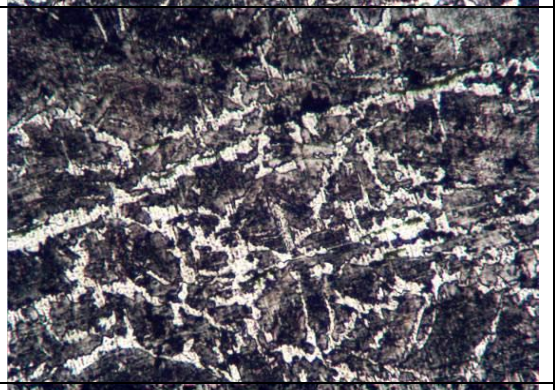
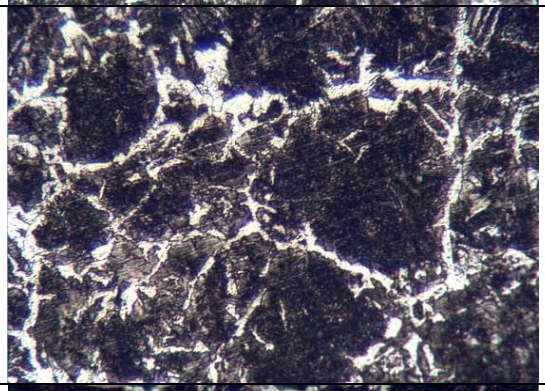
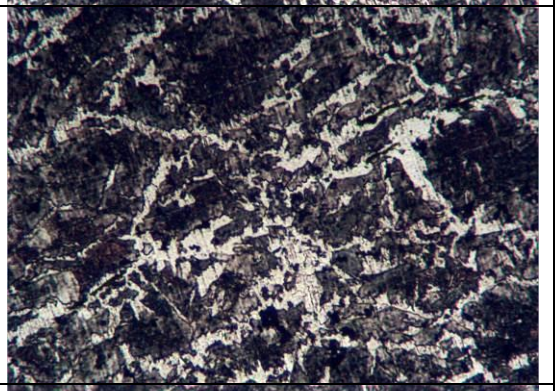
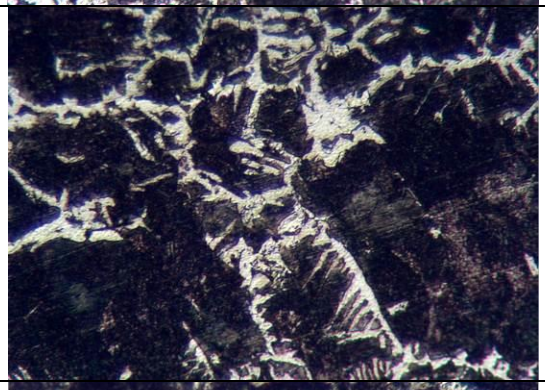
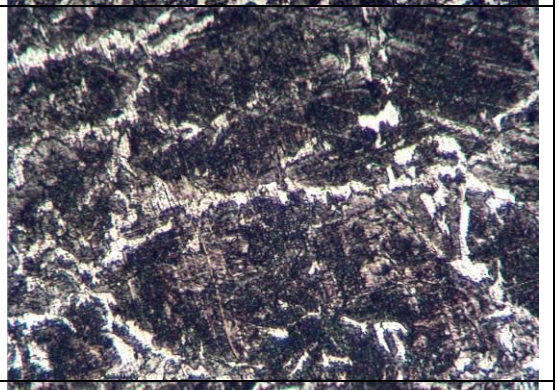
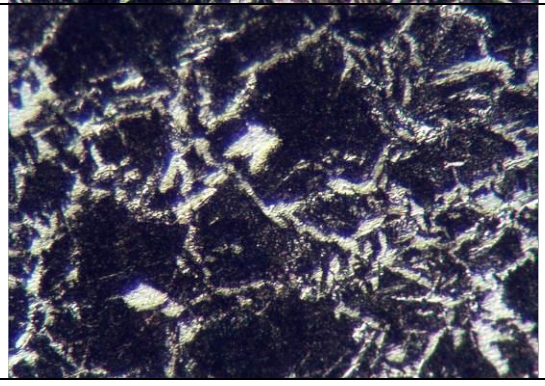
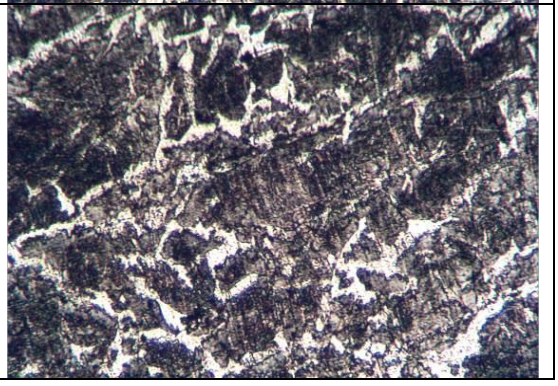
# ДОДАТОК Е

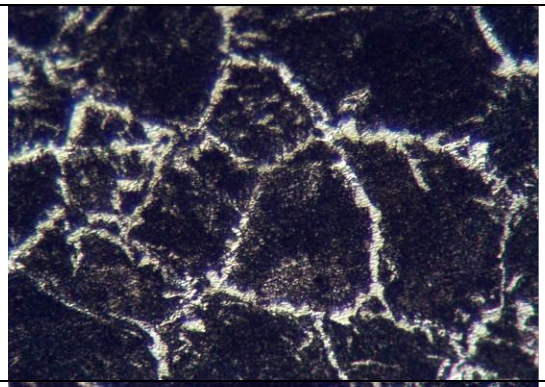
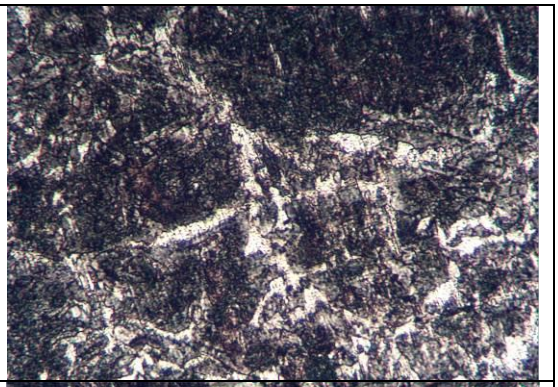
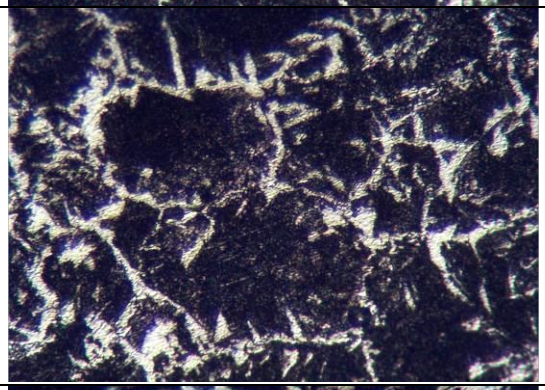
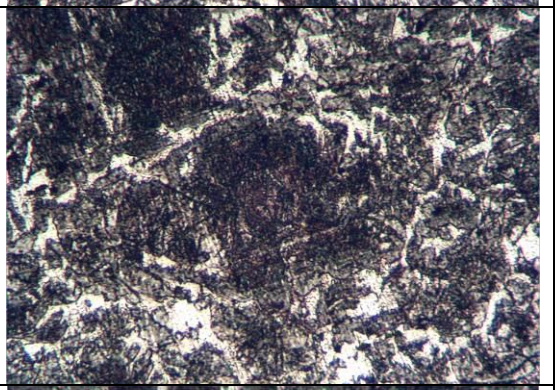
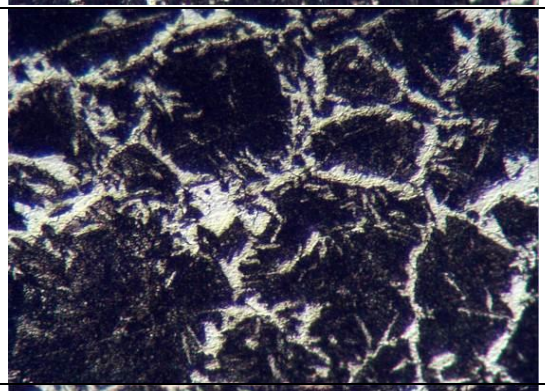
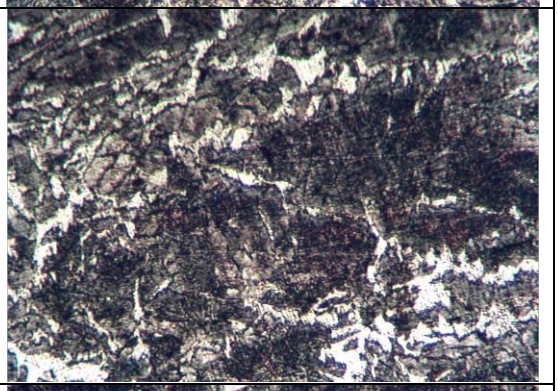
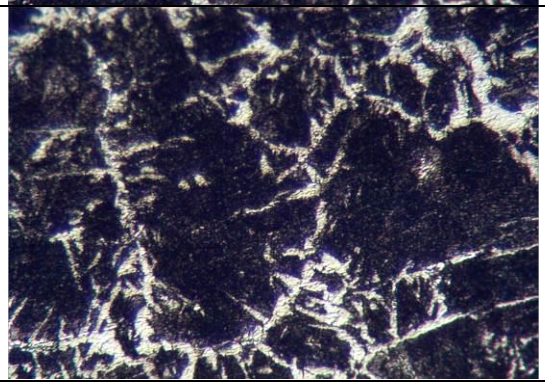
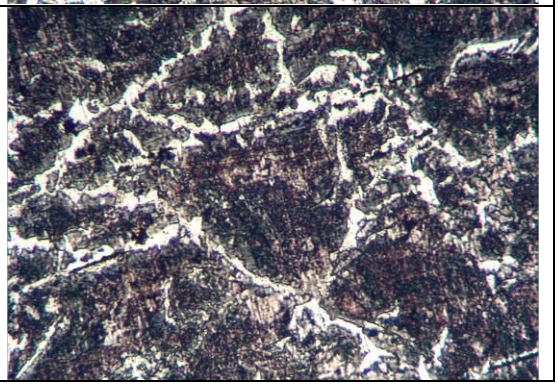
## Результати мікроаналізу структури металу поковок

Збільшення х125

| точка | базова | нова |
|---|---|---|
| 0 |  |  |
| У1 |  |  |
| У2 |  |  |
| У3 |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| У4 |  |  |
| У5 |  |  |
| В1 |  |  |
| В2 |  |  |
| В3 |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| B4 |  |  |
| B5 |  |  |
| B6 |  |  |
| B1-2 |  |  |
| B2-2 |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| B3-2 |  |  |
| B4-2 |  |  |
| B5-2 |  |  |
| B6-2 |  |  |

# ДОДАТОК Є

## Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
НОВО-КРАМАТОРСЬКИЙ
МАШИНОБУДІВНИЙ
ЗАВОД

NKMZ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НОВО-КРАМАТОРСКИЙ
МАШИНОСТРОТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД

НКМЗ, м. Краматорськ, Донецька область, 84305, УКРАЇНА тел. (06264)7-88-00, факс (06264)7-22-49, телетайп 330171
E-mail: ztm//nkmz.donetsk.ua, http://www.NKMZ.com

№_____ _____

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі представників ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ): головний металург ПрАТ «НКМЗ» к.т.н. В. М. Злигорєв, начальник бюро крупних поковок к.т.н. І. А. Грачов, начальник ковальсько-пресового цеха М. В. Олешко склали цей акт в тім, що в результаті проведених спільних наукових досліджень та опитно-промислових апробацій на ПрАТ «НКМЗ» у рамках науково-практичного договору о співдружності впроваджені на ПрАТ «НКМЗ» наступні результати дисертаційних робіт О. В. Герасименко, М. С. Косілова та С. О. Шевцова:

1. Нові ресурсозберігаючі технологічні процеси кування крупних поковок відповідального призначення з використанням спеціального інструменту, що сприяє зменшенню витрат металу, зниженню витрат, пов'язаних з механічною обробкою та покращенню якості виробів. Рекомендації з розробки нових енергозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок, креслення спеціального оснащення для розкочування та механічні режими кування. Нові технологічні процеси кування забезпечили наближення форми поковки до форми деталі, що зменшило час подальшої механічної обробки деталі на 20% і дозволило заощадити близько 10% електроенергії. Все це дозволило забезпечити зниження собівартості виготовлення крупних поковок на 10-15% та покращити механічні властивості в середньому на 5-10%.

2. Удосконалені ресурсозберігаючі технологічні процеси виготовлення пустотілих поковок із внутрішніми буртами відповідального призначення, які передбачають використання операції заковування дна. Запропоновані нові процеси покращують проробку структури металу заготовки та сприяють заварюванню внутрішніх свищів за рахунок деформування інструментом із криволінійним профілем. Запропоновані рекомендації з розробки нових технологічних процесів виготовлення поковок із дном та термомеханічні режими деформування. Розроблений новий технологічний процес забезпечив підвищення якості металу днища та зменшення відсотку браку на 20…30 %, що дозволило забезпечити зниження витрат при виготовленні пустотілих заготовок. Механічні властивості днища покращилися в середньому на 9…14 %.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

Головний металург ПрАТ «НКМЗ», к.т.н. _____ В.М. Злигорєв

Начальник бюро крупних поковок, к.т.н. _____ І. А. Грачов

Начальник ковальсько-пресового цеха _____ М. В. Олешко

М.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Донбаської державної
машинобудівної академії
А.М. Фесенко

«27» березня 2018

**АКТ**
**про впровадження результатів дисертаційної роботи**
**аспіранта Косілова Максима Сергійовича на тему**
**«Удосконалення технологій кування пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки способом розкочування ступінчастим інструментом»**
**у навчальний процес**

Члени комісії у складі завідувача кафедри «Обробка металів тиском», професора, д.т.н. І. С .Алієва та завідувача кафедри «Механіка пластичного формування», професора, д.т.н. О. Є. Маркова склали цей акт про те, що кафедрами обробки металів тиском та механіки пластичного формування Донбаської державної машинобудівної академії в період 2017–2018 р.р. М. С. Косіловим були впроваджені у навчальний процес методичні матеріали, які увійшли до лекцій, практичних та лабораторних робіт наступних дисциплін: «Ресурсозберігаючі технології кування», «Технологія кування», «Кування крупних поковок», «Кування та гаряче штампування». В наведених дисциплінах використані результати теоретичних та експериментальних досліджень, які були виконані аспірантом М. С. Косіловим при підготовці дисертаційної роботи:

- новий спосіб розкочування, який підвищує якість та зменшує собівартість виготовлення пустотілих поковок зі змінною товщиною стінки відповідального призначення;
- методика проектування технологічних процесів кування пустотілих поковок із застосуванням операції розкочування, яка дозволяє визначити геометрію заготовки та режимів розкочування для максимального наближення поковки до форми виробу;
- нові технологічні процеси кування пустотілих поковок із застосуванням операції розкочування поковок зі змінною товщиною стінки, які підвищили якість поковок.

Науково-практичні розробки, отримані М. С. Косіловим при виконанні кандидатської дисертаційної роботи, використані в методичних вказівках з курсового та дипломного проектування на кафедрах ОМТ та МПФ, а також використовуються в НДР студентів та магістрів кафедри.

Зав. кафедри ОМТ,
проф. д.т.н. І. С. Алієв

Зав. кафедри МПФ,
проф. д.т.н. О. Є. Марков