

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**СТАНКОВ ВІТАЛІЙ ЮРІЙОВИЧ**

УДК 621.777.4:621.77.01

**ДИСЕРТАЦІЯ**

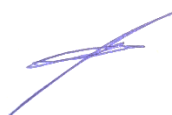
**УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ КУВАННЯ ДНИЩ АТОМНИХ  
РЕАКТОРІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО  
ІНСТРУМЕНТУ**

13 – Механічна інженерія

132 – Матеріалознавство

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



(В. Ю. Станков)

Науковий керівник

д. т. н., професор

Марков Олег Євгенійович

Краматорськ, 2026

## АНОТАЦІЯ

*Станков В.Ю.* Удосконалення способу кування днищ атомних реакторів на основі використання спеціального інструменту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 132 «Матеріалознавство». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2026.

Зниження енергозалежності України потребує ремонт існуючих та будівництво нових атомних електростанцій (АЕС). Це потребує збільшення кількості енергетичних модулів, а також ремонт/заміну існуючих блоків АЕС, в яких виходять терміни використання. Крім цього, є актуальна проблема зниження вартості реакторних блоків АЕС.

Об'єкт дослідження – технологічний процес і ковальське оснащення для виробництва днищ та кришок реакторів та парогенераторів для атомного та енергетичного машинобудування.

Метою проекту є зниження витрат металу, трудомісткості кування, енергетичних витрат при виробництві днищ та кришок реакторів та парогенераторів за рахунок використання нового способу кування та ковальського оснащення.

Основні задачі роботи: 1) розробити новий спосіб кування днищ та кришок реакторних установок із забезпеченням заданих механічних властивостей готових виробів; 2) встановити формозмінення та дати кількісну оцінку деформованого стану заготовки при куванні сферичних днищ роздачою; 3) експериментально перевірити процес роздачі конусною та сферичною плитами та закономірності змінення форми під час деформування; 4) розробити рекомендації та методику проектування нового технологічного процесу кування днища роздачою; 5) провести апробацію у промислових умовах процесу кування днища; 6) провести дослідження механічних властивостей та УЗК та днища, яке виготовлено за новим способом.

Методи дослідження – теоретичні дослідження формозмінення та розподілу деформацій в заготовці проводили з використанням метода скінчених елементів (МСЕ). Перевірка точності встановлених скінчено-елементних результатів дослідження відбувалась експериментальними дослідженнями на свинцевих моделях в лабораторних умовах і промисловими дослідженнями на реальному заказі у виробничих умовах. Лабораторні дослідження ґрунтувались на законах подоби натурних зразків і моделі для процесу кування з масштабом 1:100. Обробка даних експерименту проводилася на базі методів планування експерименту та статистики. Достовірність наукових результатів, що отримані МСЕ, були підтверджені експериментами на свинцевих моделях та натурних сталевих виробках.

Дослідження та удосконалення техпроцесу кування крупногабаритних днищ були проведені на базі МСЕ, який з високою точністю дозволив встановити показники деформованого стану днища при роздачі конусною та сферичною плитами. Новим підходом для реалізації моделювання процесу роздачі днища була розробка скінчено-елементної (СЕ) 3D моделі, яка дозволяє враховувати реологічні властивості сплаву при гарячому деформуванні. На базі створеної СЕ моделі визначався деформований стан днищ та формозмінення при роздачі заготовки. Встановлено регресійну модель, яка описують утворення різновтовщинності при роздачі днищ. Крім цього, була встановлена нерівномірність розподілу деформацій в тілі заготовки після роздачі конусною та сферичною плитами. Такій підхід є новим для теорії обробки тиском. Експериментальні дослідження процесу роздачі сферичних днищ було проведено завдяки використанню спеціального оснащення. Була промодельована різна форма конусних плит для роздачі. Більш того, у роботі встановлювалися механічні властивості відкутих сферичних днищ, що продеформовані за новим способом інструментом нової геометрії. Аналіз рівняння регресії закономірності змінення різновтовщинності в залежності від різних вихідних розмірів конусної заготовки після роздачі конусною та сферичною плитами, дозволив встановити науково-обґрунтовані параметри операції роздачі та впровадити

новий ресурсозберігаючий технологічний процес кування сферичних днищ. Більш того, були покращені властивості крупногабаритних днищ. Робоча гіпотеза дисертаційної роботи полягала у зміні схеми напруженого стану у процесі кування сферичних днищ за рахунок нового способу деформування та використання спеціальних конусних та сферичних плит з сегментними вирізами. За результатами цих досліджень були встановлені такі результати: обрана схема деформування, яка забезпечує рівномірний розподіл деформації, що забезпечить рівномірну проробку литої структури сталеві заготовки та буде сприяти раціональному розташуванню внутрішньої текстури, підвищення властивостей виробу та зменшення напусків на механічну обробку при куванні крупногабаритних сферичних днищ. На базі розглянутих різних методів роздачі сферичних днищ різними плитами, було розроблено спеціальне оснащення (поворотний стіл та деформуючі плити). Проведені дослідження дозволили встановити раціональні технологічні режими роздачі конусної заготовки, які забезпечили високий ступінь проробки литої структури зливка, забезпечили сприятливе розташування внутрішньої текстури сплаву. Дослідження формозмінення сферичних днищ послідовною роздачою конусною та сферичною плитами потребувало розробки комплексної методики, що враховує двоперехідність процесу роздачі. Були встановлені механічні властивості готового днища на сталевих поковках.

Були розроблені режими кування та роздачі конусної заготовки, які враховували термо-швидкісні умови реального процесу кування крупногабаритних днищ. Наукова новизна цих досліджень полягає у врахуванні більшості фізичних процесів, притаманних технології кування крупних поковок. За результатами проведеної роботи був зроблений аналіз існуючих техпроцесів виготовлення куванням крупногабаритних днищ, на базі яких був спроектовано новий процес їх роздачі. На базі проведених комплексних досліджень було спроектовано ковальське оснащення. Були виявлені закономірності формозмінення пустотілої заготовки у процесі послідовної роздачі конусною та сферичною плитами, що описують вплив геометричних параметрів заготовки та

інструменту на розподіл деформацій у стінці днища. Були складені методики та розроблені рекомендації для проектування технологічних процесів і ковальського оснащення для роздачі сферичних днищ.

Наукова новизна:

1) Розроблено новий науково-обґрунтований підхід щодо проектування технологічного процесу кування сферичних днищ, який дозволив зменшити напуски на механічну обробку та трудомісткість процесу кування.

2) Вперше встановлені закономірності формозмінення стінки днища, в залежності від різних геометричних розмірах вихідної заготовки, що дозволило дати рекомендації з геометрії деформуючого інструменту та технологічних режимів послідовної роздачі для виробництва днищ із заданими розмірами.

3) Вперше встановлена математична модель різновтовщинності стінки днища в залежності від різних співвідношень розмірів вихідної заготовки, яка дозволила визначати розміри конусної пустотілої заготовки до роздачі сферичною плитою.

4) Вперше встановлено розподіл деформацій в тілі відштампованого днища за новою технологією в залежності від різних геометричних розмірів заготовки до роздачі, що дало можливість оцінити рівномірність проробки структури металу.

Практична цінність роботи полягає у зниженні витрат металу через зменшення напусків на механічну обробку та зниження трудомісткості процесу кування при виробництві крупногабаритних днищ відповідального призначення, а саме:

1. Використання операцій послідовної роздачі днища конусною та сферичною плитами із сегментними вирізами дозволили знизити силу деформування на 20...25% у порівнянні з класичною технологією кування, що знизило енерговитрати.

2. Встановлені у роботі закономірності формозмінення заготовки у процесі комбінованої роздачі конусною та сферичною плитами дозволили

встановити раціональну форму та розміри вихідної заготовки, що дозволяє виготовляти днища без напусків. Це дозволяє знизити витрати металу на 10...15%.

3. Виготовлення днищ з використанням операції роздачі дозволило зменшити трудомісткість процесу кування на 10...15%.

4. Встановлений оптимальний кут конусної плити для роздачі пустотілої заготовки дозволив спроектувати універсальний деформуючий інструмент, який можна використовувати для днищ різних діаметрів.

5. Розроблений новий технологічний процес кування днищ та кришок впроваджено на ПАТ «Енергомашпецсталь», а також він буде корисним на працюванням для наступних підприємств: ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», ПАТ «Турбоатом», ДП «Електроважмаш» та ін.

**Ключові слова:** роздача, кування, днище, МСЕ, реактор, АЕС, деформації, зливки, конусна плита, сферична плита, гідравлічний прес

## ABSTRACT

Stankov V. Improvement of the method of forging the bottoms of nuclear reactors based on the use of a special dies. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 132 “Material science”. – The Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2026.

Reducing Ukraine's energy dependence requires the repair of existing and the construction of new nuclear power plants (NPPs). This requires an increase in the number of power modules, as well as the repair/replacement of existing NPP units that are reaching their service life. In addition, there is a pressing problem of reducing the cost of NPP reactor units. The object of the study is the technological process and forging equipment for the production of reactor bottoms and covers and steam generators for nuclear and power engineering. The goal of the project is to reduce metal consumption, forging labor intensity, energy costs in the production of reactor bottoms and covers and steam generators by using a new forging method and forging equipment. The main objectives of the work: 1) to develop a new method of forging reactor bottoms and covers with the provision of specified mechanical properties of finished products; 2) establish the deformation and give a quantitative assessment of the deformed state of the workpiece during the forging of spherical bottoms by distribution; 3) experimentally verify the process of distribution by conical and spherical plates and the regularities of shape change during deformation; 4) develop recommendations and a methodology for designing a new technological process for forging the bottom by distribution; 5) conduct an approbation in industrial conditions of the bottom forging process; 6) conduct a study of the mechanical properties and ultrasonic testing of the bottom, which is manufactured by the new method. Research methods - theoretical studies of deformation and distribution of deformations in the workpiece were carried out using the finite element method (FEM). The accuracy of the established finite element research results was verified by experimental studies on lead models in laboratory conditions and industrial studies on a real order in

production conditions. Laboratory studies were based on the laws of similarity of full-scale samples and a model for the forging process with a scale of 1:100. The processing of experimental data was carried out on the basis of experimental planning and statistical methods. The reliability of the scientific results obtained by the MSE was confirmed by experiments on lead models and full-scale steel products. Research and improvement of the technological process of forging large-sized bottoms were carried out on the basis of the MSE, which allowed to establish with high accuracy the indicators of the deformed state of the bottom when distributing with conical and spherical plates. A new approach to the implementation of modeling the bottom distribution process was the development of a finite element (FE) 3D model, which allows taking into account the rheological properties of the alloy during hot deformation. On the basis of the created FE model, the deformed state of the bottoms and deformation during the distribution of the workpiece were determined. A regression model was established that describes the formation of different thicknesses during the distribution of the bottoms. In addition, the uneven distribution of deformations in the body of the workpiece after distribution by conical and spherical plates was established. Such an approach is new for the theory of pressure processing. Experimental studies of the distribution process of spherical bottoms were carried out using special equipment. Different shapes of conical plates for distribution were modeled. Moreover, the work established the mechanical properties of forged spherical bottoms deformed in a new way by a tool of new geometry. Analysis of the regression equation of the regularity of the change in different thicknesses depending on different initial sizes of the conical workpiece after distribution by conical and spherical plates allowed to establish scientifically substantiated parameters of the distribution operation and introduce a new resource-saving technological process for forging spherical bottoms. Moreover, the properties of large-sized bottoms were improved. The working hypothesis of the dissertation work was to change the stress state scheme in the process of forging spherical bottoms due to a new method of deformation and the use of special conical and spherical plates with segmental cuts. According to the results of these studies, the following results were

established: the selected deformation scheme provides a uniform distribution of deformation, which will ensure uniform processing of the cast structure of the steel billet and will contribute to the rational arrangement of the internal texture, increase the properties of the product and reduce the allowances for machining when forging large-sized spherical bottoms. Based on the considered different methods of distributing spherical bottoms with different plates, special equipment was developed (turntable and deforming plates). The conducted studies allowed to establish rational technological modes of distributing the conical billet, which ensured a high degree of processing of the cast structure of the ingot, provided a favorable arrangement of the internal texture of the alloy. The study of the deformation of spherical bottoms by sequential distribution with conical and spherical plates required the development of a comprehensive methodology that takes into account the two-pass nature of the distribution process. The mechanical properties of the finished bottom on steel forgings were established. Forging and dispensing modes of a conical billet were developed, which took into account the thermal and speed conditions of the real process of forging large-sized bottoms. The scientific novelty of these studies lies in taking into account most of the physical processes inherent in the technology of forging large forgings. Based on the results of the work, an analysis of existing technological processes for the manufacture of large-sized bottoms by forging was made, on the basis of which a new process of their dispensing was designed. On the basis of the comprehensive studies conducted, forging equipment was designed. Regularities of the shape change of a hollow billet in the process of sequential dispensing by conical and spherical plates were identified, which describe the influence of the geometric parameters of the billet and the tool on the distribution of deformations in the bottom wall. Methods were compiled and recommendations were developed for the design of technological processes and forging equipment for dispensing spherical bottoms. Scientific novelty: 1) A new scientifically based approach to designing the technological process of forging spherical bottoms has been developed, which has allowed to reduce the allowances for mechanical processing and the complexity of the forging process. 2) For the first time, the regularities of the shape change of the bottom

wall have been established, depending on the different geometric dimensions of the initial workpiece, which allowed to give recommendations on the geometry of the deforming tool and technological modes of sequential distribution for the production of bottoms with given dimensions. 3) For the first time, a mathematical model of the different thickness of the bottom wall has been established, depending on the different ratios of the dimensions of the initial workpiece, which allowed to determine the dimensions of the conical hollow workpiece before distribution by a spherical plate. 4) For the first time, the distribution of deformations in the body of the stamped bottom using the new technology has been established, depending on the different geometric dimensions of the workpiece before distribution, which made it possible to assess the uniformity of the processing of the metal structure. The practical value of the work lies in reducing metal consumption by reducing the allowances for machining and reducing the labor intensity of the forging process in the production of large-sized bottoms of critical purpose, namely: 1. The use of sequential operations of distributing the bottom with conical and spherical plates with segmental cutouts allowed to reduce the deformation force by 20...25% compared to the classical forging technology, which reduced energy consumption. 2. The established patterns of shape change of the workpiece in the process of combined distribution with conical and spherical plates allowed to establish a rational shape and dimensions of the initial workpiece, which allows to produce bottoms without allowances. This allows to reduce metal consumption by 10...15%. 3. Manufacturing bottoms using the distribution operation allowed to reduce the labor intensity of the forging process by 10...15%. 4. The established optimal angle of the conical plate for distributing the hollow billet allowed us to design a universal deforming tool that can be used for bottoms of different diameters. 5. The developed new technological process for forging bottoms and covers was implemented at PJSC "Energomashspetsstal", and it will also be a useful learning for the following enterprises: PrJSC "Novokramatorsk Machine-Building Plant", PJSC "Turboatom", SE "Electrozahmash", etc.

**Keywords:** distribution, forging, bottom, MSE, reactor, NPP, deformations, ingot, conical plate, spherical plate, hydraulic press

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Karnaukh S.G., Markov O.E., Aliiev I.S., Stankov V.U. Cutting of rolled metal with a stress concentrator marked by the elastic deformation of the press. *International Journal of Advanced Manufacturing Technolog.* 2025. 136(7), pp. 3791–3801. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15043-7>
2. Соколов Л.М. Розширення при куванні плит/Л.М. Соколов, О.Є. Марков, В.Ю. Станков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2000. – С. 168–170.
3. Алієва Л. І. Кування поковок типу валів з поздовжнім зсувом спеціальними бойками / Л. І. Алієва, Я. Г. Жбанков, В. Ю. Станков // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. тр. Темат. вип. : Нові рішення у сучасних технологіях – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 43 (1016). – С. 3-10.
4. Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми / Марков О. Є., Косілов М. С., Станков В. Ю., Різак П. І. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №40, 2017. – 114-120 с. . – ISSN
5. Розробка нового способу кування днищ / О. Є. Марков, В. Ю. Станков, Ковалевський С.В., Косілов М.С. // Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць.. – 2017. – №2(45). – С. 63–66. – ISSN 2076-2151.
6. Марков О. Є., Станков В.Ю., Панов В. В., Зінський В. М. Дослідження способу деформування пустотілих заготовок з дном бойками зі скосами // Обробка матеріалів тиском. – 2023. – № 1 (52) 71 – 78 с. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)71](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)71)
7. Грановський, А., Левченко, В., Станков, В., & Марков, О. (2026). Розрахунок приведенного тиску прямого видавлювання деталей з кінчною порожниною енергетичним методом балансу потужностей. *Технічні науки та технології*, 2 (44), 138–156. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-138-156](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-138-156)

8. Калюжний В., Марков О., Горностай В., і Станков В. Застосування холодної екструзії з прикладанням протитиску за допомогою рідини для виготовлення заготовок карбувальних пуансонів із сталі ШХ-15 ШД, *Mech. Adv. Technol.*, т. 10, вип. 2(109), Чер 2026. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2026.10.2\(109\).347015](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2026.10.2(109).347015)

9. Грановський А., Станков В. Верхня оцінка приведенного тиску та оптимізація параметрів схеми зворотного видавлювання деталей з конічною порожниною, *Mech. Adv. Technol.*, т. 10, вип. 2(109), 2026, 51-70 с. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2026.10.2\(109\).356881](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2026.10.2(109).356881)

10. Марков О.Е., Станков В.Ю., Хващинський А.С., Мусорін А.В., Молодецький В.В., Лисенко А.А. Дослідження процесу осадження масивних профільованих заготовок при виготовленні деталей відповідального призначення. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском. Матеріали XIII МНТК 30 травня – 1 червня – Київ: КПІ, 2023. – С. 24-26.

11. Марков О.Є., Хващинський А.С., Станков В.Ю., Молодецький В.В., Лисенко А.А. Дослідження способу кування крупних злитків з використанням операції профілювання. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI МНТК 20 – 22 червня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. – С.91-92.

12. Пат. 122598 Україна, МПК В21J 5/02 (2006.01), В21J 5/08 (2006.01), В21J 1/04 (2006.01). Спосіб кування поковок типу валків / Кальченко П.П., Марков О. Є., Алієв І. С., Станков В. Ю., Качура Є. Д., Лобанов О. І., Косілов М. С.; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № a201809102; заявл. 03.09.2018 опубл. 10.12.2020, Бюл. № 23. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1467678>

13. Пат. 131744 Україна, МПК (2006) В 21 J19/00, В 21 J5/00. Ковальський бойок для розкочування великогабаритних східчастих обичайок / Марков О. Є., Косілов М. С., Станков В. Ю., Герасименко О. В., заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u201808523;

заявл. 06.08.2018; опубл. 25.01.2019, бюл. № 2. – 4 с.  
<https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/734850/>

14. Пат. 132710 Україна, МПК (2006) В 21 J1/04, В 21 J5/00. Спосіб кування поковок типу валків / Кальченко П.П., Марков О. Є., Алієв І. С., Станков В. Ю., Качура Є. Д., Лобанов О. І., Косілов М. С. заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u201809114; заявл. 03.09.2018; опубл. 11.03.2019, бюл. № 5. – 4 с.  
<https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1281666/>

15. Пат. 121903 Україна, МПК В21J 13/02 (2006.01), В21J 9/02 (2006.01), В21J 5/02 (2006.01). Ковальський бойок для розкочування великогабаритних східчастих обичайок / Марков О. Є., Косілов М. С., Станков В. Ю., Герасіменко О. В.; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № a201805234; заявл. 11.05.2018 опубл. 10.08.2020, Бюл. № 15.  
[https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1447223](https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1447223/)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ОСНАСТКА, МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ І ЯКІСТЬ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВЕЛИКИХ ПОКОВОК .....	17
1.1. Сучасні підходи до проектування та вдосконалення технологічних процесів отримання великих поковок відповідального призначення .....	17
1.2. Перспективи розвитку технологій та оснащення для кування великих поковок відповідального призначення .....	33
1.3 Виробництво днищ методами радіального та ротаційного обтискання	38
1.4 Дослідження процесів кування крупних поковок .....	42
Висновки до розділу 1.....	46
РОЗДІЛ 2. ВИБІР НАПРЯМКИ, МЕТОДІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ КОВКИ ВЕЛИКИХ ДНИЩ .....	47
2.1. Вибір напрямку наукових досліджень у галузі виробництва великих днищ куванням.....	47
2.2. Методика теоретичного дослідження методом скінчених елементів процесу кування сферичного «Днища».....	48
2.3. Планування математичного експерименту.....	50
2.4. Методика проведення експериментальних досліджень.....	53
Висновки до розділу 2.....	58
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ПРОЦЕСУ РОЗДАЧІ ЗАГОТОВКИ НА ФОРМОЗМІНУ І ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ДНИЩА.....	60
3.1 Перевірка базової технології штампування крупногабаритних днищ в умовах ПрАТ «Енергомашспецсталь» .....	60

	14
3.2 Формозміна та деформований стан конусної глуходонної заготовки після роздачі сферичним пуансоном .....	71
	72
3.1.1. Роздача заготовки з відносним діаметром отвору 0,5.....	72
3.1.2. Роздача заготовки з відносним діаметром отвору 0,6.....	73
3.1.3. Роздача заготовки з відносним діаметром отвору 0,7.....	74
3.3 Визначення раціональних геометричних параметрів пустотілої заготовки до роздачі сферичним пуансоном .....	77
3.4 Визначення раціональних геометричних параметрів пустотілої заготовки перед роздачею конусним пуансоном .....	84
3.5 Верифікація та удосконалення та процесу роздачі днищ .....	88
Висновки до розділу 3.....	101
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДАЧІ ДНИЩА КОНУСНИМ ТА СФЕРИЧНИМ ПУАНСОНАМИ .....	103
4.1 Роздача конусної пустотілої заготовки сферичним пуансоном .....	103
4.2. Роздача конусної пустотілої заготовки з циліндричним пояском .....	106
4.3 Роздача конусної пустотілої заготовки конусним та сферичним пуансонами .....	109
4.4 Порівняння силових параметрів процесу роздачі.....	111
4.5 Порівняння теоретичних та експериментальних результатів.....	113
Висновки до розділу 4.....	115
РОЗДІЛ 5. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ОСНАЩЕННЯ ПРОЦЕСІВ КУВАННЯ ДНИЩ РОЗДАЧЕЮ.....	116
5.1. Рекомендації та методика для проектування нових ресурсозберігаючих технологічних процесів кування днищ роздачею.....	116
5.2 Проектування технологічного процесу кування деталі «Днище».....	122
5.3 Проектування штампового оснащення .....	131
5.4 Апробація розробленої технології в умовах ПрАТ «Енергомашспецсталь».....	135

5.5 Випробування якості виготовлених днищ.....	136
Висновки до розділу 5.....	138
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	142
Додаток А – Матриця планування у закодованому вигляді.....	157
Додаток Б – Програма у системі MathCad 7.....	158
Додаток В – Креслення деталі «Днище».....	163
ДОДАТОК Г – Таблиця контролю якості деталі «Днище» .....	164
ДОДАТОК Д – Результати механічних випробувань .....	165
ДОДАТОК Е – Ультразвукове дослідження поковки «Днище» .....	173
ДОДАТОК І – Акт впровадження результатів роботи на ПрАТ «Енерго- машспецсталь» .....	17

## ВСТУП

Найважливішою умовою науково-технічного прогресу є зростання продуктивності праці, підвищення ефективності виробництва та покращення якості продукції.

Удосконалення машинобудування за рахунок впровадження прогресивних технологій кування сприяє підвищенню економічної ефективності виробництва, якості, довговічності продукції, а також економії матеріальних та енергетичних ресурсів. Впровадження даних технологій у сучасних умовах ринкової економіки дозволить підприємствам України успішно конкурувати на світовому ринку.

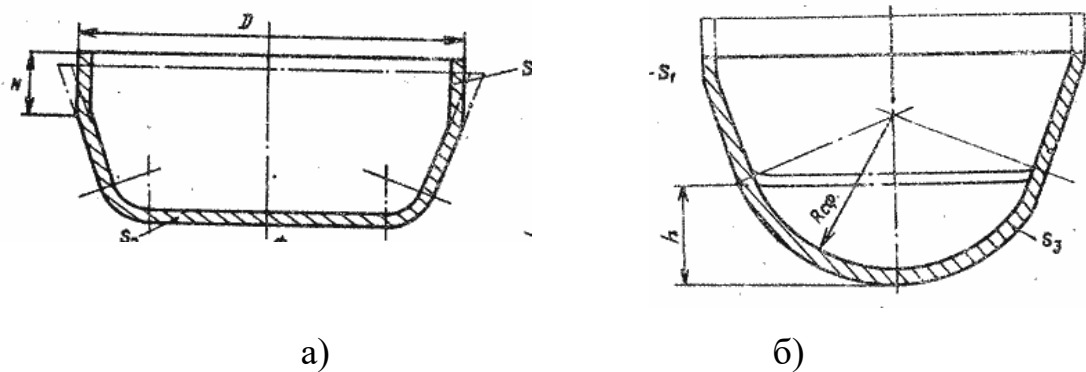
Існуючі технології виробництва поковок типу днище передбачають формування заготовки по ділянках з наступною витяжкою, протяжку на оправці з подальшою роздачою заготовки, циклічну локальну осадку по колу циліндричної заготовки, а також формування попередньо нагрітого кінця трубчастої заготовки, що обертається, і зварювання. Ці методи виготовлення днищ не забезпечують опрацювання структури металу, мають велику кількість переходів, недостатню надійність зварного шва, а також потребують більш енергоємного обладнання. Відомі способи отримання великогабаритних днищ методами зварювання двох або кількох катаних або кованих заготовок характеризуються значною трудомісткістю, малим коефіцієнтом використання металу, не забезпечують високої надійності виробів, т.к. при виготовленні корпусів неминуче отримання зварних швів, що перетинаються, що неприпустимо при виробництві вузлів енергетичних установок. Визначення основних технологічних параметрів процесу кування днищ є складним завданням. Тому у виробництві велика кількість експериментальних і довідкових робіт, а режими обробки, що реалізуються, далекі від оптимальних.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ОСНАСТКА, МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ І ЯКІСТЬ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВЕЛИКИХ ПОКОВОК

### 1.1 Сучасні підходи до проектування та вдосконалення технологічних процесів отримання великих поковок відповідального призначення

В.О. Смирнов розробив спосіб штампування куполоподібних днищ, що включає багатоперехідну витяжку з наступним обтиском [1]. Спосіб здійснюють наступним чином. На першому переході витяжки з листової заготовки штамнують напівфабрикат конусної форми з плоским дном, кут нахилу якого дорівнює куту нахилу готового днища (рис 1.1). На другому переході витяжки з боку відкритого торця на напівфабрикаті формують циліндричну ділянку. Спосіб забезпечує вилучення потоншення стінки днища, дозволяє знизити величину вихідної плоскої заготовки, підвищити КВМ, забезпечує підвищення якості.

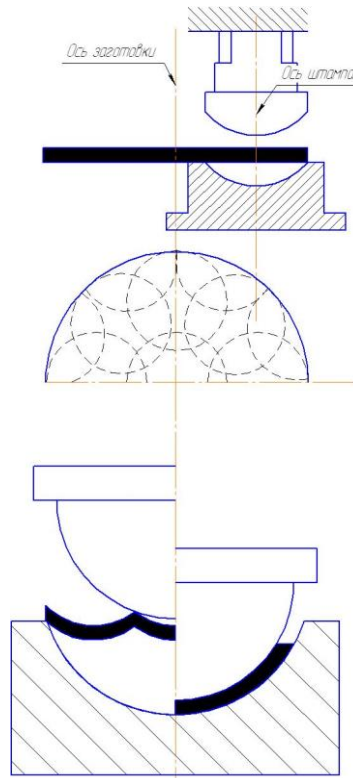


а - перший перехід; б – другий перехід.

Рисунок 1.1 – Схема виготовлення днищ

С.Т. Лії та Ю.І. Козлов запропонували спосіб виготовлення великогабаритних днищ [2], що включає формування заготовки по ділянках з подальшою

втяжкою до надання остаточної форми, який відрізняється тим, що з метою підвищення продуктивності, процес формування починають з центральної ділянки заготовки, якому відразу надають остаточної форму. Після чого проводять формування інших ділянок від центру до периферії по спіралі (рис.1.2).



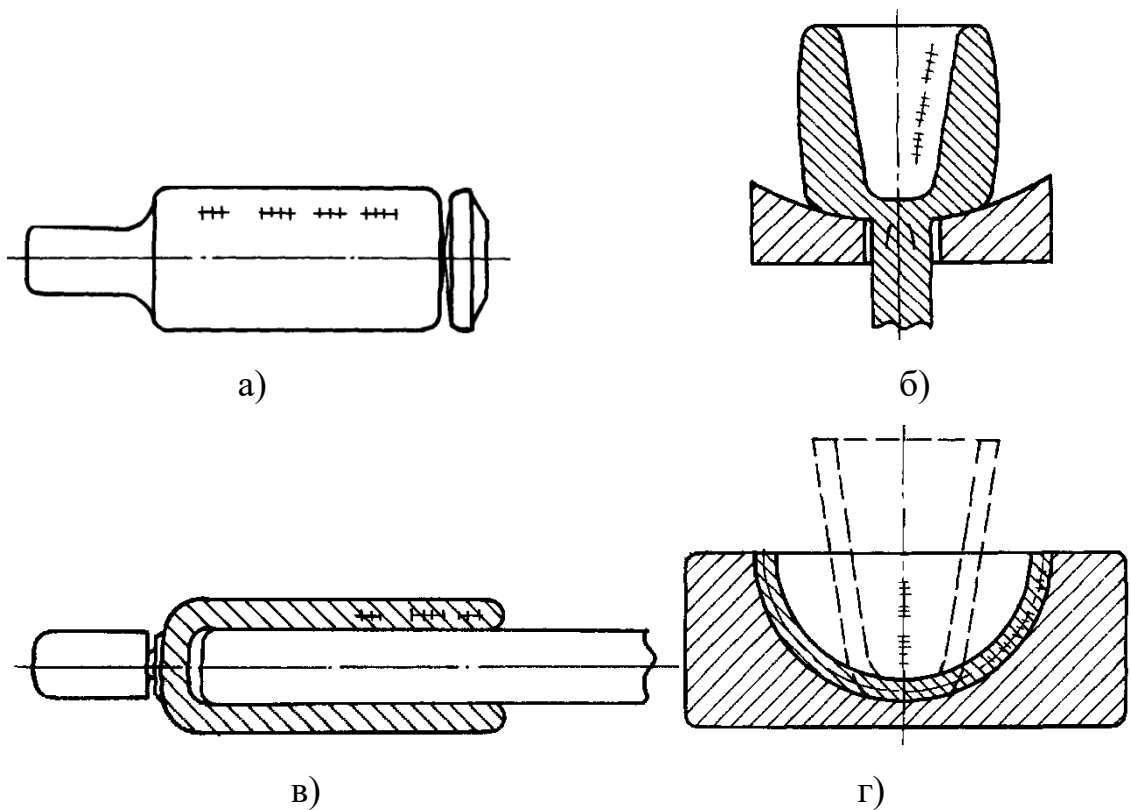
1 – матриця; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – деталь.

Рисунок 1.2 – Пристрій та заготовка для штампування днища

Таким чином, за рахунок великих послідовних обтискань ділянок заготовки необхідна форма виробів виходить за меншу кількість ходів штампу. Внаслідок того, що центральна частина заготовки продеформована, зменшується складкоутворення периферійних частин, що дозволяє проводити більш інтенсивне обтиснення.

О.К. Онищенко розробив спосіб виготовлення поковки по типу днища або кришка реактора зі зливка [3], що включає осадження і прошивку зливка, відрізняється тим, що перед осадженням злиток протягують і видаляють у

відхід його донну частину, після осадження виробляють неповну прошивку заготовки суцільним прошивнем з боку донної частини зливка з утворенням заготовки «стакана» з дном завтовшки, що дорівнює товщині поковки, протяжку ведуть на оправці зі ступенем деформації стінки не менше 50% до товщини, що дорівнює товщині поковки, роздачу стінки на конус і формування заготовки в штампі на остаточні розміри поковки (рис.1.3). Спосіб відрізняється тим, що роблять осадження заготовки з цапфою з прибуткової частини зливка. Осадження заготовки з цапфою здійснюють на нижній сферично увігнутій плиті з центральним отвором. Після протягування на оправці стінки заготовки, цапфу із прибуткової частини зливка видаляють у відхід.



а - видалення донної частини зливка; б – прошивка заготовки; в – протяжка на оправці; г - роздача заготовки

Рисунок 1.3 – Технологічний процес виготовлення днища

Суттєвим недоліком цього способу є те, що при куванні днищ та кришок є необхідність використання спеціальної оправки циліндричної форми, яку

буде складно витягнути після кування з порожнього циліндра з дном, крім того для кування за даною технологією необхідно використовувати два ковальські маніпулятори, або маніпулятор та ковальський кран з кантувачем, що ускладнює. Крім того, після протягування на оправці порожньої заготовки з дном, що має циліндричну форму з товщиною стінки, яка дорівнює товщині поковки не можливо зберегти цю товщину стінки при роздачі конусною та сферичною плитою. Це призведе до зменшення товщини стінки поковки у верхній частині і, як наслідок, невідповідності товщини стінки розмірам поковки, які задані кресленням. Більш того, не передбачена фіксація порожнього циліндра з дном на нижній сферичній плиті, що може призвести до завалювання заготовки при її подаванні до робочого простору преса за допомогою рухливого столу.

В основу способу О.Є. Маркова поставлено завдання зменшення трудомісткості кування великих днищ, виключення завалювання заготовки та забезпечення при куванні стінки поковки рівної товщини по всій її висоті (рис. 1.4) [4]. Використання цього способу та спеціальних механічних режимів кування дозволить виготовляти великогабаритні поковки днищ з меншими витратами на кування та одержувати поковки із заданою товщиною стінки. Поставлене завдання досягається за рахунок того, що для реалізації запропонованого способу протягування заготовки після ненаскрізного прошивання відбувається вирізними бойками на конусну ступінчасту форму без використання оправки всередині напівфабрикату, а залишкова роздача та штампування проводяться на сферичній плиті з осьовим отвором. Суть способу пояснюється кресленням (рис. 1.4).

Е.Л. Мельников розробив спосіб штампування сферичних, еліптичних та інших куполоподібних днищ [5]. Спосіб штампування днищ шляхом початкового штампування центральної частини днища з наданням їй остаточних розмірів і форми і остаточного формоутворення периферійних ділянок днища, який відрізняється тим, що, з метою підвищення продуктивності праці, на першому переході одночасно з штампуванням концентричні кільцеві ребра жорсткості з кривизною в поперечному перерізі, що зменшується від периметра

заготовки до центру (рис.1.5). Потім переміщенням пуансона у напрямку матриці роблять штампування другого переходу (рис. 1.6).

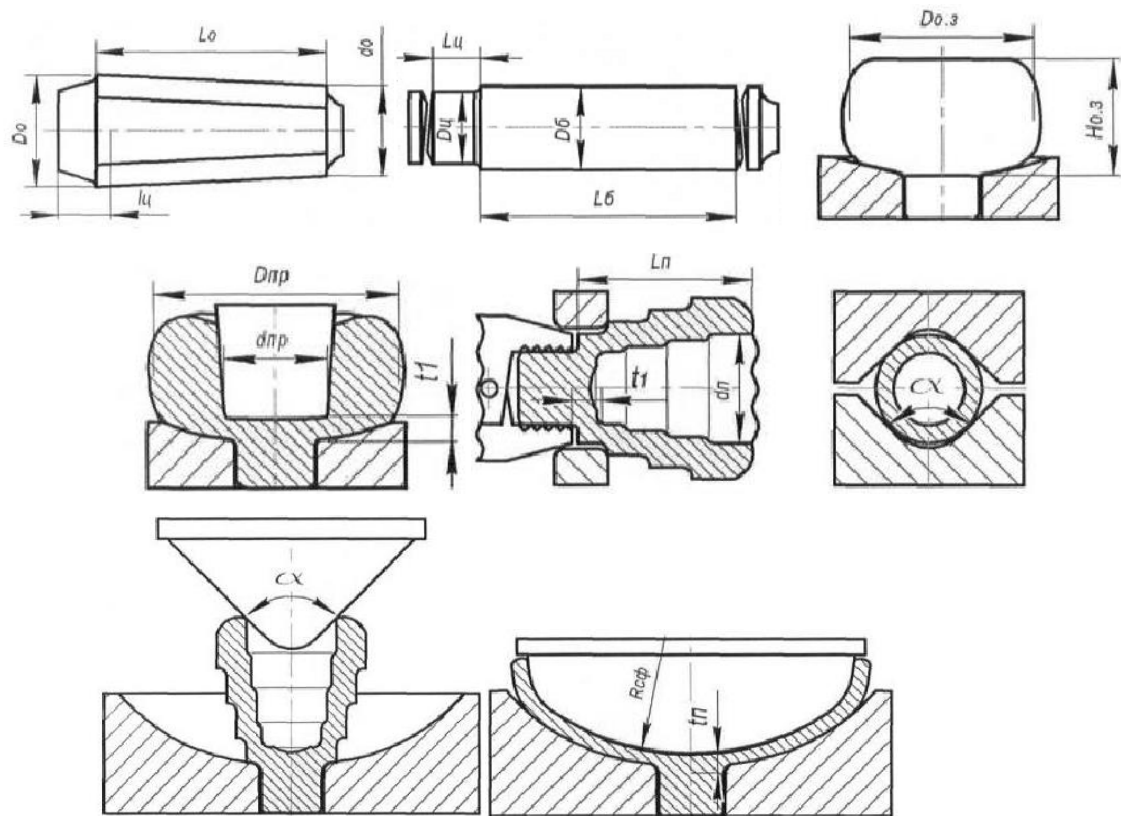


Рисунок 1.4 – Технологія виготовлення великих днищ з глухodonної заготовки опервцією роздачею

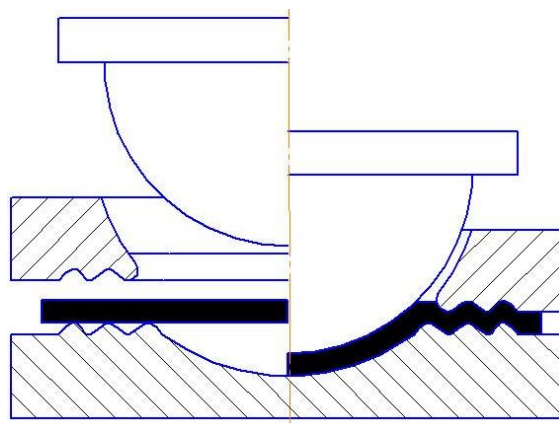


Рисунок 1.5 – Перший перехід штампування

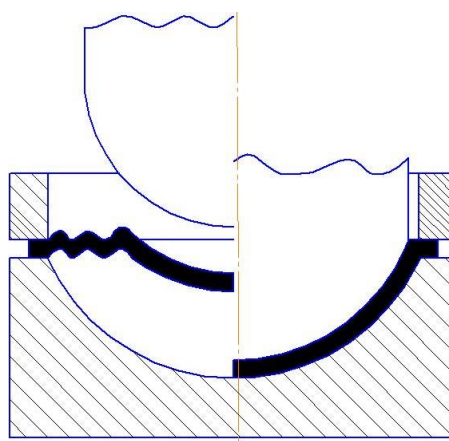
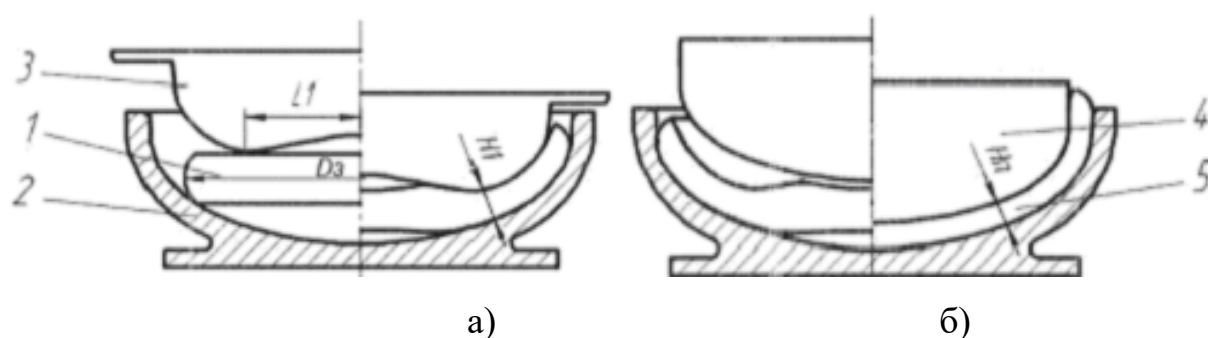


Рисунок 1.6 – Остаточний перехід штампування

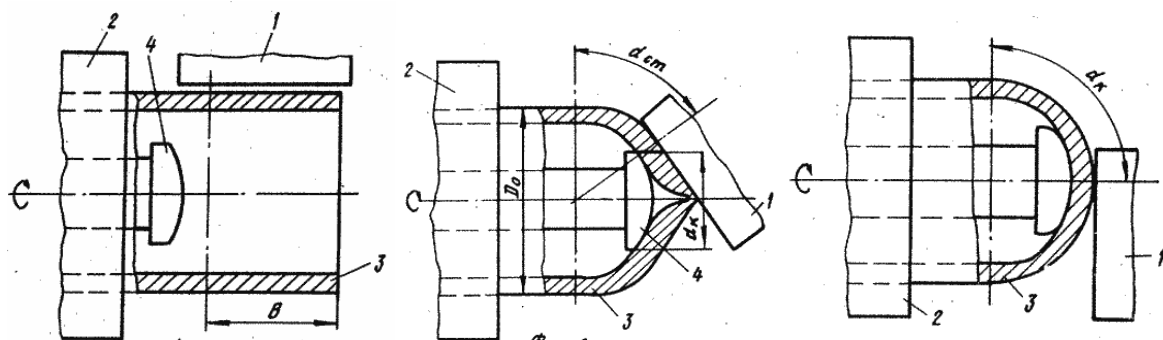
М.В. Єфімов та ін. розробили спосіб кування вісесиметричних виробів локальним деформуванням [6], який полягає в циклічному локальному осадженні по колу вузьким бойком циліндричної заготовки, який поєднується з її обертанням навколо осі на кут, який забезпечує перекриття бойком частини осередка деформації попередньої локальної осадки, який відрізняється тим, що спочатку вузьким бойком осаджується кільцева, з внутрішнім радіусом  $L1=(0,2-0,3) \cdot Dз$ , периферійна частина заготовки діаметром  $Dз$  до товщини  $H1=(1,1-1,3) \cdot Hп$ , після чого здійснюється локальне осадження послідовно центральних і периферійних ділянок напівфабрикату до товщини  $Hп$  формуючим вузьким бойком, причому бойок має потовщення в центральній частині радіусом  $R < L1$  (рис. 1.7).



1- заготовка; 2 – матриця; 3 – пуансон

Рисунок 1.7 – Спосіб кування вісесиметричних виробів (а – перший перехід; б – другий перехід)

М.В. Пирогов [7] запропонував спосіб виготовлення днищ балонів (рис.1.8) шляхом формування попередньо нагрітого кінця обертової трубчастої заготовки з додатковим нагріванням її торцевих кромки перед їх змиканням і зварювання з утворенням днища відрізняється тим, що з метою підвищення якості балонів шляхом зменшення грата в зварному шві, в процесі формування після змикання торцевих кромки до заготовки з внутрішньої її сторони в зоні утворення зварного шва прикладають осьове зусилля з відносним обтисканням стінки, що становить 10-20%.



1 – формувач; 2 – шпindelь машини; 3 – заготовка; 4 – профілюючий пуансон

Рисунок 1.8 – Спосіб виготовлення днищ балонів

Є.Д. Горохов розробив спосіб виготовлення днищ [8], що включає нагрівання і витримку листової заготовки, створення нерівномірного температурного поля з температурою центральної зони заготовки на 150-200°C нижче температури периферійної зони і витяжку, який відрізняється тим, що, з метою підвищення якості шляхом зменшення величини потоншення стінки днищ, перед нагріванням на заготовку з обох боків співвісно встановлюють теплоізолюючі прокладки діаметром 0,25-0,75 діаметра заготовки (рис.1.9).

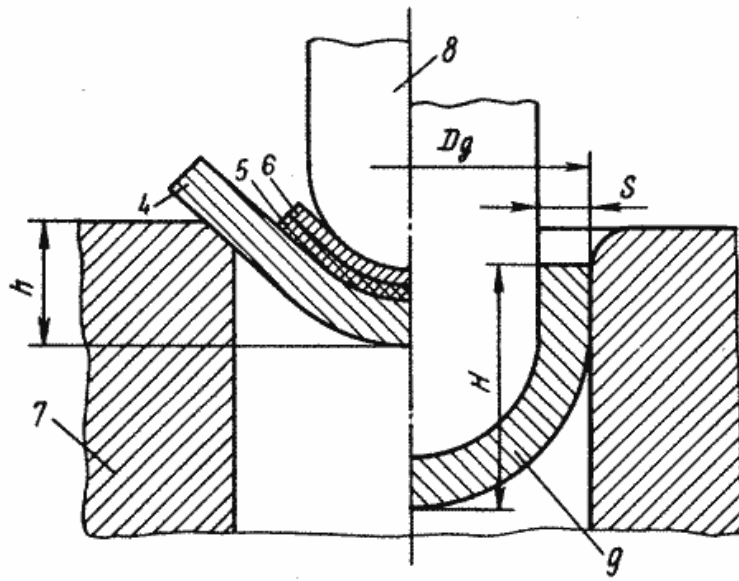


Рисунок 1.9 – Спосіб виготовлення днищ

М.І. Ромашко розробив технологію виготовлення заготовок для витяжки безшовних днищ великого діаметра [9]. Після попередньої термічної обробки у поковці труби по довжині вирізують сектор і встановлюють заготовку на плиту преса столу. Потім через вирізаний сектор трубно поковку вводять інструмент, що деформує, виконаний у вигляді плоского бойка. Під час руху бойка вниз здійснюється перший перехід розгортки труби. Після цього шляхом послідовної зміни бойків різних розмірів і форми виконують ще 2-3 переходи до надання заготовці форми плоскої плити необхідних розмірів (рис.1.10). Отримані таким чином плити використовують як заготовки для штампування днищ.

П.П. Кальченко та співавтори розробили спосіб виготовлення великогабаритних днищ, що включає одержання із заготовки виробів у вигляді напівсфери шляхом її пластичного деформування [10]. Спосіб здійснюється наступним чином: великогабаритний злиток білетують, осаджують. Зі зливка прошивкою видаляють дефектний метал. Потім отриманий фабрикат розкочують та заковують з двох кінців. Отриману порожнисту сферу піддають термообробці

та розрізають уздовж вихідної осі на дві різні частини. З кожної півсфери шляхом механічної обробки виготовляють днище.

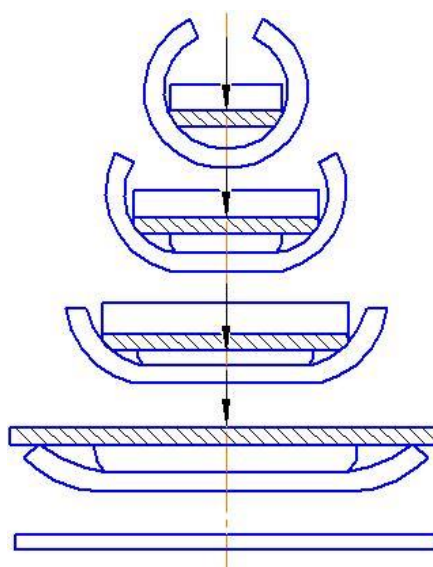


Рисунок 1.10 – Схема процесу розгортання трубної заготовки

В.Г. Останін розробив нову технологію кування поковок типу днищ та горловин [11]. Поковка за новою технологією виготовляється за такою схемою: відтяжка цапфи з прибуткової частини зливка під патрон, білетування зливка, відрубубування донної частини зливка та заготовки, незначне осадження, щоб збити окалину, далі укладають заготовку в контейнер і штампують її (рис.1.11). Поковки виготовлені даним способом, виходять вагою 9300 кг, що дозволяє у порівнянні з базовою технологією підвищити вихід придатного зливка і значно знизити трудомісткість обробки поковки на металорізальних верстатах.

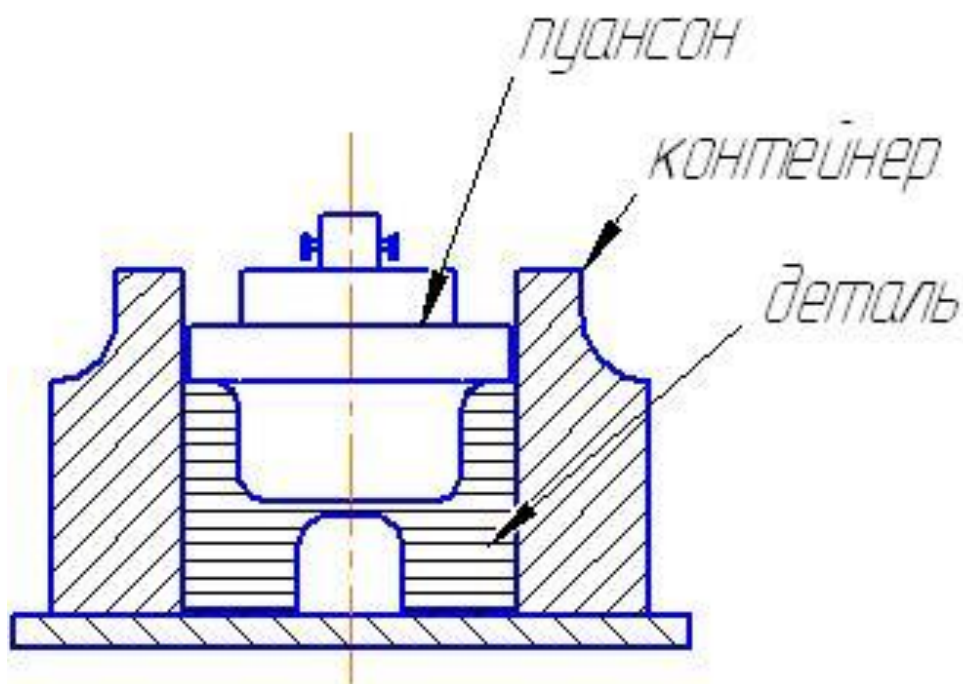
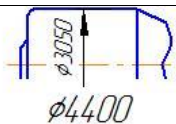
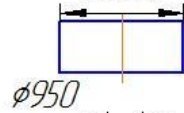

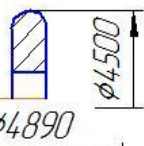
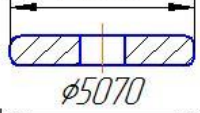
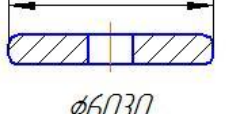
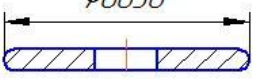
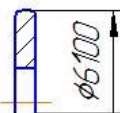
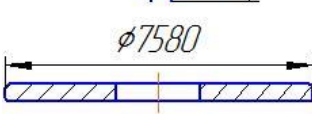
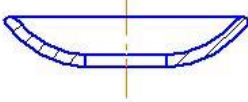


Рисунок 1.11 – Схема штампування днища

Деталі типу днищ атомних реакторів діаметром 6570 мм успішно виробляють заводі «Моңу» [12]. Необхідна якість при виробництві цих поковок досягається за рахунок подвійного рафінування та подвійної дегазації. Отримання рівномірного розподілу дрібних зерен забезпечується за рахунок спеціальних умов термічної обробки. Внутрішній діаметр атомного реактора "Моңу" 280 МВт (Японія) становить 7 м. Висока якість великих поковок з мінімальною кількістю зварних швів забезпечує наступні істотні переваги: високу міцність і герметичність за рахунок зменшення кількості зварних швів, висока точність розмірів реактора, що в цілому полегшує виготовлення, підвищує безпеку та надійність в експлуатації [13]. Невелика кількість зварних швів знижує період виготовлення. Ці поковки були успішно доставлені і в даний час працюють на зазначеному об'єкті. У таблиці 1.1 представлено короткий опис виготовлення куванням корпусу реактора великого розміру з аустенітної нержавіючої сталі.

Таблиця 1.1 - Технологія кування днища реактора

Формотворчі процеси	Ескіз
Злиток	
Осадження	
Прошивка	
Розкочування	
Осадження	
Розкочування	
Осадження поза пресом	
Розкочування	
Осадження поза пресом	
Кування	

Тенденції збільшення одиничної потужності АЕС (1300 МВт на добу) вимагає отримання куванням великих поковок діаметром 5800 мм (кільця, днища) [14, 15], а також отримання цілісних роторів турбін. Це зажадало від Japan Steel Works виробництво великих злитків масою 570 т. Матеріал поковок – 20MnMoNi55 (аналог SA508). Розмір поковок: фланці – 8440 мм, гільзи та днища – 7920 мм. Основний упор при отриманні сталі полягав у мінімізації шкідливих домішок (P, S, As, Sn, Sb, Cu). Термічна обробка була необхідна для

зниження рівня водню і полягала в нормалізації та відпустки з наступним загартуванням у воді. Отримані поковки відповідали необхідним механічним властивостям за міцністю та ударною в'язкістю. Технологія кування представлена у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Технологія кування днища зі злитка 500 т

	Forging Process	Sketch
1	Ingot T. & B. discard by flame cutting	
2	Upsetting	
3	Upsetting	
4	Upsetting	
5	Upsetting	
6	Upsetting	
7	Finish forging	
8	Hot forming	

Yasuhiko Tanaka, Ikuo Sato розробили технологію виробництва великих поковок високої якості для атомної електростанції [16, 17]. Для забезпечення надійності та ефективної роботи великих поковок потрібне одержання сталей

високої чистоти, і реалізація технології кування вимагає гомогенізації матеріалу та усунути пористість. Для задоволення цих умов були розроблені та покращені: метод подвійної дегазації, щоб зменшити кількість газів; мульти заливні методи, щоб отримати великі зливки; процес теплового кування. Крім того, виплавку сталі проводили у вакуумній індукційній печі і переплавлення зливка електрошлаковим способом. Ці технології застосовуються також для виготовлення аустенітних сталей деталей корпусу реактора (рис.1.12).

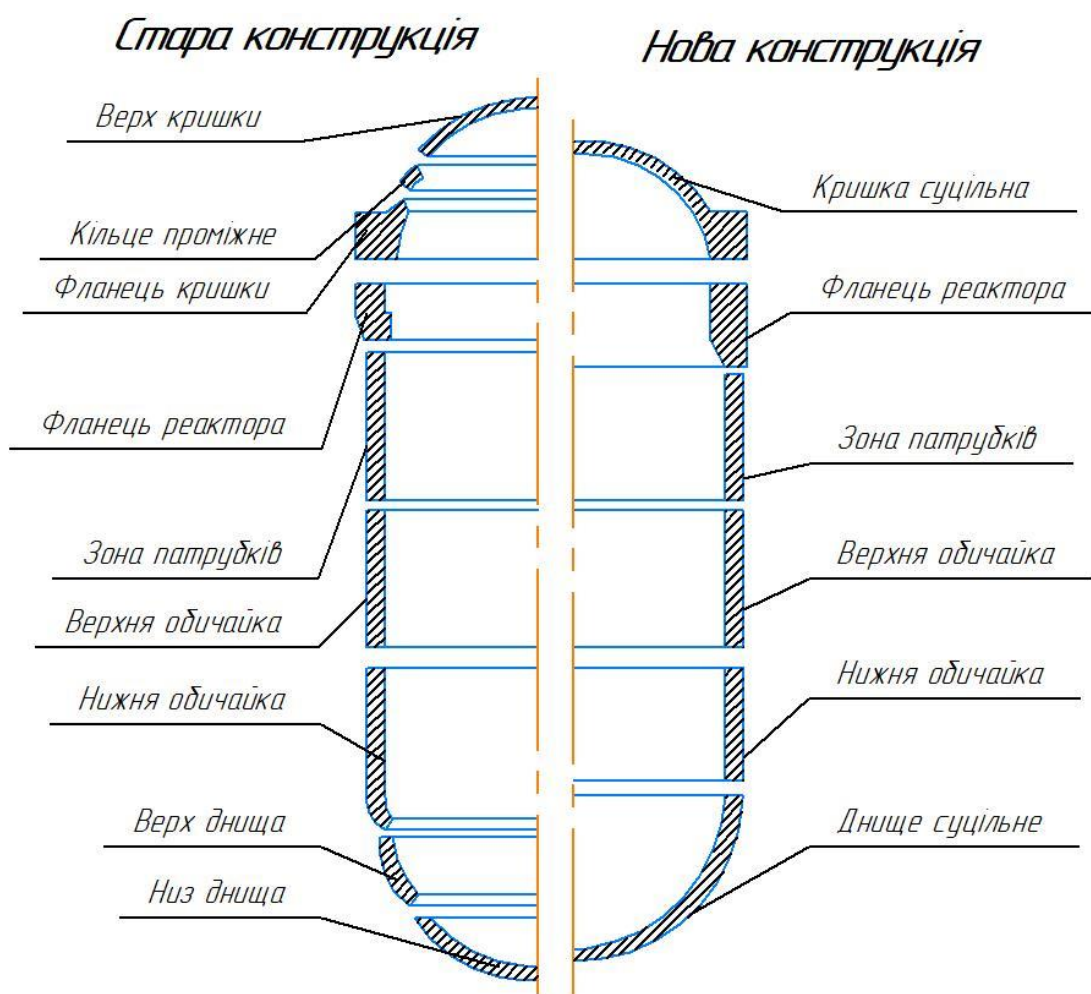


Рисунок 1.12 – Сучасна конструкція ядерного реактора із зменшеною кількістю складових його деталей

В останні роки як матеріал для отримання деталей відповідального призначення в атомній енергетиці застосовувалася аустенітна сталь X10CrNiNb

[18, 19]. Подальше вдосконалення виробництва деталей атомних реакторів полягає також у застосуванні нових корозійностійких та зносостійких марок сталей, наприклад, X5CrNi13(аналог SA 182, Gr . F6NM), замість сталей аустенітного класу. Ця сталь має теплове розширення феритних сталей, високу міцність, ударну в'язкість, а також дозволяє підвищити звучання деталей при ультразвуковому контролі.

У роботах Komei Suzuki та ін. представлений приклад кування великих поковок для виготовлення днища реактора [20, 21], виготовленого зі злитка масою 600 т. Зовнішній діаметр днища 7,8 м, висотою 1,8 м та товщиною стінки 1,1 м. Дуже високий рівень чистоти ( $P \sim 0,003\%$  та  $S \sim 0,003\%$ ) досягнутий із застосуванням подвійного процесу очищення розплавленої сталі. Поковки мали однорідний хімічний склад, забезпечували вимоги ультразвукового контролю (УЗК) та задані властивості ударної в'язкості.

У роботах [22] представлені різні варіанти деталей типу днищ, які використовуються для проектування парогенераторів атомних електростанцій. Це днища з соплами, люки та опори, барабан із соплом та відводами, конусні кільця з циліндричними ділянками та відводами (рис. 1.13, а). Дані поковки виходять штампуванням за схемою, представленою рисунку 1.13, б.

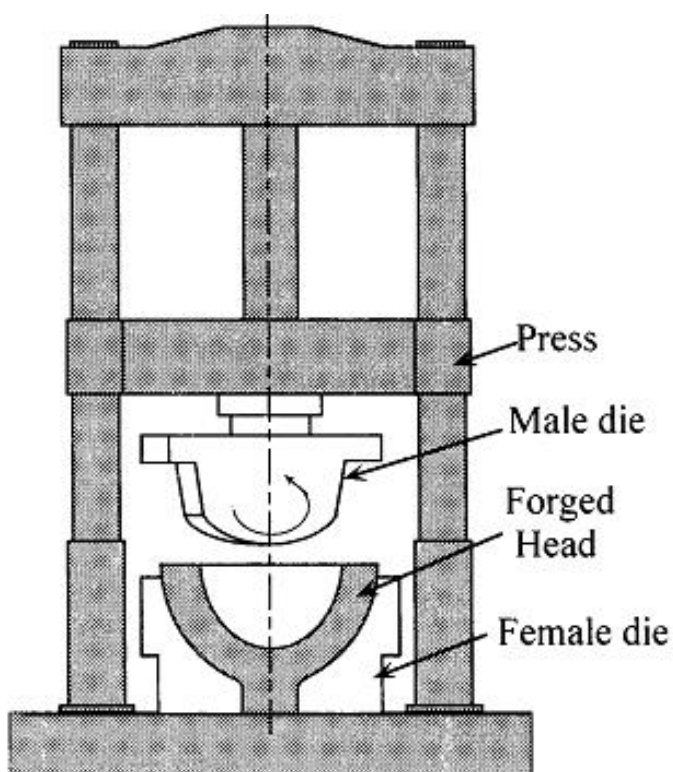
Корпус реактора із сталі 2.25 Cr -1 Мо , що працює за високих температур був розроблений Японським дослідницьким інститутом атомної енергетики [23]. Висота реактора становить 13,2 м, внутрішній діаметр 5,5 м. Температура випробувань становила 400°C тиск 4 МПа. Тест підтвердив високу стійкість корпусу реактора кованої низьковуглецевої сталі Si 2.25 Cr - 1 Мо. На Японському металургійному заводі впроваджено у виробництво процес кування днища із соплами для трубівідводів (рис. 1.14).

В останні роки як матеріал для отримання деталей відповідального призначення в атомній енергетиці застосовувалася аустенітна сталь X10CrNiNb 18 9 (аналог 347) [24]. Подальше вдосконалення виробництва деталей атомних реакторів полягає також у застосуванні нових корозійностійких та зносостійких марок сталей, наприклад, X5CrNi 13 4 (аналог SA 182, Gr.F6NM), замість

сталей аустенітного класу. Ця сталь має теплове розширення феритних сталей, високу міцність, ударну в'язкість, а також дозволяє підвищити звучання деталей при ультразвуковому контролі.

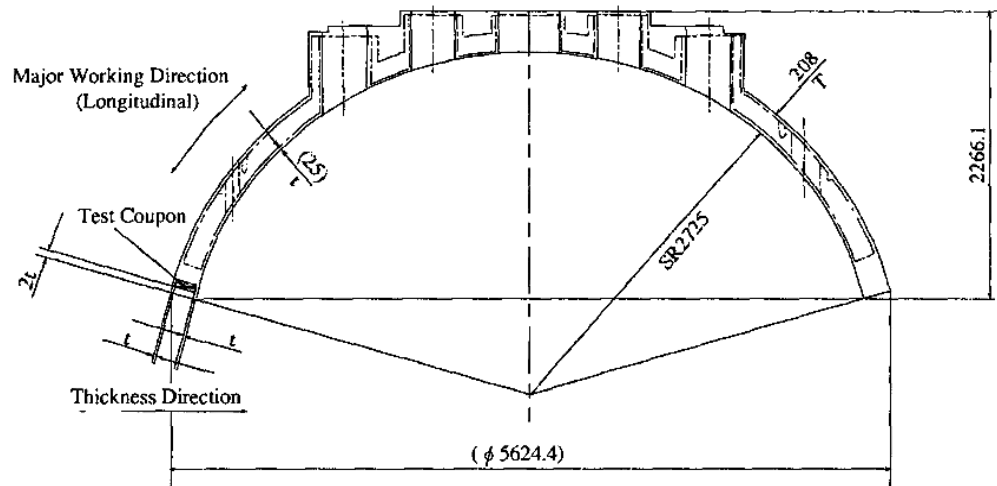


а)



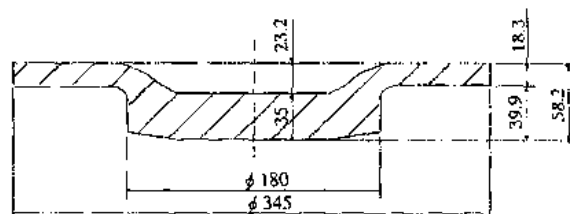
б)

Рисунок 1.13 - Дно парогенератора з відводом (а), спосіб його штамповки (б)

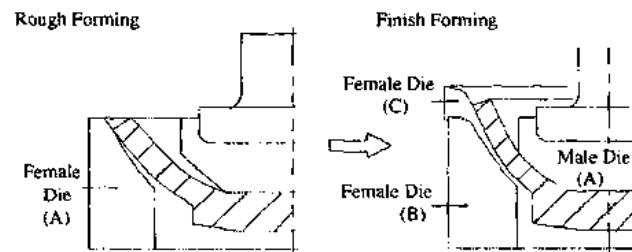


a)

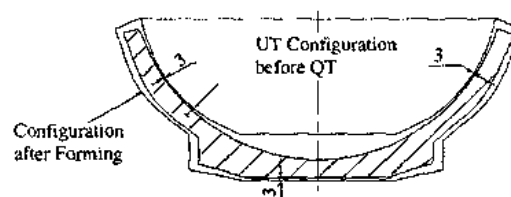
Blank Configuration



Forming Operation



Forming Configuration



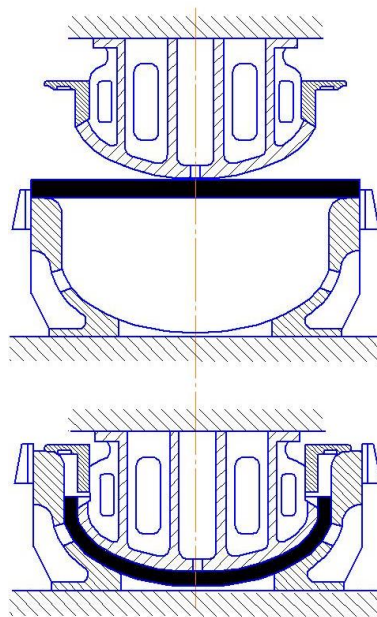
б)

Рисунок 1.14 – Приклад поковки днища з відводами (а) та технологія його штампування (б)

## 1.2. Перспективи розвитку технологій та оснащення для кування великих поковок відповідального призначення

О.А. Кобелев у своїй дисертації запропонував штабове оснащення для витяжки великогабаритних товстостінних днищ [25]. На листоштампувальному гідравлічному пресі подвійної дії зусиллям 150 МН витяжку днища здійснювали за класичною схемою центральним (витяжним) пуансоном, а притискний повзун використовували для знімання відштампованого днища з пуансона за допомогою знімного кільця, закріпленого на притиск.

При штампуванні днищ на пресі простої дії для знімання днища з пуансона використовували спеціальну конструкцію пуансона, що складається з основної частини, що формує еліптичну частину днища, і вільно встановленого на пуансоні кільця з фланцем, по якому оформляється циліндрична частина і невелика ділянка еліпса (рис.1.15).



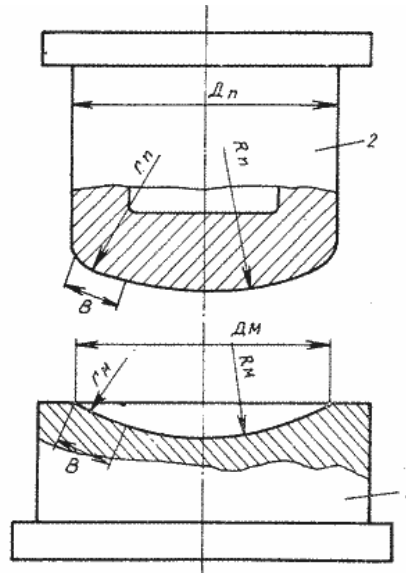
1 – пуансон; 2 – кільце; 3 – матриця

Рисунок 1.15 – Конструкція штапу для отримання днищ витяжкою із плоскої заготовки

У процесі витяжки основний пуансон та кільце працюють як єдине ціле, виконуючі штампування днища. В кінці ходу витяжки заготовка охоплює поверхню кільця, а при подальшому ході фланець кільця впирається в матрицю і основний пуансон знімає циліндричну частину днища з кільця. За цією схемою виготовлені штампи для товстостінних днищ корпусів різного діаметра.

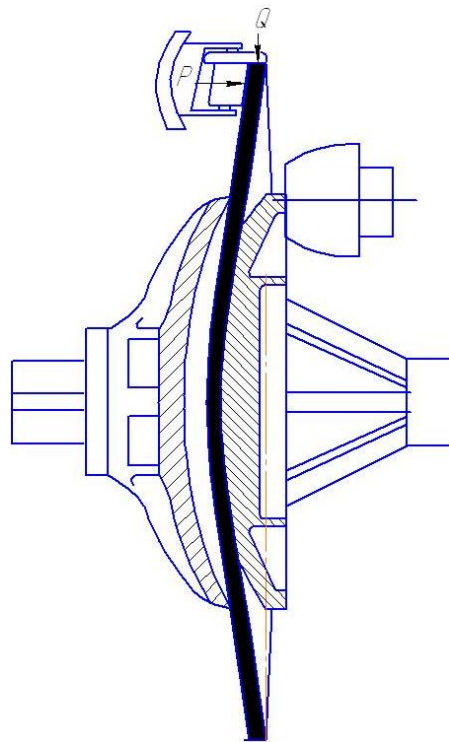
Ю.І. Зверев [26] розробив штамп для штампування сферичних днищ (рис. 1.16) методом послідовних натискань, що містить циліндричний пуансон зі сферичною торцевою робочою поверхнею і матрицю зі сферичною робочою поверхнею, що відрізняється тим, що, з метою підвищення якості діаметр робочої поверхні матриці на її дзеркалі дорівнює діаметру пуансона 5000 мм, в частині робочих поверхонь пуансона і матриці, розташовані по периферії на ширині переважно 200 - 300 мм мають радіус сфери менший, ніж радіус сфери центральної частини на 3 - 5%. Формоутворення деталі здійснюється послідовно. При цьому пуансон 2 здійснює зворотно-поступальні рухи, а заготовка (на кресленні не показана) обертається навколо похилої осі. В результаті послідовних переміщень осередку деформації від периферії до центру заготовка набуває форми поверхні кульового сегмента.

М.В. Березен удосконалив спосіб виготовлення товстостінних днищ на фланжувальній машині [27], що включає операції штампування центральної частини днища і подальшого формування, обкаткою його периферійної частини роликком, орієнтованого паралельно стінки днища що формується, що відрізняється тим, що з метою зменшення потоншення стінки в тороїдальній частині днища, заготовку одночасно з формуванням обкатують по кромці роликком, орієнтованому перпендикулярно його стінці. Схема цього пристрою показана (рис. 1.17).



1 – матриця; 2 – пуансон

Рисунок 1.16 – Штмп для штампування сферичних днищ



1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – матриця; 4 – тиск ролик;  
5 - формувальний ролик

Рисунок 1.17 – Пристрій для штампування днища

В.М. Потулов [28] розробив штамп для витяжки днищ (рис.1.18). Штампування днища та його знімання виконуються наступним чином. До моменту дотику бурта 5 кільця 4 з притискним кільцем 6, утримуваним клинковою поворотною скобою 7 через матрицю 8, встановлену під змінним кільцем 9, процес протікає, як у звичайному штампі. З метою полегшення знімання днищ з пуансона, циліндрична частина пуансона виконана у вигляді вільно надітого на пуансоні кільця з буртом, що спирається знизу на бурт, утворений донною сферичною частиною пуансона.

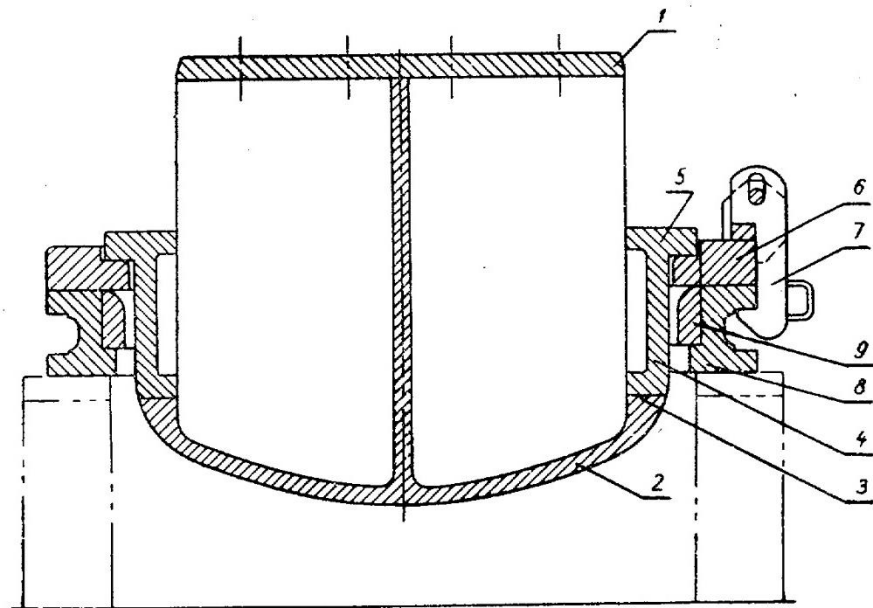


Рисунок 1.18 – Штамп для витяжки днищ

О.В. Бакієв та ін. удосконалили пуансон для гарячої витяжки днищ [29], що містить корпус з змінною куполоподібною накладкою яка охоплює його, що має чотири рівномірно розташованих по периметру вікна, вузли знімання накладки, виконані у вигляді закріплених на неробочому торці корпусу скоб, на кожній з яких змонтовано з можливістю обертання у вертикальній площині та контактування з неробочим торцем накладки важіль, а також вузли кріплення накладки (рис.1.19).

М.С. Артемов [30] розробив спосіб ротаційного видавлювання днищ та пристрій для його здійснення (рис.1.20). Спосіб ротаційного видавлювання

днищ з круглих у плані листових вихідних заготовок, що включає закріплення заготовки днища по периметру на кільцевій оправці, забезпечення їй обертального руху і її формування рухомим давильним роликком.

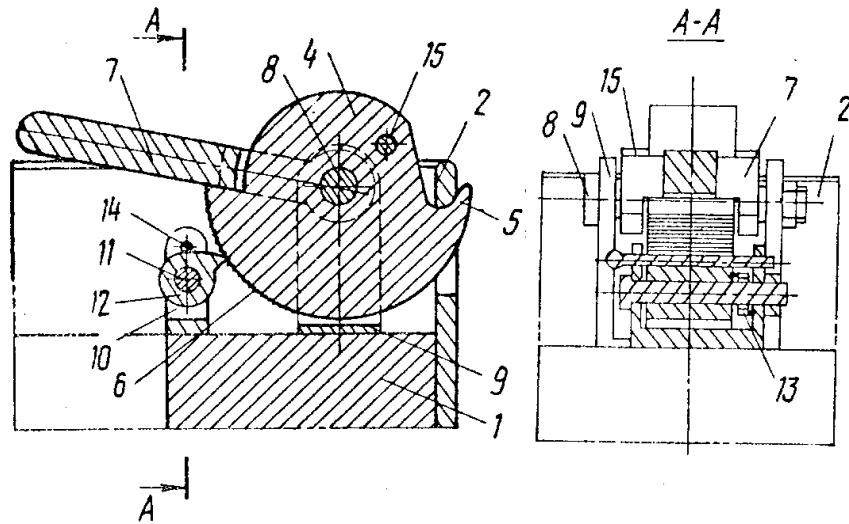


Рисунок 1.19 – Пуансон для витяжки днищ

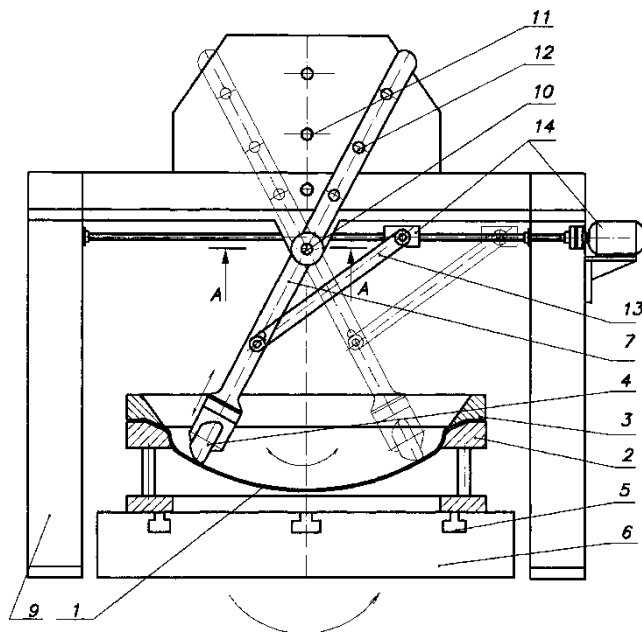


Рисунок 1.20 – Пристрій для ротаційного видавлювання днищ

### 1.3 Виробництво днищ методами радіального та ротаційного обтискання

У сучасних умовах важливим питанням для України є підвищення якості та зниження собівартості виробленої металопродукції [31–33]. Всі подібні деталі відносяться до виробів відповідального призначення і значна частина їх виробляється способами гарячого пластичного деформування [34]. Особливе місце серед цих виробів займають деталі по типу днищ. Собівартість зазначених виробів висока. Виготовлені таким способом деталі не гарантують високої надійності з'єднання металу днища та корпусу [35]. В результаті ударна в'язкість та міцність металу балона у зоні зварного шва залишаються низькими. У результаті можливий обрив днища виробу під впливом високого тиску. Тому проведення досліджень процесів виготовлення деталей типу гільз, які підвищують якість та знижують витрати на їх виробництво, є актуальними для машинобудування.

З використанням енергетичного методу авторами роботи [36] встановлено модель визначення поздовжньої деформації металу у процесі радіальної обкатки. Пропонована модель дозволяє встановлювати силу деформування в залежності від ступеня обтиску. Однак пропована модель не дозволяє встановлювати радіальний перебіг матеріалу під час деформації, що потребує вирішення завдання у тривимірній постановці.

Автор роботи [37] розробив технологію виготовлення складнопрофільованих пустотілих виробів, в якій частину заготовки нагрівають та деформують у штампі. Поєднання торцевого та радіального деформування забезпечує перебіг металу в центральних частинах заготовки. Після висадки ступінчастого профілю вісь виробу формується з використанням оправки, а це значно ускладнює процес виробництва.

Методом скінчених елементів (МСЕ) здійснили моделювання процесу радіального деформування пустотілих заготовок [38]. Аналіз отриманих

результатів дозволили встановити, що цей процес ефективний при малих осьових подачах. Осьові напруження на внутрішній поверхні пустотілої заготовки призводять до тріщиноутворення внаслідок появи розтягуючих напружень [39].

За результатами моделювання МСЕ в роботі [40] було встановлено 3D-модель процесу радіальної деформації трубних заготовок та проведено аналіз напружено-деформованого стану (НДС) заготовки. Доведено ефективність процесу всебічного деформування пустотілої заготовки. Однак деформування порожнистих заготовок даним способом ускладнює конструкцію обладнання [41].

У роботі [42] автори досліджували експериментальними методами радіальне деформування пустотілих заготовок. Цей спосіб є новим підходом до вдосконалення обладнання для забезпечення оптимальної конструкції та відмови від деформування на молотах. У роботі [43] було встановлено вплив геометрії деформуючого інструменту на НДС заготовки у процесі деформування. За результатами робіт було встановлено, що для забезпечення мінімальної неоднорідності механічних властивостей завтовшки стінки доцільно використовувати інструмент із опуклою геометрією.

Автори роботи [44] моделювали процес обтиску пустотілих заготовок. Були деформовані труби різного діаметра з різною товщиною стінки. Обтискання труб проводили чотирма інструментами, що дозволило направити течію металу в осьовому напрямку. В роботі встановлено вплив способу деформування на ефективність опрацювання при обтиску довгомірних заготовок з використанням різної геометрії інструменту [45]. Було встановлено, що в цьому випадку можна отримати рівномірні механічні властивості в поздовжньому та поперечному напрямках.

Питання якості поверхні днищ при деформуванні представлені у [46]. У роботі запропоновано два види інструментів, що забезпечують рівномірний розподіл деформацій. Було зроблено висновок, що зі збільшенням кута нахилу робочої кромки інструменту підвищується рівномірність розподілу

деформацій. Однак збільшення обтиску сприяє зменшенню шорсткості поверхні заготовки, але при цьому може статися руйнування виробу [47].

Порівняння процесів радіального деформування мідних труб між двома та трьома інструментами зроблено у роботах [48, 49]. Було встановлено, що зусилля деформування двома інструментами більше ніж трьома. НДС металу у виготовлених порожнистих виробах при використанні трьох інструментів розподіляється рівномірніше. Однак ці методи радіального обтиску тонкостінних заготовок не можуть бути використані при виготовленні виробів із сталі [50].

Радіальним обтиском пустотілих заготовок займалися О. Pantalé із співавторами [51]. За результатами досліджень порівнювалася геометрія виробів, зусилля деформування та розподіл НДС заготовки. Встановлено, що при деформуванні без оправки зі зменшенням зовнішнього діаметра труби на 15% потовщення стінки відбувається на 10%. У роботі [52] експериментально встановлено НДС при обкатуванні порожнистих заготовок. Для досліджень використав метод сіток. Порівнювалися процеси розкочування інструментом із плоскою та увігнутою геометрією. Встановлено, що використання плоского інструменту, що деформує, призводить до підвищення рівномірності розподілу деформацій.

У роботі [53] було встановлено, що деформування пустотілої заготовки сприяє інтенсивному закриттю отвору та мінімального подовження пустотілої заготовки. Однак у дослідженні не встановлено форму деформуючого інструменту, що сприяє інтенсифікації подовження заготовки. На основі досліджень процесів обтиску на радіально-кувальних машинах було встановлено, що процес сприяє підвищенню механічних властивостей металу [54]. Встановлено вплив ступеня деформування на силові параметри стискання. Наголошено, що подальші дослідження слід спрямувати на встановлення впливу схеми НДС на утворення внутрішньої структури металу, що впливає на неоднорідність механічних властивостей.

Оцінки критеріїв руйнування при обтиску пустотілих заготовок представлені у роботі [55]. Вони досліджували процес обтиску різним інструментом, що деформує. В результаті було встановлено закономірності зміни тиску деформування залежно від тертя. Автори [56] досліджували процес радіального обтиску труб. Автори встановили такі результати, що деформації в порожнистій заготовці однорідніші, ніж у суцільній. Механічні властивості матеріалу вздовж осі труби були однакові. Найбільші напруження та деформації з'являються вздовж осі заготовки, що призводить до збільшення механічних властивостей заготовки. Схожі результати були встановлені при виготовленні днищ та горловин із листових заготовок обкатуванням роликком [57]. У роботі досліджувався вплив частоти обертання заготовок на продуктивність обкатки. На основі дослідження було встановлено алгоритми роботи та траєкторію руху маніпулятора для обкатки. Цей спосіб придатний для виготовлення горловин з отвором.

У роботі [58] було встановлено параметризовану траєкторію руху інструменту для обкатки на основі квадратичної кривої Безье. Внаслідок досліджень вдалося визначити зусилля обкатки. Однак дослідниками не враховано розігрів заготовки при обкатуванні, що значною мірою впливає на зусилля деформування.

Автори [59] враховували температуру деформування для дослідження процесу обкатки трубних заготовок і проаналізували появу основних видів дефектів. Але результати роботи спрямовані лише виготовлення плоских днищ. Значна кількість виробів, що мають днища, раціонально одержувати тангенційною обкаткою інструментом тертя [60]. Аналіз стану проблеми дозволив виділити групу питань, дослідженню яких присвячено цю роботу. Їхнє рішення в ході виконання роботи сприятиме визначенню технічних можливостей процесу гарячої тангенційної обкатки труб, підвищенню техніко-економічних показників продукції, що випускається. Застосування способу обробки вимагає проведення аналізу процесів формозміни та взаємодії заготовки з робочою поверхнею інструменту, а відповідно, та визначення меж його

використання. Більше того, це питання стосується окремих випадків виробництва виробів з дном, які потребують підвищених експлуатаційних характеристик, що потребують спеціальних термомеханічних режимів деформації. Для розробки раціональних технологічних процесів тангенціальної обкатки інструментом тертя вимагають встановлення кількісних оцінок формоутворення, отримання достовірних даних щодо впливу умов тангенціальної обкатки, параметрів інструменту, а також умов протікання процесу на геометрію виробів. Вирішення цього завдання вимагає розробки скінчено-елементних моделей для проектування технології та визначення основних характеристик обладнання з точки зору підвищення точності та стабільності одержуваних геометричних характеристик виробів.

#### **1.4 Дослідження процесів кування крупних поковок**

Розробка нового техпроцесу потребує визначення сили деформування, що чинить вплив на вибір ковальського обладнання. Величина сили залежить від термошвидкісних умов деформування та інших факторів. Цей вплив у процесі кування докладно розглянуті на роботах Соколова Л.М. та інших авторів [61]. Розглянуті в цих роботах результати дозволяють з високою достовірністю встановити силу деформування з урахуванням процесів зміцнення та знеміцнення, що проходять у процесі гарячого деформування. Ними доведено, що при сталій температурі та швидкості деформування співвідношення опору деформуванню до межі текучості є константа.

З розвитком комп'ютерної техніки широкого використання набули числові методи моделювання. Першим з чисельних методів для вирішення вирішенні задач пластичного деформування був метод кінцевих різниць (МКР) [62]. Приклади використання цього методу наведено у роботах [63, 64]. Як

альтернатива експериментальним методам досліджень є застосування комп'ютерного моделювання процесів пластичного деформування з використанням методу скінчених елементів (МСЕ) [65-70]. МСЕ на сьогодні є найрозповсюдженим методом рішення технологічних задач. Багато наукових робіт присвячені використанню методу в різних технологічних додатках, зокрема при дослідженні процесів кування та штампування. Скінчено-елементна модель максимально наближена до фізичного процесу і дозволяє встановити точне змінення напружено-деформованого стану (НДС) по ходу процесу і врахувати всі особливості фізики процесу.

МСЕ дозволяє розв'язувати не тільки плоскі, а й об'ємні задачі пластичності з урахуванням нелінійності механічних властивостей заготовки, нерівномірного тепло-напружено-деформованого стану та ін. МСЕ визначає не тільки формозмінення заготовки під час деформації, а також появу дефектів форми та порушення суцільності заготовки. Результати, встановлені МСЕ, мають достатньо високу точність [65] та збігаються з експериментальними даними [66, 67]. МСЕ зарекомендував себе для дослідження тепло-напружено-деформованого стану при пластичній деформації тільки в останні роки [68, 69]. На базі МСЕ та інтегрованих програм моделювання та обробки результатів про зміни структури, які відбуваються у процесі кування. Дозволяють проводити оптимізацію процесів кування та штампування. Відомо багато прикладів використання сучасних програм, заснованих на МСЕ [70-83]. Китайськими дослідниками на базі МСЕ вивчався механізм заварювання осьових дефектів злитка при їх осадженні [84]. Встановлено, що максимальне закриття осьових дефектів відбувається при осадженні циліндричних заготовок зі співвідношенням  $H/D=1,0$ . Розвиток програмних продуктів досяг того рівня, що МСЕ дає можливість прогнозувати мікроструктури металу і встановлювати розміри зерен [85]. Останнім часом для встановлення формозмінення в процесах пластичного деформування набув широкого розповсюдження МСЕ [86–90]. Метод дозволяє встановлювати кінцеву форму а також утворення утворення дефектів форми (утяжини, незаповнення кутів та ін.) і руйнування матеріалу [91-93].

Результати, отримані МСЕ, мають високу точність [94], тому для дослідження ТНДС заготовок в процесах кування переважно застосування МСЕ.

Основний вплив на мікроструктуру має термічна обробка, при цьому і пластична деформація чинить значний вплив на подрібнення зерен, що підтверджується різними дослідженнями [95–102]. Через пластичну деформацію у конкретному випадку можна суттєво впливати на форму і розмір зерна, на подрібнення карбідних сіток та інших включень у мікроструктурі металу та появу або закриття пустот у металі заготовки. При кування крупногабаритних поковок зі злитків, технологічний процес слід проводити таким чином, щоб тепло-деформаційний режим сприяли отриманню високої якості готового виробу, тобто гарантування формування потрібної структури металу. Через це великий попит виникає на моделювання змінення мікроструктури металу. Для опису змінення мікроструктури металу при гарячій пластичній деформації використовується ряд закономірностей: перші описують зміну мікроструктури при статичній рекристалізації, другі – динамічної рекристалізації, треті - залежності для опису змігнення розмірів зерна без рекристалізації. Для високолегованих сплавів на основі нікелю на базі проведених експериментальних досліджень, взятих із робіт [103–111] та обробки літературних даних у роботі [112] визначено константи матеріалів та встановлено залежності, які дозволяють встановлювати зміну розміру зерен. У роботі [113] китайських вчених Fei Chen, Zhenshan та ін, представлені результати експериментальних та теоретичних досліджень зміни мікроструктури сталі 30Cr2Ni4MoV у процесі гарячого кування та подальшої витримки при високій температурі. Встановлено, що режим деформування чинить основний вплив на мікроструктуру металу заготовки. Крім цього, значний вплив відбувається і на механічні характеристики металу під час гарячої пластичної деформації. У роботі запропоновано для моделювання структури сталі 30Cr2Ni4MoV нову математичну модель. У роботі була проведена експериментальна перевірка розробленої моделі, яка підтвердила збігання розмірів зерен з дослідженнями на натурному зразку, який був продеформований при високій температурі. Інші моделі для прогнозування

змінення мікроструктури сталей в процесах гарячого пластичного деформування представлені в роботах [114-118].

У процесі аналізу попереднього досвіду з виготовлення великогабаритних деталей відповідального призначення, були виявлені переваги та недоліки деяких способів на підставі яких був розроблений спосіб виготовлення деталей типу «Днищ». В один із способів виробляють витяжку з плоскої заготовки, недоліком даного варіанту є необхідність великих зусиль штампування і великі габарити обладнання. В іншому використовують штампування по ділянках. Даний спосіб дозволяє використовувати менш потужне обладнання, однак для подачі заготовки прес повинен бути оснащений спеціальним маніпулятором. Е.Л.Мельников виробляє витяжку з притиском. Цей спосіб дозволяє збільшити продуктивність, знизити зусилля штампування. Проте, необхідність притискання заготовки обмежує застосування т.к. на гідравлічному пресі складно організувати притиск. Ця технологія не підходить для цього виду днищ. Н.С. Артемів виготовляють штампування з обкаткою на флунжерній машині. Дана технологія вимагає наявності спеціальної флунжерної машини, купівля якої недоцільно даного типу виробництва.

За основу було взято технологію О.Є. Маркова [4], яка включає роздачу конусним і сферичним бойком. Використовуючи цю технологію отримують деталі високої якості, проте для її здійснення необхідна велика кількість переходів, а отже й оснащення. У цьому роботі зменшено кількість оснащення рахунок використання спеціального зливка.

## Висновки за розділом 1

1. На сьогодні в Світі спостерігається зростання виробництва крупногабаритних деталей відповідального машинобудування. Крупнотонажні поковки та деталі робляться у різних країнах Світу. Це зростання виробництва крупногабаритних поковок, зокрема в атомній енергетиці, свідчить про актуальність розвитку енергетичного машинобудування. На сьогодні основний упор роблять на збільшення ваги ковальських злитків, зниження витрат металу, а також покращення якості деталей відповідального призначення і заготовок для них.

2. Традиційні техпроцеси кування крупних днищ не завжди відповідають вимогам по УЗД, механічним властивостям і макроструктурі. Деякі ковальські операції малоефективні та приводять до підвищення матеріальних та трудових витрат на кування. Це підвищує собівартість і знижує конкурентоспроможність продукції. Тому слід оптимізувати кількість та вид ковальських операцій, які використовуються для кування днищ. Раціональним є використання спеціальних способів кування днищ, які б дозволяли спростити технологію.

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР НАПРЯМКИ, МЕТОДІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ КОВКИ ВЕЛИКИХ ДНИЩ

#### 2.1. Вибір напрямку наукових досліджень у галузі виробництва великих днищ куванням

Технологічні процеси кування великих поковок для дослідників представляє складне фізико-математичне завдання. Це зумовлено складністю фізичних процесів, що протікають, при гарячій деформації металу. Розміри великих поковок ускладнює проведення досліджень нових технологічних процесів кування на натурних зразках. Тому ефективним буде вдосконалення технологічних процесів кування проводити на базі аналізу результатів моделювання.

Теоретичне дослідження технологічних процесів кування повинно проводитись на основі застосування сучасних математичних (чисельних) методів. Достовірність отриманих результатів необхідно перевірити експериментальним моделюванням на свинцевих (при кімнатних температурах) та сталевих (при температурах гарячої деформації) зразках.

Теоретичне дослідження процесів роздачі сферичною плитою заготовки здійснювалося з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). Метод широко використовується для вирішення задач механіки твердого тіла, що деформується, теплообміну та ін. з високим ступенем достовірності отриманих результатів. Суть методу полягає у дискретизації тіла заготовки на окремі елементи, з'єднані у вузлових точках. До кожного елемента вирішується повна система матричних рівнянь механіки суцільних середовищ, опосередкована нелінійним функціоналом, котрого однією з методів оптимізації (лінійне програмування та метод штрафних функцій) знаходяться рішення, які призводять нев'язку до нуля.

Метод дозволяє отримувати всі характеристики напружено-деформованого стану, межі пружної та пластичної областей, переміщення і т. д., МСЕ задовільно працює при вирішенні задач пластичного формозміни вісесиметричних заготовок та плоских задач. Моделювання здійснювалося за допомогою програмного комплексу «QForm 2D».

## **2.2. Методика теоретичного дослідження методом скінчених елементів процесу кування сферичного «Днища»**

Існуючі технології виробництва деталей типу «Днищ» є недосконалими та маловивченими. Досліджуватися буде процес формування сферичного днища через дві основні формоутворюючі операції: роздача конусною плитою циліндричної заготовки та подальша роздача її сферичною плитою. Складністю в даному процесі, який полягає у роздачі пустотілої заготовки з дном, є визначення геометрії заготовки до роздачі сферичною плитою, а також складність прогнозування формозміни у процесі роздачі сферичною плитою. Тому необхідно визначити, як впливають геометричні параметри вихідної заготовки на формозміну у процесі роздачі.

Як матеріал заготовки була обрана сталь 21NiCrMo (DIN EN 10263-4(2002)), температурний інтервал кування 800...1200°C, щільність сталі 7530 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт Пуассона 0,3, модуль Юнга  $2 \cdot 10^5$  МПа. Швидкість руху інструменту  $v = 40$  мм/с, коефіцієнт тертя  $\mu = 0,4$ , діаметр сферичної плити  $D_{сф} = 4410$  мм. Крива опору деформації для цієї сталі представлені на рисунку 2.1 (дані взяті з програми QForm).

Схема роздачі представлена на рисунку 2.2. У дослідженні використовувалися конусні порожнисті заготовки з дном, тобто досліджувалась остаточна формоутворююча операція роздачі сферичною плитою. Такій підхід полягав у пошуку оптимальної форми та розмірів конусної заготовки, яка після роздачі буде гарантувати отримання заданих розмірів поковки днища.

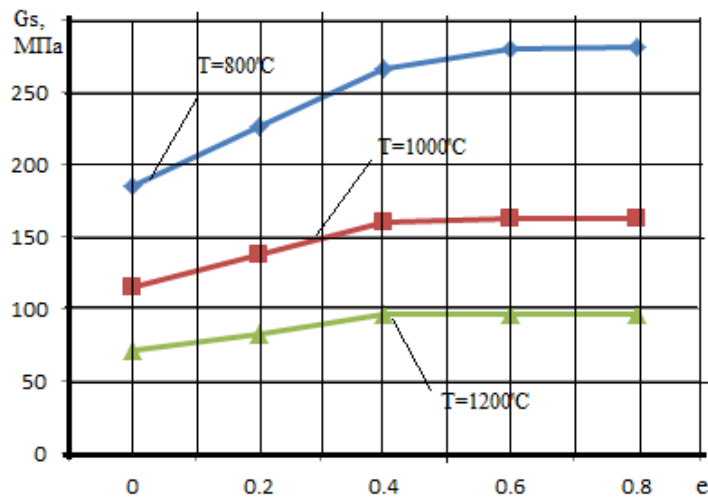


Рисунок 2.1 – Залежність опору деформації сталі 21NiCrMo від ступеня деформації за різних температур для швидкості деформації  $\epsilon=10\text{c}^{-1}$

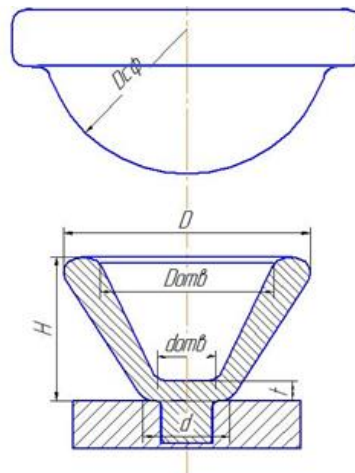


Рисунок 2.2 – Схема роздачі конусної заготовки сферичною плитою

Так як пустотіла конусна заготовка має складну форму, то були виділені основні розміри такої заготовки, як фактори варіювання. Для універсальності отриманих результатів всі розміри, які досліджувалися, були у відносному вигляді (приведені до поковочного діаметра сфери).

В результаті, досліджувався вплив п'яти факторів, які змінювалися на трьох рівнях. Більший відносний зовнішній діаметр  $D/D_{\text{сф}}$  варіювався в діапазоні 0,85; 0,9; 0,95; більший відносний внутрішній діаметр конусного отвору варіювався  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}=0,5; 0,6; 0,7$ ; менший відносний внутрішній діаметр варіювався  $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}=0; 0,1; 0,2$ ; менший відносний зовнішній діаметр  $d/D_{\text{сф}}=0,25$ ;

0,275; 0,3; відносна висота заготовки варіювалися в інтервалі  $H/D_{\text{сф}} = 0,4; 0,55; 0,7$ .

Роздача робилася на плоскій плиті з отвором під цапфу. Кінцева відстань між інструментами відповідає товщині днища ( $t = 300\text{мм}$ ).

Метою дослідження є визначення оптимальної геометрії заготовки, яка задовольнятиме вимоги одержуваних поковок заданих розмірів. Результатом моделювання були: розподіл деформацій, різнотовщинність отримуваної поковки, силові параметри процесу деформування.

### 2.3. Планування математичного експерименту

В результаті дослідження мають бути розроблені рекомендації для проектування нового технологічного процесу кування сферичних днищ. Процес кування днищ характеризується тривимірним плином металу при роздачі. Роздача заготовки сферичним бойком супроводжується зменшенням товщини стінки заготовки у верхній частині, збільшенням внутрішнього та зовнішнього діаметра заготовки та зміною висоти. На формозміну пустотілої конусної заготовки в процесі роздачі впливають форма вихідної заготовки та інструменту, ступінь деформації, температура, коефіцієнт тертя та ін.

Розрахунок процесу роздачі конусної пустотілої заготовки є складною дослідницькою задачею. Це викликано впливом великої кількості факторів на цей процес. Задля реалізації процесу моделювання необхідно вибрати чинники, які впливають на процес. Попередні розрахунки показали, що властивості матеріалу на процес роздачі вплив на формозмінення не чинить. Швидкість деформування, коефіцієнт тертя постійні та у процесі моделювання не змінюються. Таким чином, виділено п'ять основних факторів, що впливають на процес роздачі днищ (табл. 2.1). Як параметр оптимізації слід вибрати відносну різнотовщинність  $\frac{\Delta S_B}{t} = \frac{S_B - t}{t}$ , тому що цей показник буде результируючим,

де  $S_B$  - товщина стінки у верхній частині поковки днища,  $t$  – товщина стінки в нижній частині днища.

Таблиця 2.1 - Основні фактори та рівні їх варіювання

Фактори та інтервали їх варіювання	$D_{ome}/D_{cф}$	$d_{ome}/D_{cф}$	$H/D_{cф}$	$D/D_{cф}$	$d/D_{cф}$
Кодове позначення	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Інтервал варіювання $\Delta X_i$	0,1	0,1	0,15	0,05	0,025
Нижній рівень $X_i = -1$	0,5	0	0,4	0,85	0,25
Середній рівень $X_i = 0$	0,6	0,1	0,55	0,9	0,275
Верхній рівень $X_i = +1$	0,7	0,2	0,7	0,95	0,3

Вплив вибраних чинників на параметр оптимізації має нелінійний характер, у результаті планування експерименту необхідно отримати квадратичну модель. Застосування моделі повнофакторного експерименту призведе до невиправдано підвищеного числа експериментів. У цьому випадку раціональніше застосовувати дробову модель.

Для нелінійної моделі з п'ятьма факторами доцільно застосування плану Хартлі, оскільки цей план більш простий, ніж ортогональний та рототабельний центральний композиційний план і рекомендується при побудові інтерполяційних моделей квадратного полінома для об'єктів з малим рівнем шумів. Для цієї моделі рівняння регресії має такий вигляд (2.1).

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 \\
 & + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 \\
 & + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 \quad , (2.1)
 \end{aligned}$$

де  $y$  – значення відгуку функції (параметр оптимізації);

$b_{ij}$  - коефіцієнти рівня регресії;

$x_i$  – фактори що варіюються.

Для реалізації плану Хартлі необхідно провести 27 математичних експериментів (таблиці 2.2). Розширена матриця планування експерименту у закодованому вигляді представлена у Додатку А.

Таблиця 2.2 – Матриця планування дослідження у натуральних позначеннях (план Хартлі)

N	Код					$S_B - t$ , мм	$\Delta S_B/t$	$S_B / D_{сф}$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
	$D_{ome} / D_{сф}$	$d_{ome} / D_{сф}$	$H / D_{сф}$	$D / D_{сф}$	$d / D_{сф}$			
1	0,7	0,2	0,7	0,95	0,3	177	0,59	0,108
2	0,5	0	0,7	0,95	0,3	330	1,1	0,143
3	0,5	0,2	0,4	0,85	0,25	215	0,716	0,1168
4	0,7	0	0,4	0,85	0,25	-70	-0,23	0,052
5	0,5	0,2	0,4	0,95	0,3	370	1,23	0,152
6	0,7	0	0,4	0,95	0,3	95	0,32	0,089
7	0,7	0,2	0,7	0,85	0,25	-75	-0,25	0,051
8	0,5	0	0,7	0,85	0,25	270	0,9	0,107
9	0,5	0,2	0,7	0,95	0,25	248	0,83	0,102
10	0,7	0	0,7	0,95	0,25	-46	-0,153	0,057
11	0,7	0,2	0,4	0,85	0,3	-22	-0,073	0,063
12	0,5	0	0,4	0,85	0,3	338	1,13	0,145
13	0,5	0,2	0,7	0,85	0,3	206	0,69	0,092
14	0,7	0	0,7	0,85	0,3	-108	-0,36	0,044
15	0,7	0,2	0,4	0,95	0,25	103	0,34	0,091
16	0,5	0	0,4	0,95	0,25	380	1,27	0,154
17	0,6	0,1	0,55	0,9	0,275	210	1,02	0,116
18	0,7	0,1	0,55	0,9	0,275	-30	-0,1	0,061
19	0,5	0,1	0,55	0,9	0,275	320	1,08	0,141
20	0,6	0,2	0,55	0,9	0,275	165	0,49	0,119
21	0,6	0	0,55	0,9	0,275	223	0,74	0,105
22	0,6	0,1	0,7	0,9	0,275	190	0,63	0,111
23	0,6	0,1	0,4	0,9	0,275	198	0,66	0,113
24	0,6	0,1	0,55	0,95	0,275	177	0,59	0,108
25	0,6	0,1	0,55	0,85	0,275	139	0,46	0,122
26	0,6	0,1	0,55	0,9	0,3	126	0,42	0,097
27	0,6	0,1	0,55	0,9	0,25	158	0,53	0,104

Програма для розрахунку рівняння регресії та побудови графіків з розробленого планування експерименту представлені у додатку Б.

## 2.4. Методика проведення експериментальних досліджень

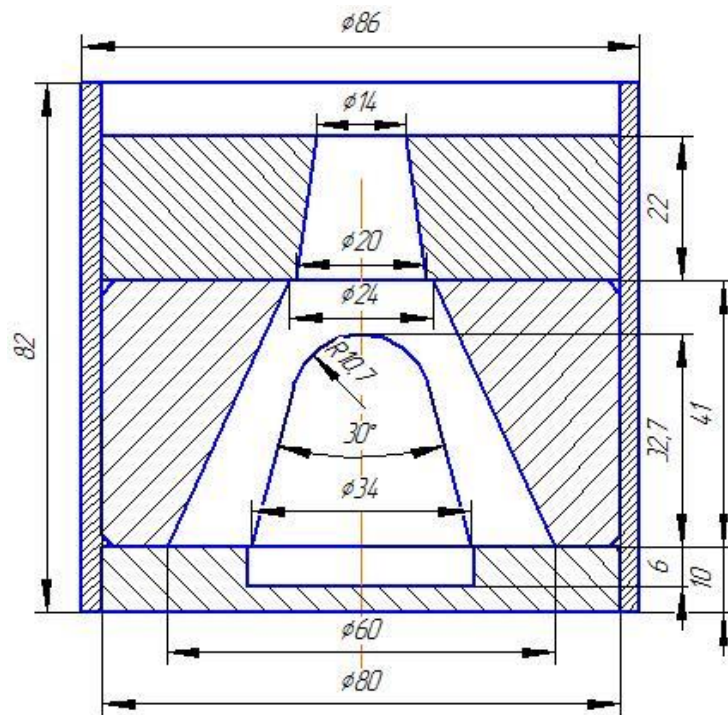
Для верифікації результатів формозміни при роздачі отриманих із застосуванням теоретичного дослідження необхідно провести експериментальне дослідження. Проведення експерименту на натурних зразках економічно не доцільно, тому в якості заготовки (моделі) використовуються зменшені зразки, які мають властивості подібних натуральних зразків. Лабораторні дослідження, проведені з використанням законів геометричної та фізичної подоби, дозволяють найповніше досліджувати процеси обробки металів тиском. Метою даного дослідження є експериментальне вивчення формозміни та силових параметрів при роздачі глухоніжної пустотілої заготовки конусної та сферичної плити.

Для дослідження процесу роздачі використовувалися заготовки з матеріалу - свинець (С1), реологічні властивості якого при кімнатній температурі аналогічні властивостям сталі 21NiCrMo при кувальної температурі. Зразки для моделювання виготовлялися литтям у спеціальну виливницю для отримання порожнистого зливка, що складається з контейнера, стрижня та двох втулок. Ескіз виливниці представлений рисунку 2.3.

Для проведення експерименту використовувалися 2 типи заготовок, які відрізнялися наявністю циліндричного пояса та різними значеннями  $D_0$  і  $d_{0\text{отв}}$ . Розміри одержуваних заготовок представлені у таблиці 2.3. Форма одержуваних заготовок представлена рисунку 2.4.

Таблиця 2.3 – Розміри заготовок для роздачі

	$D_0$ , мм	$D_{0\text{отв}}$ , мм	$d_0$ , мм	$d_{0\text{отв}}$ , мм	$H_0$ , мм	$h_0$ , мм	$h_{\text{п}}$ , мм
1	58	33	24	22	41,5	32,7	0
2	50	33	31,5	22	42	34,5	6

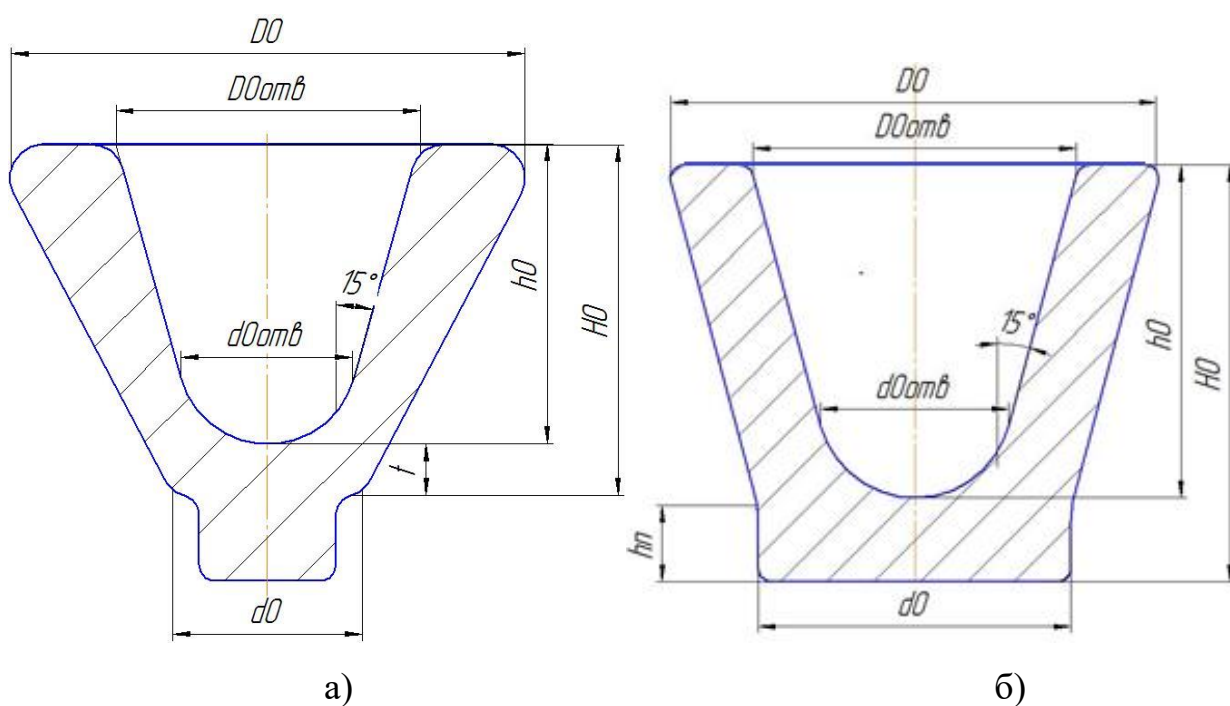


a)



б)

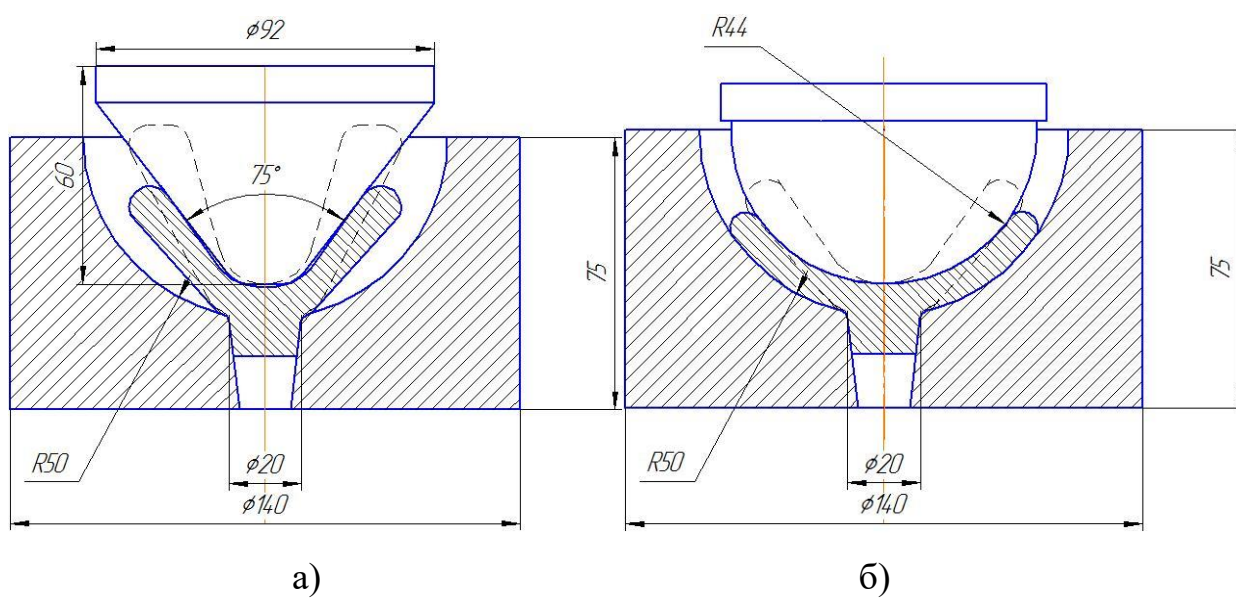
Рисунок 2.3 – Ескіз виливниці (а), фото виливниці (б)



в)

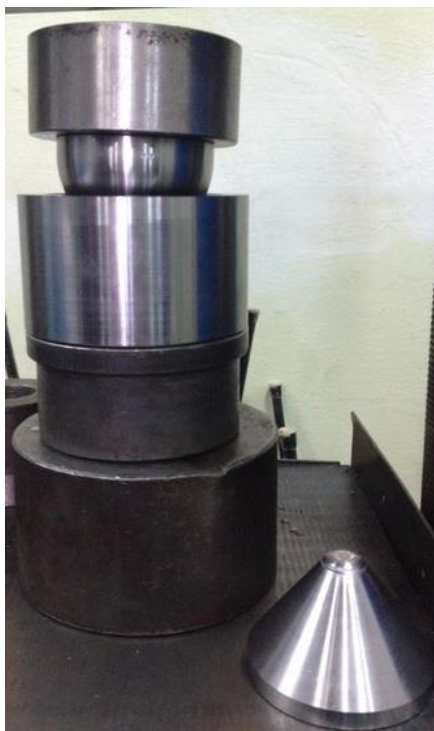
Рисунок 2.4 – Загальний ескіз заготовки (а) – тип 1, (б) – тип 2, отримані зливки (в)

Роздача проводилася на сферичній плиті конусною та сферичною плитами (рис. 2.5). Плити для роздачі виготовлені зі сталі 30, за розмірами подібними до натурних (коефіцієнт подібності 1:50). Оснащення встановлювалося на гідравлічний прес МС-500, зусиллям 500 кН, швидкість деформування 1 мм/с. Схема проведення експерименту та фото експериментальної установки представлені на рисунку 2.6.



в)

Рисунок 2.5 – Схема роздачі конусної (а) та сферичної (б) плитами, фото інструменту (в)



а)



б)

Рисунок 2.6 – Оснащення для роздачі у зборі (а) та експериментальна установка (б)

В результаті моделювання повинні бути отримані значення зусилля на кожній стадії роздачі та геометричні розміри заготовки після деформування конусної та сферичної плити.

## **Висновки за розділом 2**

1. Інтенсивний розвиток комп'ютерної техніки потребує удосконалення відомих методик дослідження формозмінення і тепло-напружено-деформованого стану. У зв'язку з цим слід використовувати спеціалізовані програмні продукти на базі потужних методів моделювання.

2. Визначено, що відомі методи кування днищ потребують значної механічної обробки або використання декількох деталей і з використанням операції зварювання отримується цільний виріб. Це призводить до зниження якості крупних днищ. Пропонується виготовляти цільноковане днище за рахунок використання конусної та сферичної плити зі сегментними вирізами.

3. Для теоретичного дослідження буде використаний метод скінченних елементів (МСЕ), який може точно моделювати тривимірні процеси деформування та встановити значну кількість інформації про процес секційного штампування днища, що дозволить дослідити основні параметри заготовки, а саме їх тепло-напружено-деформований стан (ТНДС).

4. Розроблено методику теоретичного дослідження процесу роздачі днища, яка полягає у застосуванні МСЕ на основі програмного продукту QForm 2D. Методика дозволяє встановити ТНДС, силові параметри, формозміну у процесі роздачі пустотілої конусної заготовки сферичною плитою. Розроблена методика дозволяє скоротити обсяг експериментальних досліджень у 3-5 разів.

5. Параметром оптимізації була обрана відносна різнотовщинність заготовки  $\Delta s/t$ , яка оцінює можливість отримання поковки необхідної форми з мінімальними припусками.

6. Для перевірки результатів теоретичного дослідження розроблено методику експериментального дослідження із застосуванням свинцевих моделей. Ця методика призначена для верифікації отриманих теоретичних результатів. На базі цього буде розроблено новий технологічний процес штампування крупногабаритних днищ.

## РОЗДІЛ 3

### ВПЛИВ ПРОЦЕСУ РОЗДАЧІ ЗАГОТОВКИ НА ФОРМОЗМІНУ І ДЕ- ФОРМОВАНІЙ СТАН ДНИЩА

#### 3.1 Перевірка базової технології штампування крупногабаритних днищ в умовах ПрАТ «Енергомашспецсталь»

На першому етапі слід виконати перевірку базового технологічного процесу штампування крупногабаритних днищ, що реалізується в умовах ПАТ «Енергомашспецсталь». Задля цього було виконано моделювання за допомогою програмного комплексу QForm поведінка заготовки та можливість виконання секційної штампування заготовки днища ПГВ-1000М:

- для випадку неправильного укладання заготовки у матрицю (збій у позиціонуванні заготовки) тобто варіант коли вісь заготовки не збігається з віссю обертання матриці;

- для перевірки фактичної заготовки ф. №15-14010 для кування-штампування.

Матеріал і методика дослідження:

- 1.1 Ескіз початкової заготовки
- 1.2 3D моделі пуансонів та матриці
- 1.3 Марка сталі: 10ГН2МФА
- 1.4 Температурний інтервал кування: 1250-850°C
- 1.5 Змащення: графіт + олія
- 1.6 Час передачі з печі під прес: 10-20 хв.
- 1.7 Час між натисканнями преса: 5-10 с
- 1.8 Розрахункова сітка: за об'ємом заготовки 60-90 мм
- 1.9 Прес максимальним зусилля 150 МН, привід – індивідуальний.

**Результати моделювання.** На першому етапі будемо досліджувати перекош заготовки під час укладання в матрицю. У разі збою при укладанні заготовки в матрицю необхідно її позиціонувати за допомогою поворотного столу преса на якому встановлена матриця розгорнувши заготовку так, щоб максимально піднесена точка А (рис. 3.1) збіглася з поздовжньою віссю бойка з точністю  $\pm 10$  (рис. 3.2).

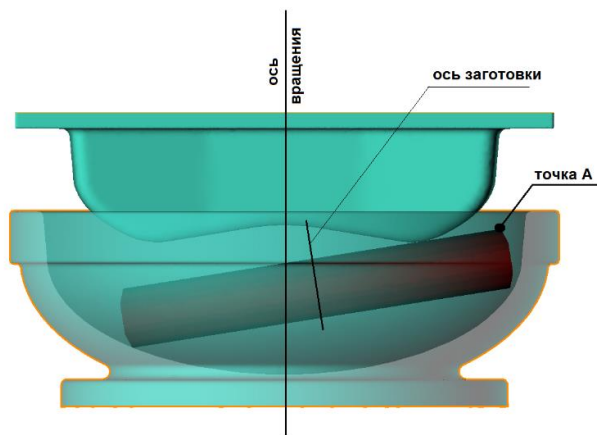


Рисунок 3.1 - Ескіз перекосу заготовки у матриці

На рисунку 3.3 покроково зображено процес центрування заготовки бойком у матриці при виконанні першого одиничного тиску пресом. При досягненні зусилля 4МН відбувається задане позиціонування заготовки в матриці.

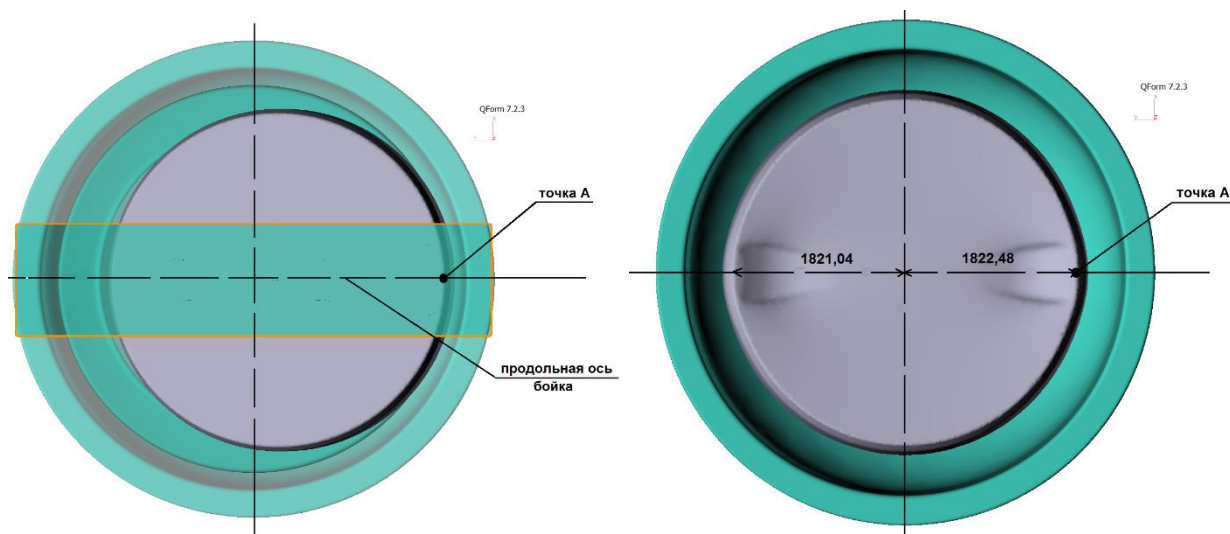


Рисунок 3.2 - Додаткові види для опису процесу усунення перекосу

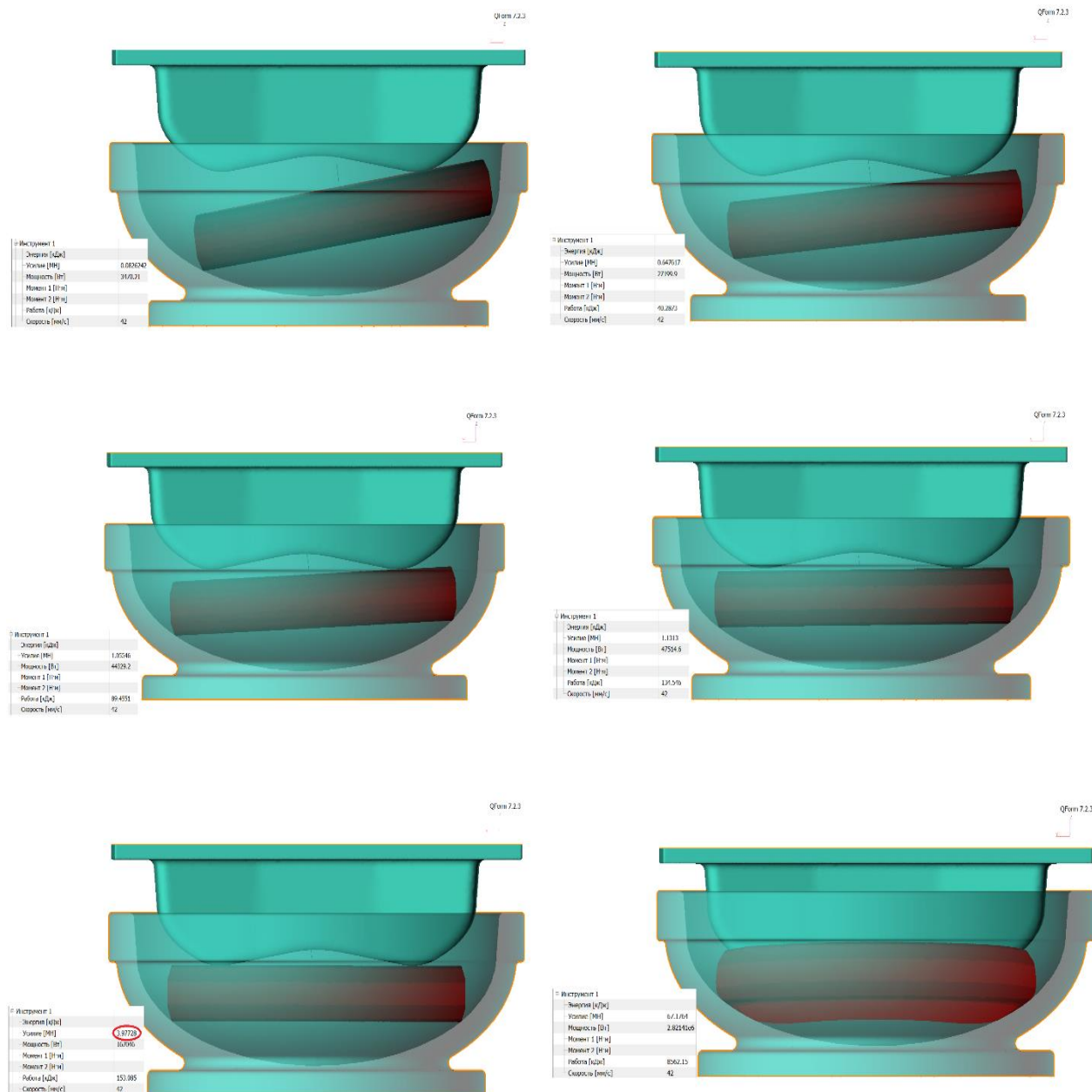


Рисунок 3.3 - Покроковый процесс центрования заготовки в сферичній матриці

Більш трудомістким процесом позиціонування заготовки в матриці є варіант опускання бойка до відстані 550 мм між бойком і матрицею (рис. 3.4) за одиничний натиск, при цьому після кожного натиску здійснювати поворот матриці на 30°, 45° або 90°.

Відстань 550 мм актуальна, якщо заготовка має розміри  $\text{Ø}3800 \times 580 \text{ мм}$ .

Особливо важливий контроль змащування матриці перед укладанням заготовки.

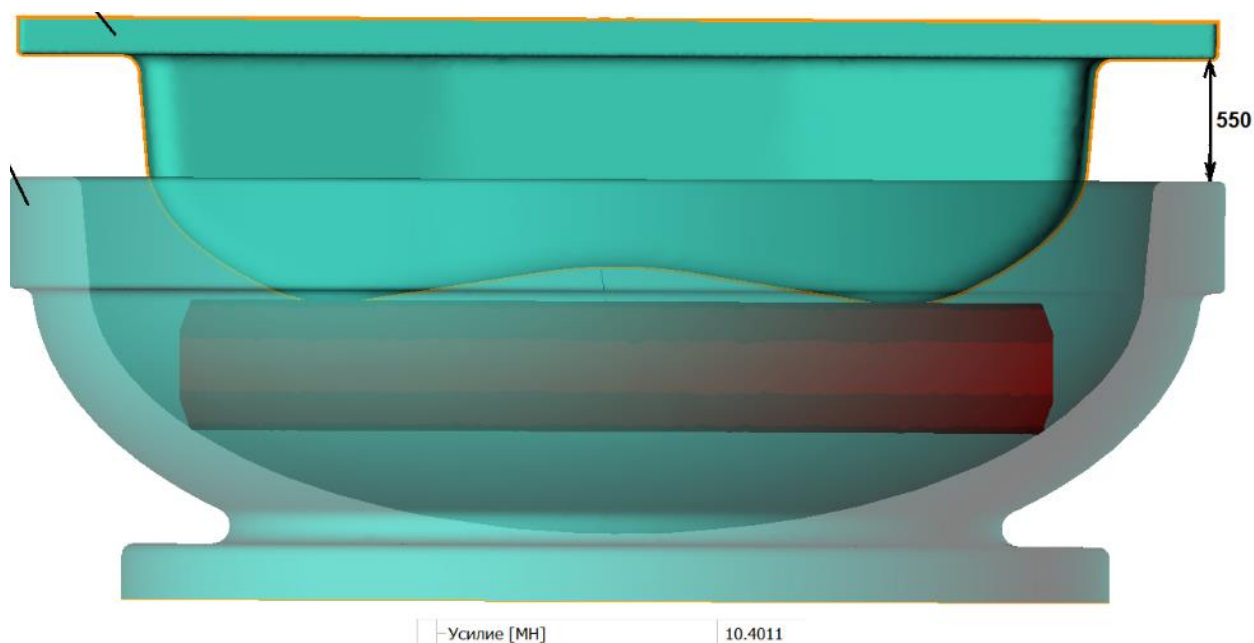


Рисунок 3.4 - Другий варіант позиціонування заготовки бойком у матриці

Рекомендації щодо усунення прекоосу заготовки при укладанні в матрицю – правильно позиціонувати заготовку можливо двома способами:

- за допомогою повороту столу преса таким чином, щоб максимально висока точка щодо центру матриці (точка А) збіглася з поздовжньою віссю заготовки;
- здійснити кілька контрольних поворотів столом на 30°, 45° або 90° з зусиллям, яке не перевищує 10 МН при кожному одиничному натисканні бойком.

**Перевірка фактичної заготовки ф. №15-14010 для штампування.**  
Відповідно до технологічної карти № 3-1319 було виготовлено заготовку ф. № 15-14010 для штампування днища парогенератора.

Таблиця 3.1 - Технологічні параметри процесу штампування

Ви-нос	Бойок	Коло, шт.	Кількість натисків, шт.	Відстань між бойками, мм	Хід бойка, мм	Зусилля, МН
1(0)	Для роздачі	0	0	512(508)	0	1,2(8,9)
1		1	13	280	232(228)	60
		2	13	150	130	110
2(0)		0	0	160(150)	0	0(30)
2		1	13	35	125(115)	145
3(0)	Каліброчний	0	0	326(315)	0	1,3(4,8)
3		1	13	200	126(115)	50(80)*
		2	13	110	90	60(130)*
4(0)		0	0	140(130)	0	1,7(3,7)
4		1	13	30	110(100)	150**

\* У дужках вказано максимальне значення, яке відрізняється від середнього значення по даному колу, в більшості випадків це перший натиск у колі.

\*\* таке значення обумовлено тим, що в процесі моделювання було закладено відхилення між осями інструменту (матриці та бойка)

1(0), 2(0), 3(0), 4(0) - встановлює початкове положення верхнього бойка (точка відліку).

У графі "Відстань між бойками, мм" та графі "Зусилля, МН" у рядках 1(0), 2(0), 3(0), 4(0) стоять значення, які можуть відповідати початку відліку для руху бойка вниз.

Після механічної обробки під попереднє УЗК і штампування заготовка має вагу 48,35 т. Відповідно до звіту про огляд отриманої заготовки та при обліку угара у розмірі 2% від маси заготовки для моделювання прийнято заготовку вагою орієнтовно 47,4 т (ескіз див. рис. 3.5).

Таблиця 3.2 - Поетапне формоутворення заготовки

	Коло 1	Коло 2
Винос 1		
Винос 2		
Винос 3		

Продовження табл.

	Коло 1	Коло 2
Винос 4		

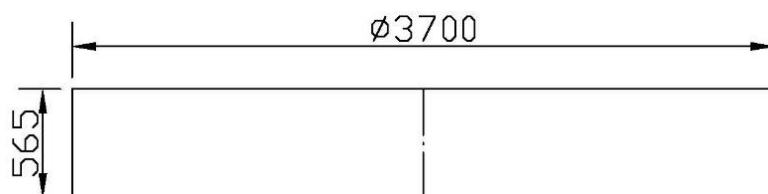


Рисунок 3.5 - Ескіз уточненої заготовки для моделювання процесу штампування днища парогенератора з урахуванням фактичних параметрів ф. №15-14010

**Технологія виготовлення днища парогенератора за результатами моделювання:**

1. Розміри заготовки під штампування:  $\text{Ø}3700 \times 565$  мм.
2. Нагрівання перед кожним виносом до  $1240^\circ\text{C}$ .
3. Кожне коло складається з 13 одиничних натисків, що проходять щоразу під різними кутами повороту інструменту.
4. Одним кругом вважати поворот стола на кут не менше  $180^\circ$ .
5. Час підігріву між виносом 6-8 годин.

Після суміщення ескізів отриманого напівфабрикату при різних кутах перерізів спостерігаються перепади по висоті стінки напівфабрикату, що обумовлюється хвилеподібною формою торцевої частини стінки (рис. 3.6).

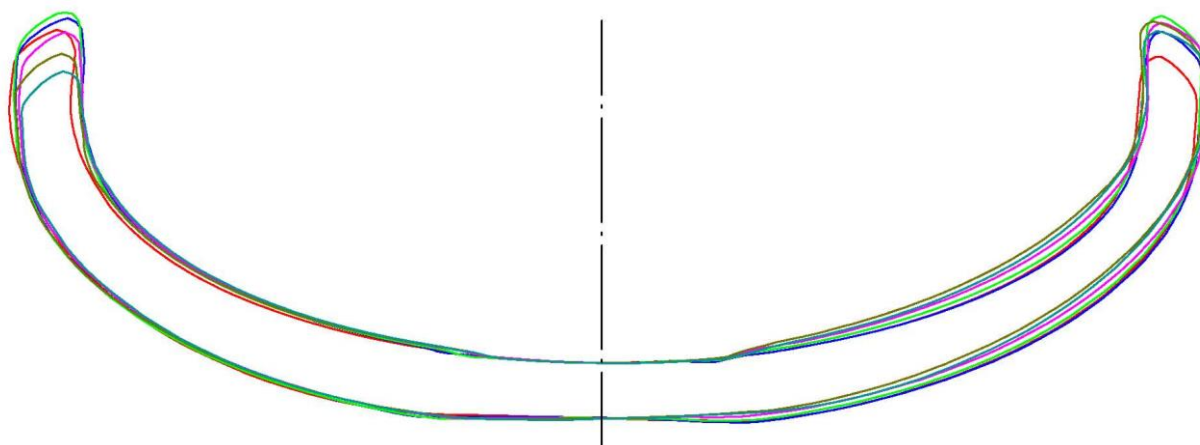


Рисунок 3.6 - Співставлення ескізів отриманих напівфабрикатів за різних кутів перерізу

Після суміщення ескізу днища після механічної обробки під термічну обробку з ескізами напівфабрикату при різних кутах перерізу спостерігається принципова відповідність форм отриманого напівфабрикату і деталі, що виготовляється.

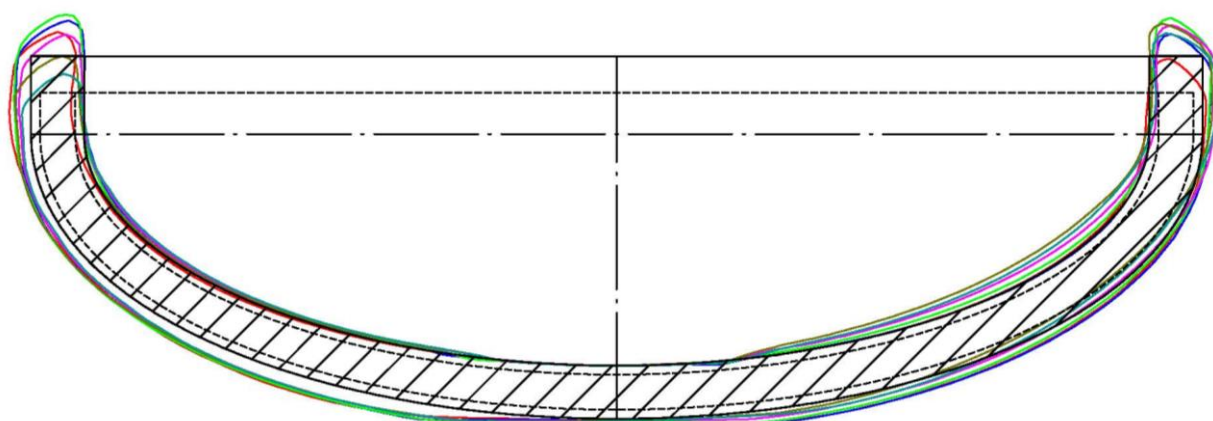


Рисунок 3.7 - Співставлення ескізів напівфабрикатів та деталі, що виготовляється

### Особливості технологічного процесу:

- Змащувати лише внутрішній бік бойка.
- Необхідно забезпечити центрування інструменту один щодо іншого з похибкою 5-10 мм уздовж осей.
- Затиски в процесі штампування можуть утворюватися при великих обтисканнях
- До завершення обходу бойком 180 градусів на 1 колі 2 виносу виникає відхилення від форми "човника" (рис. 3.8-3.10).
- Якщо за один виніс виконується два кола штампування, тоді після проведення 13 натискання наступним за ним натиском (1 удар другого кола) відбувається бойком, який повинен бути повернутий на кут +10 градусів щодо останнього (13-го натиску 1 кола).
- У процесі деформування напівфабрикату калібруючим бойком можливі прослизання заготовки навколо своєї осі, що призводить до повторного удару бойком в одне місце.
- При використанні калібрувального бойка для усунення прослизання використовувалися наступні кути повороту одного інструменту щодо іншого (рис. 3.8-3.10):

Таблиця 3.3 - Поетапне формоутворення

Удар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Оберт, град	0	30	-15	45	-15	45	-15	45	-15	45	-15	45	-15

Знак "-" означає поворот інструменту на протилежний бік від попереднього значення кута повороту

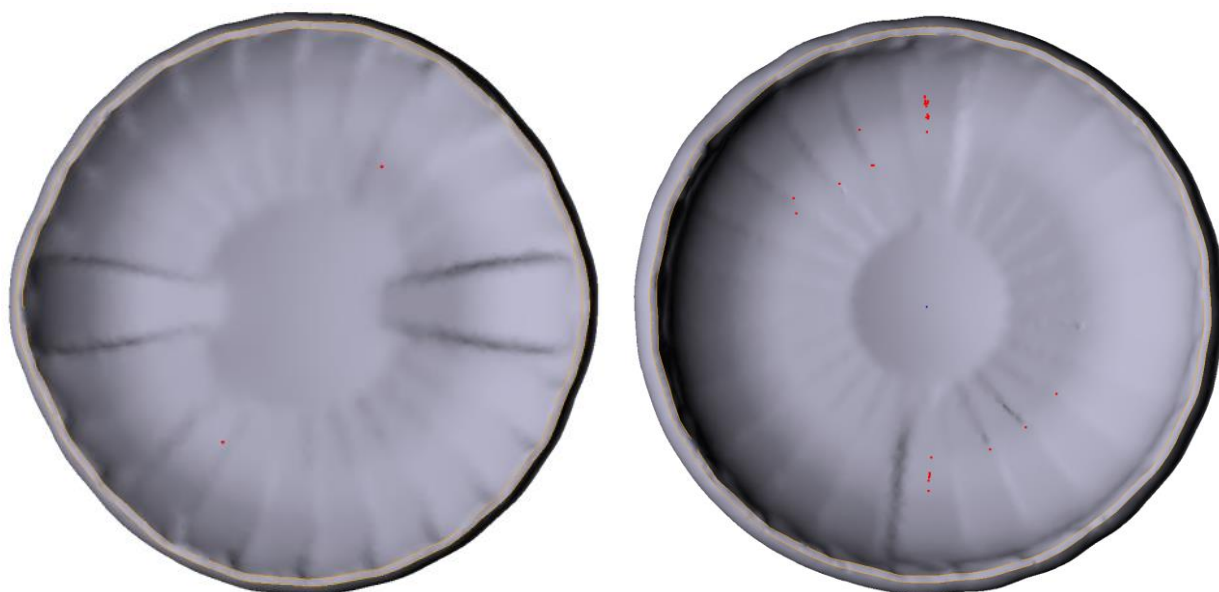


Рисунок 3.8 – Формозмінення заготовки у площині  $xy$



Рисунок 3.9 – Формозмінення заготовки у площині  $yz$



Рисунок 3.10 – Формозмінення заготовки у площині  $xz$

**Рекомендації щодо внесення змін до технологічного процесу на підставі проведеного моделювання.** Деякі зміни в технологічному процесі були внесені в технологію в процесі моделювання, однак деякі з рекомендацій варто виділити, оскільки вони є аналізом всього процесу моделювання. Рекомендуємо у 2-му та 4-му виносі виконувати по два кола за винос. При цьому забезпечивши сумарну величину ходу як на одному колі.

Таблиця 3.4 - Рекомендовані технологічні параметри процесу штампування

Ви-нос	Бойок	Коло, шт	Кількість ударів, шт	Відстань між бойками, мм
1	Робочий	1	13	280
		2	13	150
2		1	13	90
		2	13	30
3	Калібрувальний	1	13	200
		2	13	110
4		1	13	80
		2	13	30

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що базовий технологічний процес штампування днищ по технології ПАТ «Енергомашспецсталь» призводить до значної різнотовщинності стінки, а також викривленню форми поковки, що потребує призначення додаткових припусків, а відповідно це призводить до збільшення витрат металу.

Формозміна заготовки у процесі деформації залежить від напружено-деформованого стану (НДС). У досліджуваному процесі НДС залежить від геометрії заготовки, інструменту, температурних режимів деформування та схеми кування.

Огляд способів отримання великогабаритних днищ показав, що найбільш перспективним з точки зору мінімальних витрат і якості поковок, що отримуються, є спосіб роздачі днищ сферичною плитою порожнистих конусних заготовок. Запропонований спосіб дозволяє знизити зусилля деформування, так як операція роздачі енергетично вигідніше закритого штампування. Проблема отримання сферичних днищ полягає у визначенні оптимальної геометрії пустотілої заготовки, яка після осадження сферичною плитою набуде заданої форми. Для наближення форми заготовки до форми поковки та

можливості бездефектного отримання днищ було прийнято рішення роздачі порожнистих конусних заготовок (див. п. 2.1). Конусна пустотіла заготовка ближче за формою до сферичної, краще вписується в сферу, ніж циліндрична пустотіла заготовка, так як для сферичних поковок характерний більший діаметр у верхній частині, як і у конусних.

Крім цього, операція роздачі відбувається з нерівномірною деформацією стінки порожнистої заготовки по висоті. Отже, цій операції необхідно піддавати заготовки з початковою різнотовщинністю стінки, а саме більшою товщиною у верхній частині, тому що ця зона буде зазнавати більший ступінь деформації. Завданням даного дослідження є визначення раціональної геометрії конусної пустотілої заготовки, яка після роздачі сферичною плитою набуде форми близьку до поковки з мінімально можливими припусками. Припуск для цієї технологічної операції визначатиметься максимальною різнотовщинністю поковки.

### **3.2. Формозміна та деформований стан конусної глухондонної заготовки після роздачі сферичним пуансоном**

Процес роздачі конусної глухондонної заготовки сферичною плитою на сьогоднішній день не досліджено. Для розробки методики проектування нових технологічних процесів кування днищ роздачою необхідно встановити формозміну та НДС у процесі роздачі. Формозміна заготовки в процесі роздачі дозволить встановити ефективні геометричні параметри заготовки перед роздачою сферичною плитою для отримання поковок необхідних розмірів без зовнішніх дефектів (складок, затискачів, утяжин та ін.).

Розподіл деформацій у тілі заготовки дозволить кількісно оцінити опрацювання структури поковки для забезпечення необхідної якості (механічних властивостей). Детальна методика проведення дослідження подана у п. 2.2. Критерієм формозміни у процесі роздачі є відносна деформація стінки

поковки у верхній частині  $\frac{S-t}{t}$  (відносна різнотовщинність). На підставі цього параметра встановлюватиметься ефективна геометрія заготовки перед роздачею сферичної плити. Критерієм рівномірного опрацювання рівномірного опрацювання структури поковки виступає нерівномірність розподілу деформацій  $\Delta e = e_{max} - e_{min}$ . Для спрощення аналізів отриманих результатів було запропоновано розбити отримані результати на 3 групи за розмірами внутрішнього діаметра у верхній частині  $D_{отв} / D_{сф}$ . Цей параметр визначає стінку вихідної заготовки, відповідно її потоншення, і навіть визначає «охоплення» заготовкою сферичної поверхні плити і як буде встановлено далі є значним чинником процес потоншення стінки (п. 3.2). Варіювання внутрішнього діаметра заготовки у верхній частині проводилося на 3-х рівнях і становило 0,5; 0,6; 0,7.

### 3.1.1. Роздача заготовки з відносним діаметром отвору 0,5

Досліджувана схема роздачі конусної заготовки глухдонной з діаметром у верхній частині рівного радіусу сферичної плити призводить до значної різнотовщинності заготовки (табл. 3.5). Це пояснюється переважанням підсадки заготовки при малих діаметрах отвору у верхній частині порівняно з роздачею. Це призводить до потовщення стінки поковки та отримання малої висоти днища. Мінімальна різнотовщинність заготовки з 9 схем, що розглядаються, утворюється для схеми роздачі №3 ( $\Delta S/t = 0,7$ ). Мінімальна нерівномірність розподілу деформацій  $\Delta e = 1,1$  також утворюється в схемі № 3. Це дозволяє вибрати схему № 3 як ефективну з точки зору мінімальної різнотовщинності та мінімальної нерівномірності розподілу деформації для досліджуваних 9 схем з відносним діаметром отвору  $D_{отв}/D_{сф} = 0,5$ .

### 3.1.2. Роздача заготовки з відносним отвором діаметром 0,6.

Збільшення діаметра отвору у верхній частині конусної глухдонної заготовки зменшує різнотовщинність одержуваних заготовок (табл. 3.6). Отримана різнотовщинність становить  $< 0,5$  (схеми № 20, 25, 26). Це пояснюється

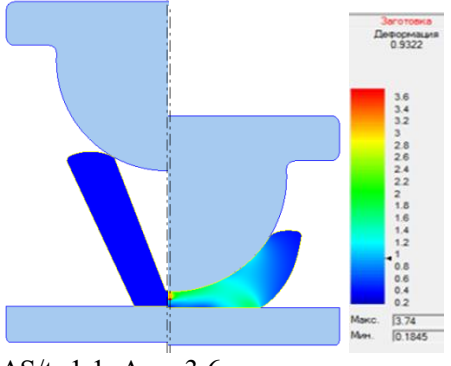
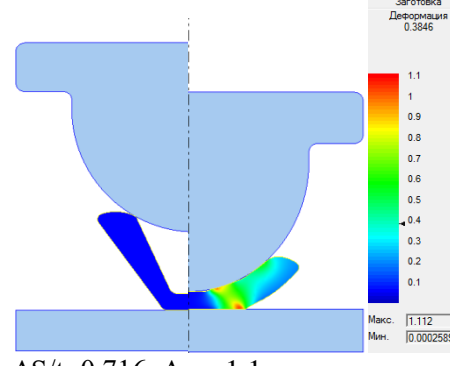
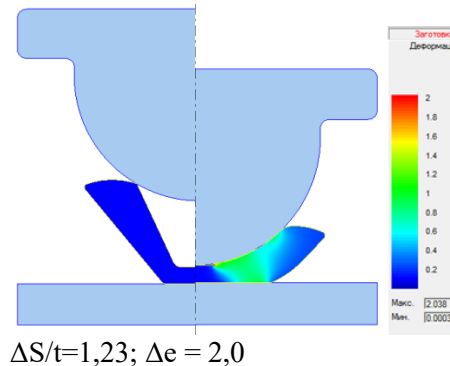
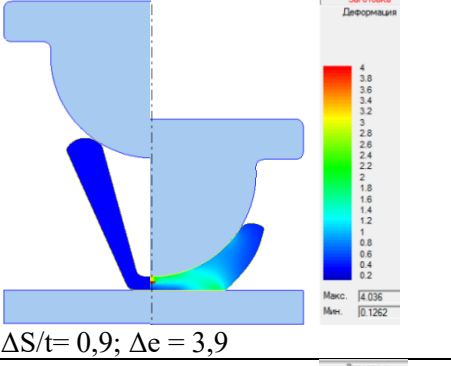
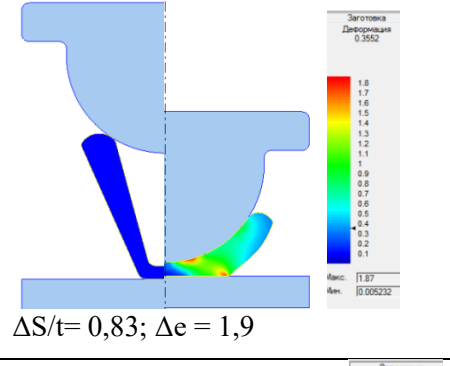
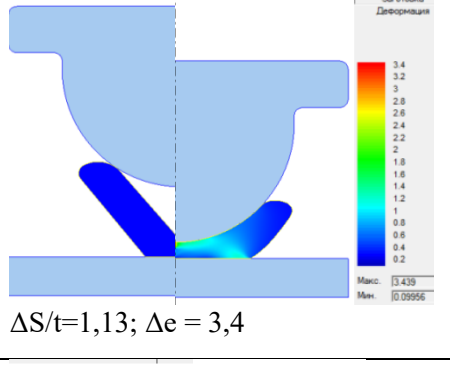
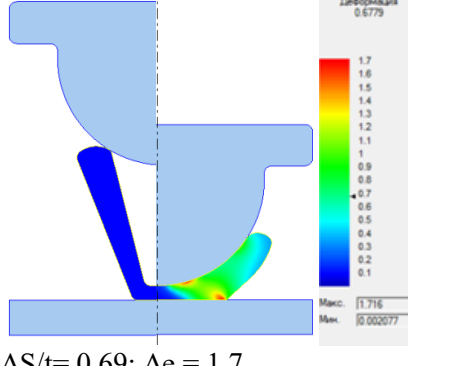
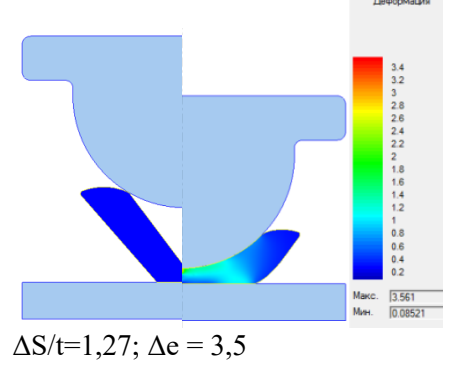
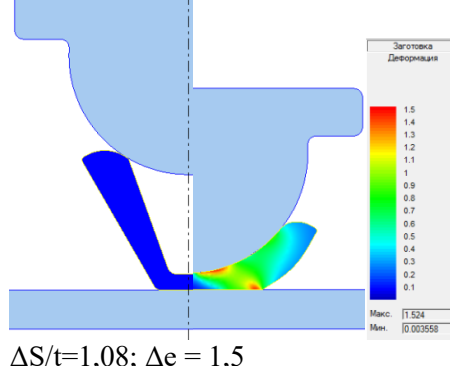
збільшенням інтенсивності роздачі заготовки по відношенню до підсадки, що викликано більшим ступенем розклинювання заготовки при більшому діаметрі. У цьому випадку мінімальна нерівномірність розподілу деформацій становить  $\Delta e = 1,5$  (схема № 20, табл.3.6). Таким чином, схема роздачі № 20 забезпечує мінімальну різнотовщинність і високу рівномірність розподілу деформацій і дозволяє вибрати цю схему як ефективну з 9 схем роздачі, що розглядаються (табл. 3.6).

### 3.1.3. Роздача заготовки з відносним діаметром отвору 0,7

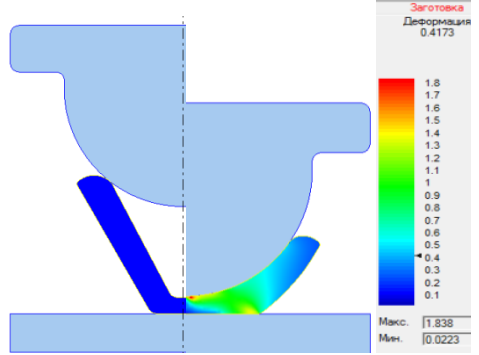
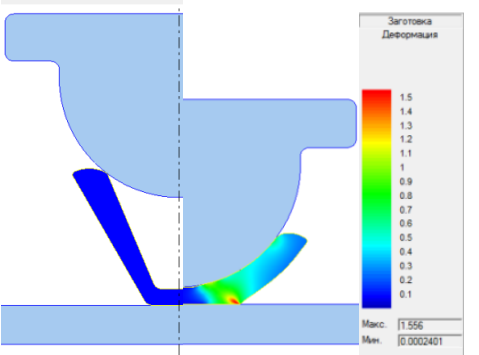
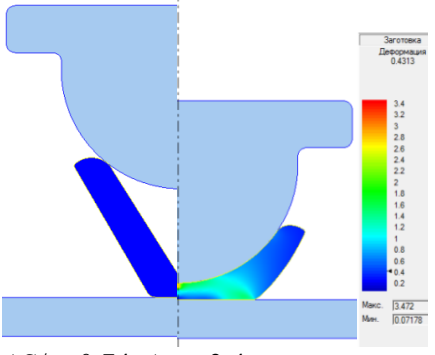
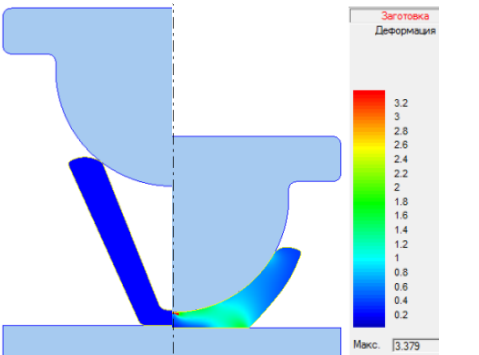
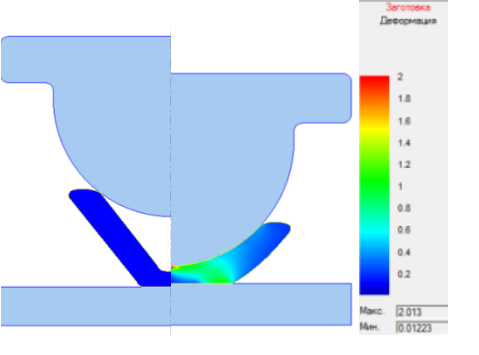
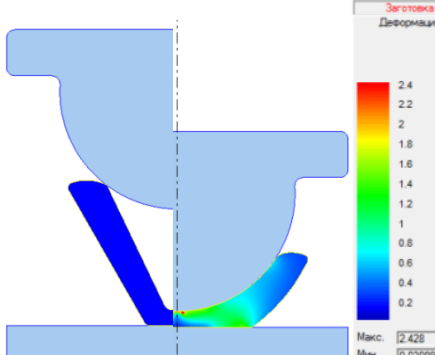
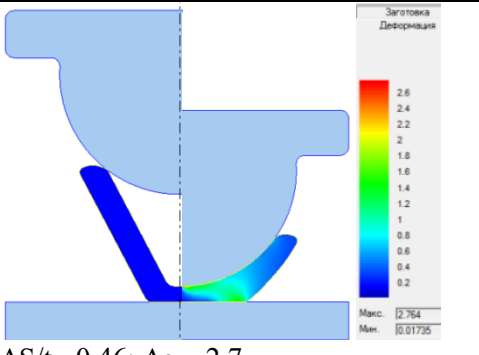
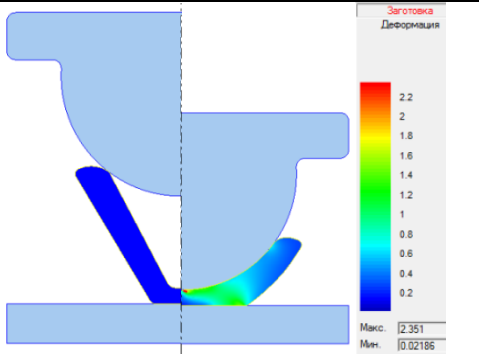
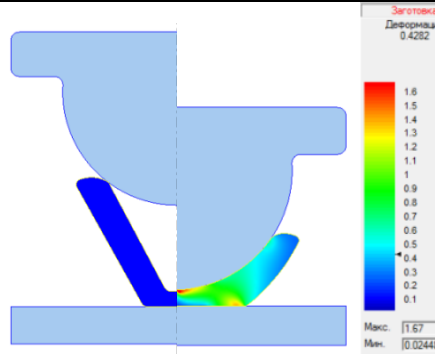
Подальше збільшення діаметра отвору заготовки призводить до утворення товщини стінки у верхній частині менше ніж в поковці (табл. 3.7), про що свідчить знак «-» у розрахунку відносної деформації стінки  $\left(\frac{S-t}{t}\right)$ . Це пояснюється зменшенням підсаджування заготовки (відбувається інтенсивна роздача) із збільшенням діаметра отвору вихідної заготовки. Прийнятна різнотовщинність відбувається при роздачі за схемою № 6, 11, 15, 18 (табл. 3.7).

Збільшений діаметр отвору призводить до зниження нерівномірності розподілу деформації ( $\Delta e < 1,5$ ). Мінімальна різнотовщинність  $\left(\frac{S-t}{t}\right) = 0,34$  та мінімальна нерівномірність розподілу деформацій ( $\Delta e = 0,9$ ) утворюється при роздачі за схемою № 15 (табл. 3.7). Задля забезпечення заданої товщини стінки поковки після роздачі конусної заготовки сферичною плитою ефективними виявилися такі геометричні параметри вихідної конусної заготовки:  $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7$ ;  $\frac{H}{D_{сф}} = 0,4 \dots 0,55$ ;  $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85 \dots 0,9$  (схеми номер 11 та 18). Розміри вихідної заготовки в цих діапазонах можна використовувати як рекомендації для розробки нового технологічного процесу штампування днищ сферичною плитою. З усіх розглянутих 27 схем роздачі схема № 11 та 18 забезпечує прийнятні результати формозміни та НДС. Аналіз отриманих результатів дозволяє рекомендувати ці схеми, з погляду НДС та формозміни як ефективну. Ця схема вимагає подальшого дослідження та аналізу.

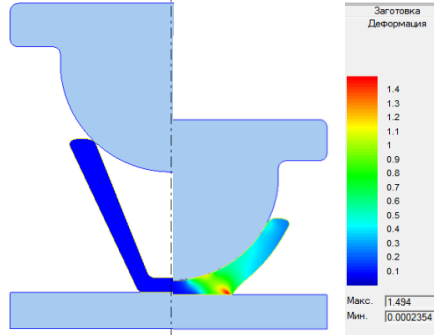
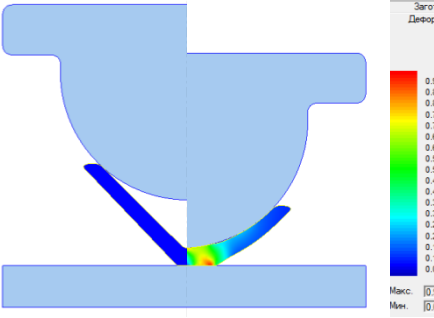
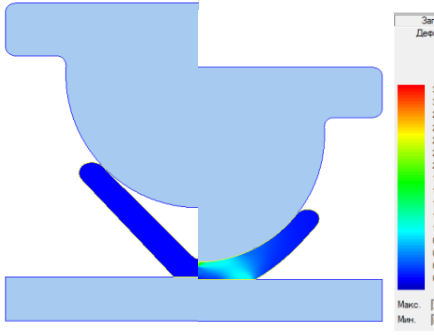
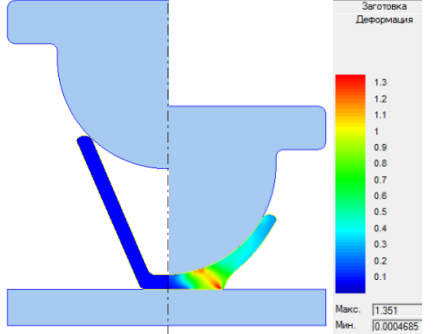
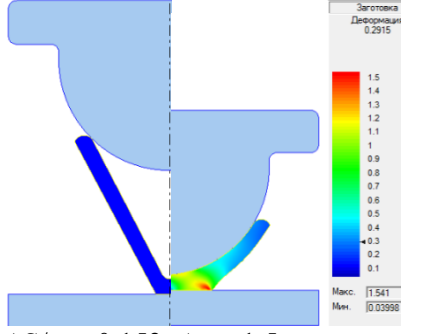
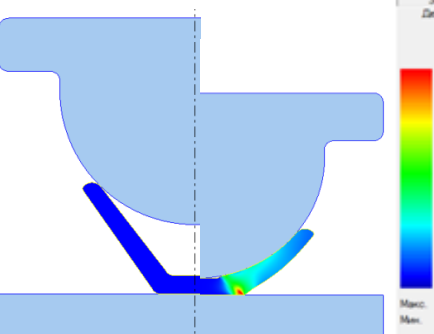
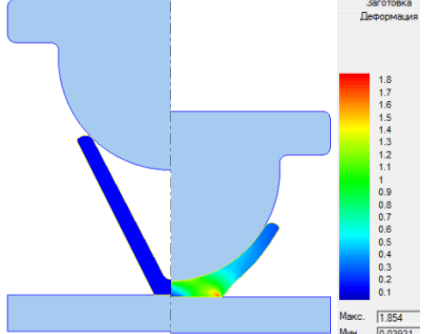
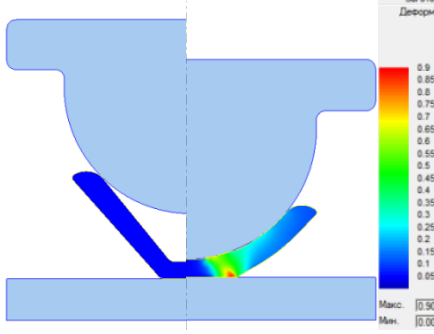
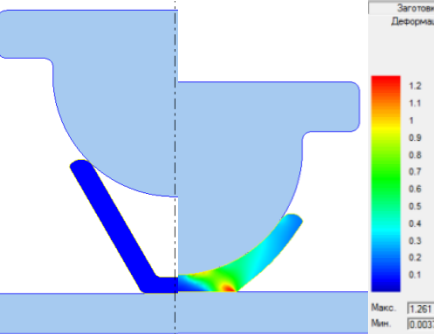
Таблиця 3.5 - Формозміна та НДС конусної заготовки в процесі роздачі сферичною плитою з  $D_{отв} / D_{сф} = 0,5$ 

№	Деформація	№	Деформація	№	Деформація
2.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,2$ $\Delta S/t = 1,1; \Delta e = 3,6$ 	3.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2; \frac{H}{D_{сф}} = 0,4;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$ $\Delta S/t = 0,716; \Delta e = 1,1$ 	5.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2; \frac{H}{D_{сф}} = 0,4;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$ $\Delta S/t = 1,23; \Delta e = 2,0$ 
8.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$ $\Delta S/t = 0,9; \Delta e = 3,9$ 	9.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\Delta S/t = 0,83; \Delta e = 1,9$ 	12.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,4; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$ $\Delta S/t = 1,13; \Delta e = 3,4$ 
13.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2; \frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$ $\Delta S/t = 0,69; \Delta e = 1,7$ 	16.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,4;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$ $\Delta S/t = 1,27; \Delta e = 3,5$ 	19.	$\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,5; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,1;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,55; \frac{d}{D_{сф}} = 0,9; \frac{d}{D_{сф}} = 0,275$ $\Delta S/t = 1,08; \Delta e = 1,5$ 

Таблиця 3.6 - Формозміна та НДС конусної заготовки в процесі роздачі сферичною плитою з  $D_{отв}/D_{сф}=0,6$ 

$17. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1;$ $\frac{H}{D_{сф}}=0,55; \frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=1,02; \Delta e = 1,8</math></p>	$20. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,2;$ $\frac{H}{D_{сф}}=0,55; \frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=0,49; \Delta e = 1,5</math></p>	$21. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0;$ $\frac{H}{D_{сф}}=0,55; \frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=0,74; \Delta e = 3,4</math></p>
$22. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1; \frac{H}{D_{сф}}=0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=0,63; \Delta e = 3,3</math></p>	$23. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1; \frac{H}{D_{сф}}=0,4;$ $\frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=0,66; \Delta e = 2,0</math></p>	$24. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1; \frac{H}{D_{сф}}=0,55$ $\frac{D}{D_{сф}}=0,95; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=0,59; \Delta e = 2,4</math></p>
$25. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1;$ $\frac{H}{D_{сф}}=0,55; \frac{D}{D_{сф}}=0,85; \frac{d}{D_{сф}}=0,275$	 <p><math>\Delta S/t=0,46; \Delta e = 2,7</math></p>	$26. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1;$ $\frac{H}{D_{сф}}=0,55; \frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,3$	 <p><math>\Delta S/t=0,42; \Delta e = 2,3</math></p>	$27. \frac{D_{отв}}{D_{сф}}=0,6; \frac{d_{отв}}{D_{сф}}=0,1;$ $\frac{H}{D_{сф}}=0,55; \frac{D}{D_{сф}}=0,9; \frac{d}{D_{сф}}=0,25$	 <p><math>\Delta S/t=0,53; \Delta e = 1,6</math></p>

Таблиця 3.7 - Формозміна та НДС конусної заготовки в процесі роздачі сферичною плитою з  $D_{отв} / D_{сф} = 0,7$ 

№	Деформація	№	Деформація	№	Деформація
1. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2; \frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$	 Макс. [1494] Мин. [0.0002354]	4. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,4;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$	 Макс. [3489] Мин. [0.01966]	6. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,4;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$	 Макс. [285] Мин. [0.0252]
7. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,7; \frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$	 Макс. [1351] Мин. [0.0004685]	10. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$	 Макс. [1541] Мин. [0.03998]	11. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,4; \frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$	 Макс. [3667] Мин. [0.054]
14. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0; \frac{H}{D_{сф}} = 0,7;$ $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85; \frac{d}{D_{сф}} = 0,3$	 Макс. [1854] Мин. [0.03931]	15. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,2;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,4; \frac{D}{D_{сф}} = 0,95; \frac{d}{D_{сф}} = 0,25$	 Макс. [9014] Мин. [0.00023]	18. $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7; \frac{d_{отв}}{D_{сф}} = 0,1;$ $\frac{H}{D_{сф}} = 0,55; \frac{D}{D_{сф}} = 0,9; \frac{d}{D_{сф}} = 0,275$	 Макс. [1261] Мин. [0.00379]
$\Delta S/t = 0,59; \Delta e = 1,5$	$\Delta S/t = -0,23; \Delta e = 0,9$	$\Delta S/t = -0,32; \Delta e = 3,2$	$\Delta S/t = -0,25; \Delta e = 1,3$	$\Delta S/t = -0,153; \Delta e = 1,5$	$\Delta S/t = -0,07; \Delta e = 0,95$
$\Delta S/t = -0,36; \Delta e = 1,8$	$\Delta S/t = 0,34; \Delta e = 0,9$	$\Delta S/t = -0,1; \Delta e = 1,2$			

### 3.3 Визначення раціональних геометричних параметрів пустотілої заготовки до роздачі сферичним пуансоном

У процесі роздачі заготовки сферичною плитою було виявлено вплив початкових розмірів конусної порожнистої заготовки на формозміну та різновтовщинність поковки. Схема проведення експерименту представлена рисунку 2.1.

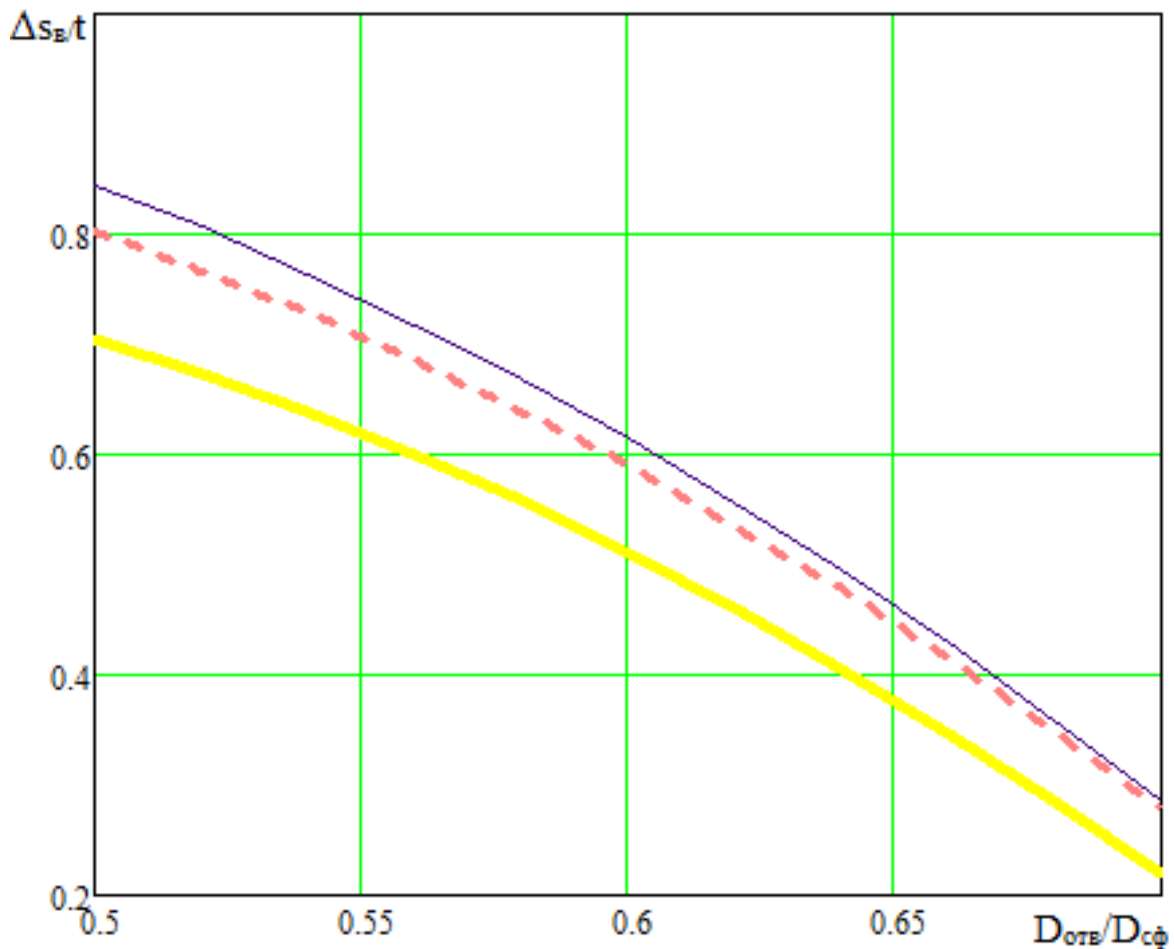
В результаті чисельного експерименту було проведено 27 скінчено-елементних розрахунків. Кожен розрахунок закінчувався одержанням сферичного днища. Для кожного випадку було розраховано максимальну різновтовщинність стінки поковки. З використанням теорії планування експерименту були побудовані графіки залежності відносної різновтовщинності  $\Delta s_B / t$  від геометричних параметрів вихідної заготовки ( $\Delta s_B = s_B - t$  – різниця між товщиною стінки у верхній частині поковки та заданою товщиною стінки). Мета даного дослідження встановити оптимальну геометрію вихідної пустотілої конусної заготовки перед роздачею для отримання поковки з мінімальною різновтовщинністю для зменшення величини припуску або напуску.

Моделювання процесу роздачі пустотілої конусної заготовки із заданою різновтовщинністю верхньої стінки підтвердило припущення про те, що в результаті втискання інструменту в пустотілу заготовку відбувається інтенсивне потоншення стінки у верхній її частині. Зменшення різновтовщинності відбувається практично лінійно зі збільшенням діаметрів отворів у конусній заготовці. Як параметр відгуку (оптимізації) була обрана відносна різновтовщинність поковки -  $\Delta s_B / t$ .

Основним параметром, який визначає стабільність процесу роздачі порожнистої заготовки є її висота. При роздачі високих заготовок може статися викривлення заготовки (втрата стійкості). При осаджені низьких заготовок – висока ймовірність отримати поковку заввишки менше, ніж потрібно. Для розробки подальших технологічних рекомендацій доцільніше оперувати

відносним параметром  $H/D_{\text{сф}}$ , який дозволяє дати прив'язку висоти заготовки до діаметра сферичного днища, що отримується.

У зв'язку з цим була встановлена закономірність відносної різнотовщинності поковки  $\Delta S/t$  від відносного діаметра отвору в заготовці  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$  для різних відносних висот заготовки  $H/D_{\text{сф}}$  (рис. 3.11)



—  $H/D_{\text{сф}} = 0,4$ ; - - -  $H/D_{\text{сф}} = 0,55$ ; - - - -  $H/D_{\text{сф}} = 0,7$

Рисунок 3.11 – Вплив відносного діаметра отвору заготовки ( $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ ) на відносну різнотовщинність ( $\Delta S_{\text{в}}/t$ ) при різній відносній висоті заготовки ( $H/D_{\text{сф}}$ )

Аналізуючи отримані результати (рис. 3.11), можемо дійти невтішного висновку у тому, що відносна висота заготовки незначно впливає на

різновщинність поковки. Зі збільшенням відносного внутрішнього діаметра отвору заготовки різновщинність зменшується особливо для високих заготовок. Потоншення стінки у верхній частині пояснюється збільшенням діаметра в цій зоні (роздачі), який збільшується за рахунок зменшення товщини стінки. Але мінімальну можливу різновщинність можна отримати в діапазоні 0,2...0,3, тобто отримувана поковка буде мати товщину стінки на 20...30% більшу за потрібну, що збільшує напуск на механічну обробку.

Другим важливим фактором, що впливає на формозміну заготовки в процесі роздачі, є різновщинність стінки вихідної заготовки. Товщина стінки заготовки у верхній частині визначається двома параметрами  $\frac{D-D_{\text{отв}}}{2}$ . За результатами моделювання були побудовані графічні залежності зміни різновщинності поковки днища від зовнішнього діаметра заготовки  $D/D_{\text{сф}}$  при різних діаметрах отвору  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$  (рис. 3.12).

Отримані результати підтверджують висунуте раніше припущення, що найменша різновщинність спостерігається при максимальному відносному внутрішньому діаметрі заготовки  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,7$ . Це пояснюється вирівнюванням надлишку (компенсуванням) об'єму в верхній частині заготовки подальшим її потоншенням при роздачі. Що стосується впливу відносного зовнішнього діаметра заготовки, то при максимальному діаметрі отвору у верхній частині заготовки і мініимальному зовнішньому діаметрі, різновщинність приймає негативне значення, що свідчить про зменшення товщини стінки менше номінального значення, що призведе до браку. Мініимальні значення різновщинності спостерігаються при максимальних співвідношеннях  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,7$  і  $D/D_{\text{сф}} < 0,85$ . Це пояснюється наближенням розмірів заготовки до розмірів поковки (за внутрішнім діаметром), а відповідно меншим потоншенням стінки конусної глуходонної заготовки, що роздається.

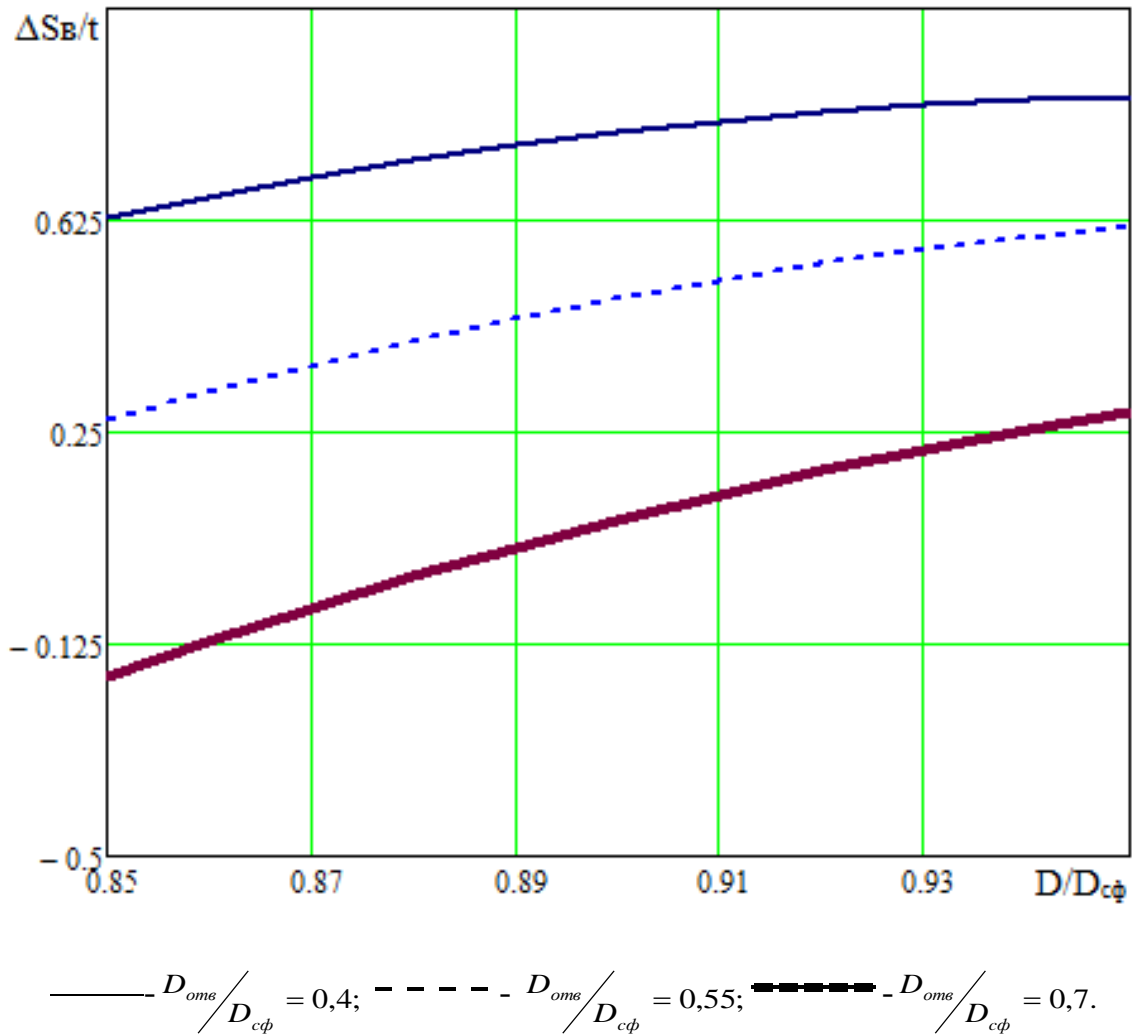
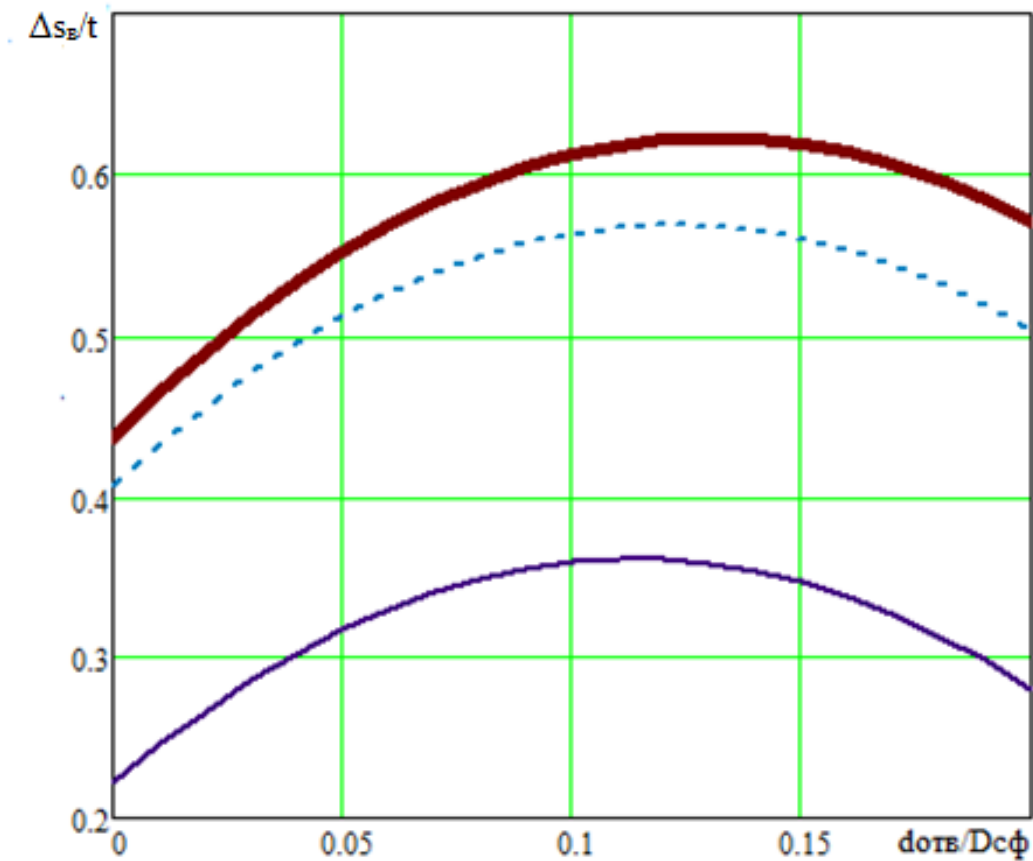


Рисунок 3.12 – Вплив відносного зовнішнього діаметра заготовки ( $D/D_{cφ}$ ) на різновтовщинність поковки ( $\Delta S_B/t$ ) при різному відносному внутрішньому діаметрі заготовки ( $D_{отв}/D_{cφ}$ )

При проектуванні ефективної геометрії заготовки необхідно встановити вплив діаметрів (внутрішнього і зовнішнього) в нижній частині заготовки на формозмінення і потоншення стінки. Для цього були побудовані графічні залежності (рис. 3.13) відносної різновтовщинності від відносних діаметрів нижньої частини заготовки ( $d_{отв}/D_{cφ}$  і  $d/D_{cφ}$ ). Внутрішній діаметр в нижній частині заготовки ( $d_{отв}/D_{cφ}$ ) може впливати на різновтовщинність і складкоутворення при роздачі сферичною плитою.

Аналізуючи графічні результати різнотовщинності в залежності від геометрії в нижній частині заготовки (рис. 3.13), можемо зробити висновок про те, що зі збільшенням зовнішнього діаметра заготовки в нижній частині  $d/D_{\text{сф}}$  різнотовщинність збільшується. Найменша різнотовщинність спостерігається при мінімальному внутрішньому діаметрі заготовки ( $d_{\text{отв}} / D_{\text{сф}}$ ). Це пояснюється найменшою деформацією роздачі в нижній частині заготовки, проте при такому співвідношенні спостерігається утворення складки в донній частині днища (табл.3.5 схема № 2, 8). При максимальному співвідношенні  $d_{\text{отв}} / D_{\text{сф}}$  також спостерігається мінімальна різнотовщинність.



—  $d/D_{\text{сф}} = 0,25$ ; - - -  $d/D_{\text{сф}} = 0,275$ ; - - - -  $d/D_{\text{сф}} = 0,3$ .

Рисунок 3.13 - Вплив відносного найменшого зовнішнього діаметра заготовки ( $d/D_{\text{сф}}$ ) на різнотовщинність поковки ( $\Delta S_{\text{в}}/t$ ) при різному відносному найменшому внутрішньому діаметрі ( $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ )

Слід зазначити, що графічні залежності мають екстремум при значеннях  $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,1..0,15$  для різних зовнішніх діаметрів у нижній частині заготовки (рис. 3.13). Це дозволяє зробити висновок про оптимальну геометрію нижньої частини пустотілої конусної заготовки, яка характерна для  $d/D_{\text{сф}} = 0,25$  і  $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,2$ .

На підставі моделювання QForm 2 D з використанням плану Хартлі були встановлені загальні рекомендації щодо вибору заготовки (пустотілої, конусної) до роздачі сферичною плитою. Було встановлено, що на мінімальне потоншення у верхній частині днища при роздачі переважний вплив має фактор  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ , тому що в рівнянні регресії цьому фактору та його взаємодії відповідає максимальний коефіцієнт

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{в}}/t = & 1,031 - 0,48 \cdot \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} - 9,67 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} + 0,041 \cdot \frac{H}{D_{\text{сф}}} + 0,195 \cdot \frac{D}{D_{\text{сф}}} + 0,119 \cdot \frac{d}{D_{\text{сф}}} + \\ & + 0,129 \cdot \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} - 0,084 \cdot \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{H}{D_{\text{сф}}} + 0,1 \cdot \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{D}{D_{\text{сф}}} + 0,011 \cdot \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{d}{D_{\text{сф}}} + \\ & + 0,092 \cdot \frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{H}{D_{\text{сф}}} + 0,02 \cdot \frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{D}{D_{\text{сф}}} + 0,019 \cdot \frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{d}{D_{\text{сф}}} + 2,063 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{H}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{D}{D_{\text{сф}}} + \\ & + 0,069 \cdot \frac{H}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{d}{D_{\text{сф}}} + 0,065 \cdot \frac{D}{D_{\text{сф}}} \cdot \frac{d}{D_{\text{сф}}} - 0,163 \cdot \left( \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \right)^2 - 0,108 \cdot \left( \frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} \right)^2 - 0,085 \cdot \left( \frac{H}{D_{\text{сф}}} \right)^2 - \\ & - 0,076 \cdot \left( \frac{D}{D_{\text{сф}}} \right)^2 - 0,077 \cdot \left( \frac{d}{D_{\text{сф}}} \right)^2 \end{aligned}$$

Після відкидання незначущих параметрів, які менші за довірчий інтервал, рівняння набуло такий вигляд

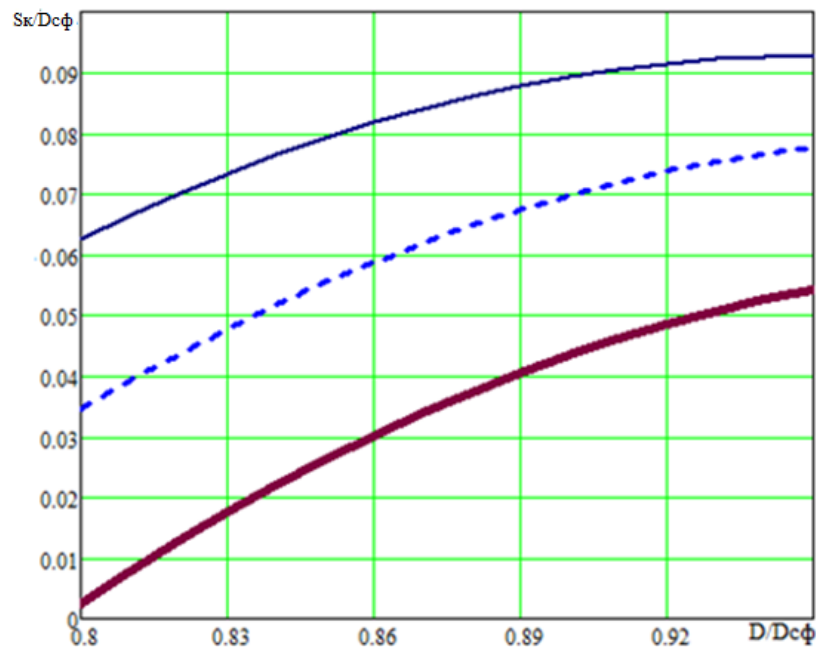
$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{в}}/t = & 1,013 - 0,48 D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} + 0,12 d/D_{\text{сф}} + 0,13 D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} \cdot \\ & d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} + 0,1 D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} \cdot D/D_{\text{сф}} - 0,16 (D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}})^2 - 0,1 (d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}})^2 \quad (3.1) \end{aligned}$$

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити рекомендоване значення параметра  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ , яке гарантуватиме утворення мінімальної різнотовщинності та виключення утворення складок та затисків на поковці. Діапазон раціонального цього параметра становить 0,6...0,8.

Фактор  $H/D_{\text{сф}}$  – малозначущий і при забезпеченні мінімальної різнотовщинності  $S$  отриманні заданої товщини дна днища ( $t$ ) висота заготовки  $H_{\text{к}}$  буде виходити автоматично виходячи із закону сталості об'ємів.

Нижні діаметри заготовки ( $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$  і  $d_{\text{вн}}/D_{\text{сф}}$ ) не впливають на формозміну заготовки при роздачі, тому прийняті не значущими, що підтверджується коефіцієнтом рівняння регресії (3.1). Для попередження утворення складок рекомендується прийняти  $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,2$ . Для проектування нового технологічного процесу отримання днищ роздачою необхідно встановити раціональну геометрію пустотілої конусної заготовки після роздачі конусної плити. Основними відносними розмірами заготовки є  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$  і  $D/D_{\text{сф}}$ , які необхідно визначити. Як було зазначено вище  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,6..0,8$ . Для визначення зовнішнього діаметра заготовки  $D$  необхідно встановити залежність одержуваної відносної кінцевої товщини стінки ( $S_{\text{к}}/D_{\text{сф}}$ ) від відносного зовнішнього діаметра заготовки  $D/D_{\text{сф}}$  при різних відносних внутрішніх діаметрах заготовки  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ .

Для цього використовуються попередні результати моделювання роздачі конусної заготовки сферичною плитою. Отримана закономірність дозволяє встановити відносний зовнішній діаметр заготовки  $D/D_{\text{сф}}$  для отримання заданої відносної товщини днища  $S_{\text{к}}/D_{\text{сф}}$  (рис. 3.14).



$$\text{—————} \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} = 0,6; \quad \text{-----} \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} = 0,7; \quad \text{—————} \frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}} = 0,8$$

Рисунок 3.14 – Графік залежності одержуваної відносної кінцевої товщини стінки ( $S_{\text{к}}/D_{\text{сф}}$ ) від відносного зовнішнього діаметра заготовки ( $D/D_{\text{сф}}$ ) при різних відносних внутрішніх діаметрах заготовки ( $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ )

Раціональна форма конусної пустотілої заготовки перед роздачею сферичною плитою представлена на рисунку 3.15.

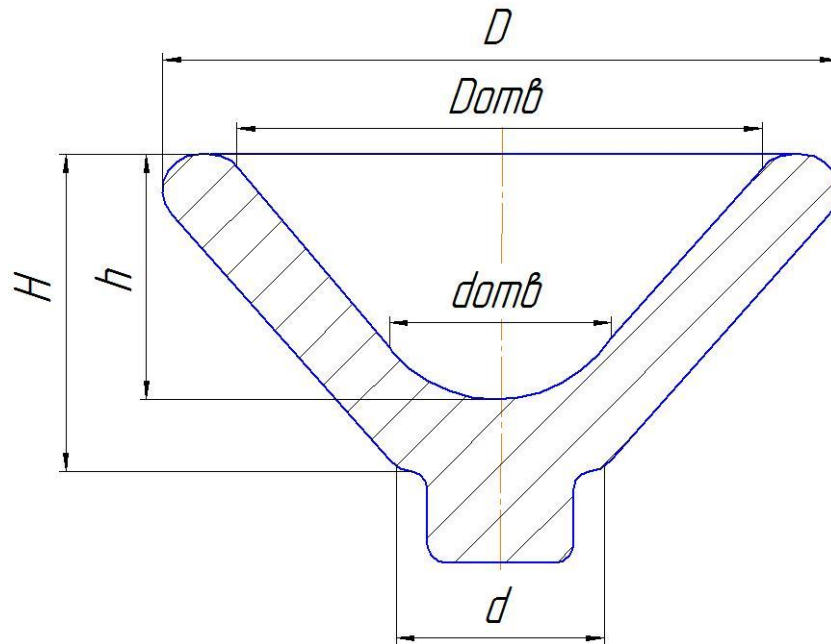


Рисунок 3.15 – Ескіз заготовки після роздачі конусною плитою

Користуючись даним графіком, можна визначити внутрішній і зовнішній діаметр заготовки після роздачі конусним бойком. Маючи співвідношення  $S_k / D_{сф}$  заданої поковки, при перетині з кривою, яка відповідає за відносний внутрішній діаметр заготовки  $D_{отв} / D_{сф}$  визначаємо відносний зовнішній діаметр заготовки  $D / D_{сф}$ . Висоту заготовки перед роздачею сферичною плитою знаходимо виходячи з рівності об'ємів заготовки та одержуваної поковки.

### 3.4 Визначення раціональних геометричних параметрів пустотілої заготовки перед роздачею конусним пуансоном

На підставі результатів моделювання у програмі QForm 2D було досліджено новий технологічний процес отримання днищ куванням з використанням операції роздачі. В результаті моделювання була встановлена модель (3.1) різновтовщинності поковки ( $\Delta S_b / t$ ) при роздачі конусної порожнистої

заготовки сферичною верхньою плитою з використанням теорії планування експерименту (див. п. 2.1).

Була встановлена оптимальна геометрія пустотілої конусної заготовки, яка після роздачі сферичною плитою отримала мінімальну різновтовщинність у верхній частині поковки. В результаті дослідження була встановлена товщина стінки заготовки у верхній частині, яка після роздачі сферичною плитою гарантувала отримання поковки заданих розмірів за товщиною стінки та висотою.

Цій умові відповідає заготовка, представлена рисунку 3.15. Аналіз геометрії отриманої заготовки (рис. 3.15) дозволив встановити, що задана форма може бути отримана при відливанні зливка спеціальної геометрії. Однак така конструкція зливка не є технологічною за формою. Більш того, отриманий злиток після роздачі не забезпечує накопичення достатньої величини деформації в тілі заготовки, що знизить проковування литої структури і не сприятиме підвищенню ударної в'язкості сталі поковки.

На підставі цього, було прийнято рішення удосконалити технологічний процес роздачі днища, з метою отримання більш технологічної конструкції зливка, яка підвищить рівень накопичених деформацій при роздачі конусної та сферичної плити. Поставлену мету передбачається досягти за рахунок розробки нової конструкції порожнистого зливка і введення в технологічний процес кування днища додаткової операції роздачі конусної плитою.

Роздача конусної плитою призводитиме до потоншення стінки у верхній частині зливка. У цьому разі необхідно провести додаткове дослідження, яке дозволить встановити вплив операції роздачі конусної плитою на потоншення стінки заготовки, отже, на раціональну геометрію вихідної заготовки (зливка) до роздачі конусної плитою (рис. 3.16). Для визначення геометричних параметрів заготовки необхідно виходити з технологічних можливостей одержання зливка. Для можливості видалення стрижня із зливка необхідно забезпечити кут конусності  $\alpha=15^\circ$ . Діаметр  $d_{0\text{отв}} / D_{\text{сф}}$  рекомендується прийняти 0,2, параметр  $d_0/D_{\text{сф}}$  приймаємо 0,25.

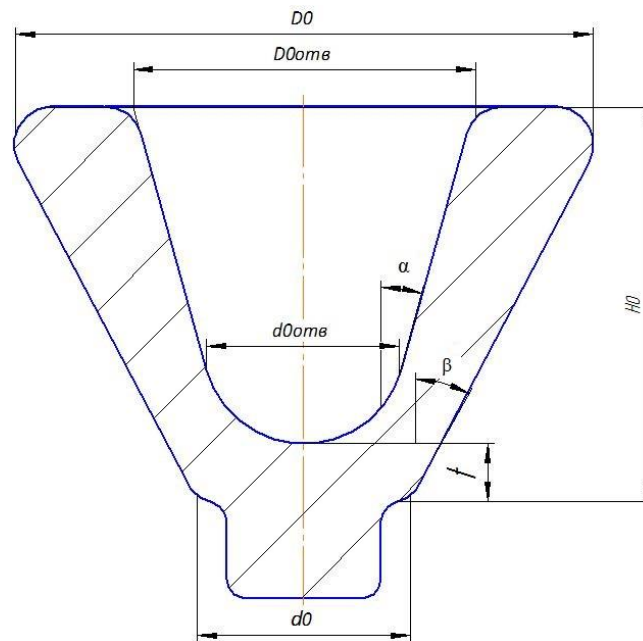
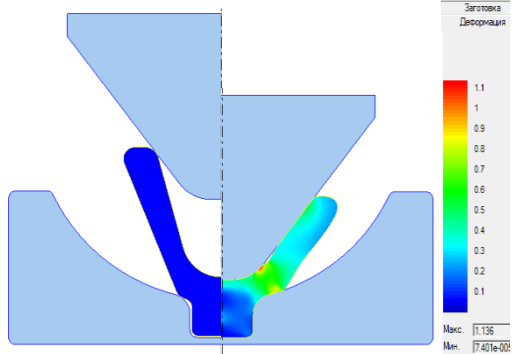
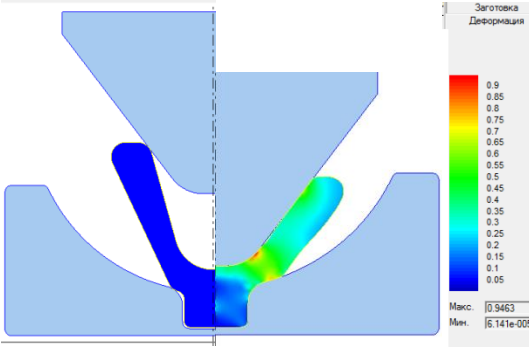
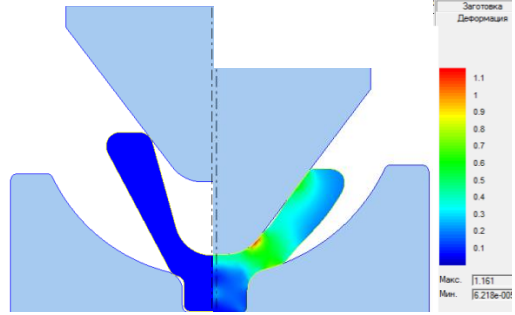
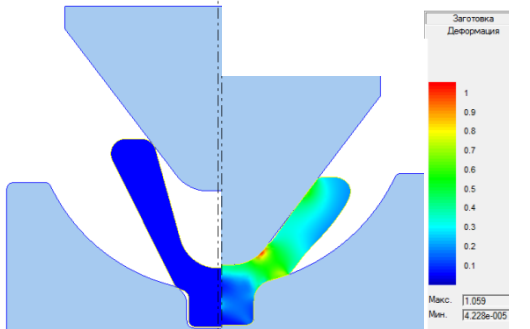
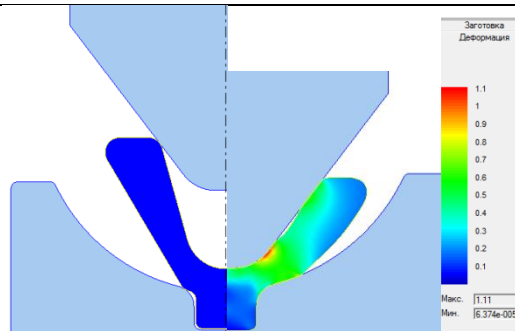


Рисунок 3.16 – Ескіз зливка до роздачі конусною плитою

Параметри  $D_0$  і  $D_{0\text{отв}}$  виходять з відомих кутів  $\alpha$  і  $\beta$ . Для знаходження кута  $\beta$  необхідно провести додаткове моделювання у програмі Qform 2D для різних кутів. Результати моделювання формозміни та НДС представлені у таблиці 3.8. Параметр  $\beta$  приймав значення 22; 26; 27,5; 29 і 32°. Цей діапазон вибирався виходячи з умови отримання різних товщин стінки. Досліджувався вплив кута на відносний зовнішній діаметр пустотілої заготовки  $D/D_{\text{сф}}$  після роздачі конусною плитою. На підставі отриманих результатів було встановлено графічну залежність  $D/D_{\text{сф}}$  від кута конусності зливка  $\beta$  (рис. 3.17). Знаючи необхідний відносний проміжний зовнішній діаметр  $D/D_{\text{сф}}$ , який отриманий з рисунка 3.14, знаходимо кут  $\beta$  (рис. 3.17). Як показує попереднє моделювання (рис. 3.11), висота не значно впливає на різноточинність заготовки, тому параметр  $H_0$  підбираємо виходячи з рівності об'ємів. На цьому етапі слід було встановити як змінюється зовнішній діаметр заготовки ( $D_0$ ) після роздачі конусним пуансоном. Розрахунок зводився до встановлення залежності утворюваного зовнішнього діаметра  $D/D_{\text{сф}}$  від кута конусності  $\beta$ . Ця закономірність є лінійною і описується простою формулою

$$D/D_{\text{сф}} = 0,021\beta + 0,324.$$

Таблиця 3.8 – Формозміна та розподіл деформацій у процесі роздачі конусної плитою зливка з різним кутом конусності  $\beta$

$\beta, ^\circ$	Розподіл деформацій та утворений зовнішній діаметр $D/D_{сф}$	$\beta, ^\circ$	Розподіл деформацій та утворений зовнішній діаметр $D/D_{сф}$
22	 <p><math>D/D_{сф} = 0,77</math></p>	26	 <p><math>D/D_{сф} = 0,867</math></p>
27,5	 <p><math>D/D_{сф} = 0,895</math></p>	29	 <p><math>D/D_{сф} = 0,917</math></p>
32	 <p><math>D/D_{сф} = 0,978</math></p>		

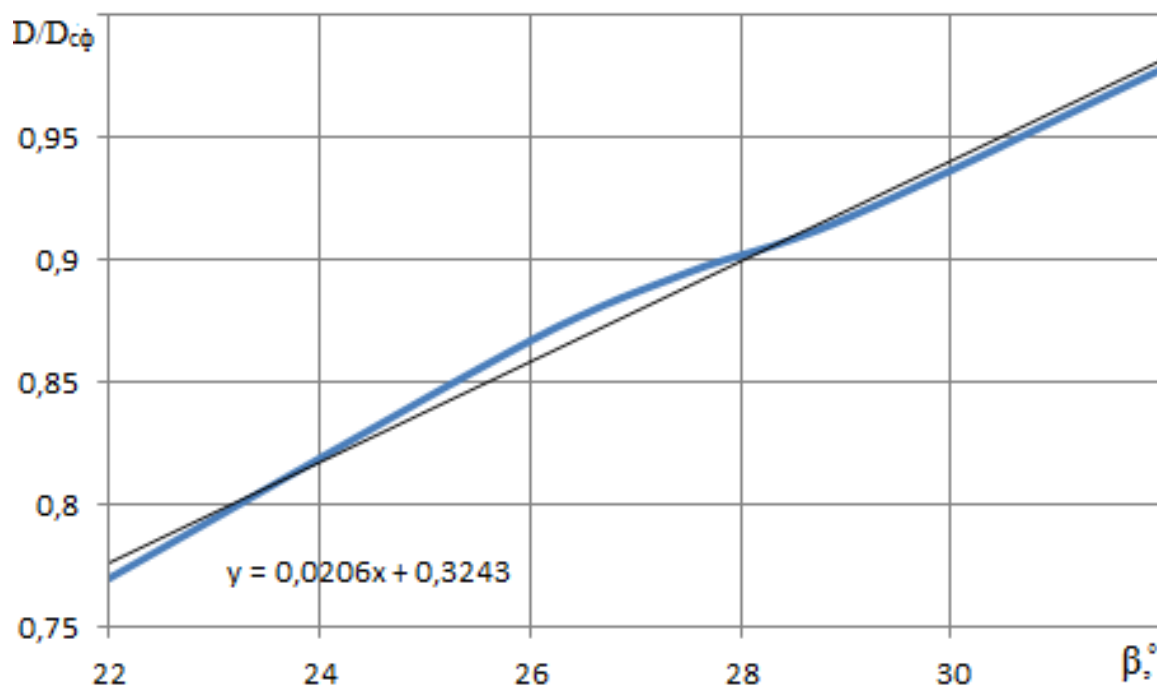


Рисунок 3.17 – Графік залежності одержуваного проміжного зовнішнього діаметра  $D/D_{сф}$  від кута конусності зливка  $\beta$

Встановлено закономірність змінення зовнішнього діаметра конусної заготовки ( $D/D_{сф}$ ) від кута конусності вихідного зливка  $\beta$  при роздачі конусною плитою, яка дозволяє визначати кут конусності вихідного зливка перед роздачею конусною плитою, що дозволить виготовляти днища з мінімальними припусками на механічну обробку.

### 3.5 Верифікація та удосконалення та процесу роздачі днищ

За результатами моделювання був запропонований новий технологічний процес отримання днищ із попередньою роздачею пустотілої заготовки конусною плитою з остаточною роздачею сферичною плитою.

У процесі попереднього моделювання було використано різні конфігурації заготовки. Варіювання параметрів кування тривало до тих пір, поки не

вийшла поковка без дефектів форми (відсутність складок і потоншення стінки у верхній частині поковки).

У першій схемі використовувався пустотілий злиток отриманий на підставі даних моделювання в програмі QForm 2D. Ескіз зливка представлений рисунком 3.18.

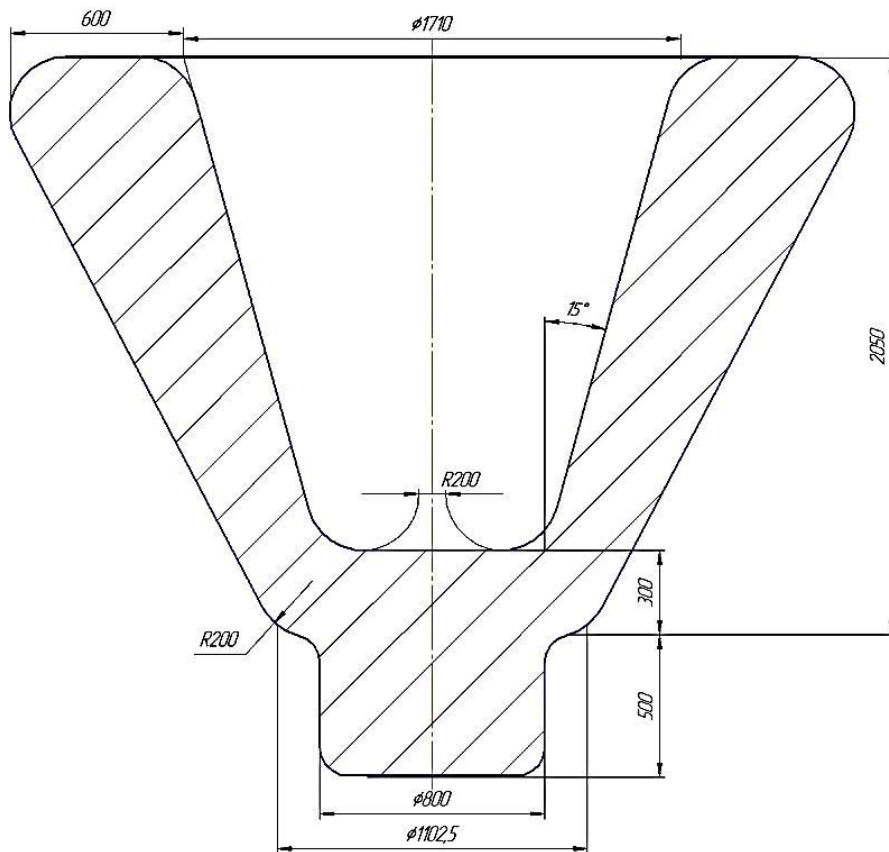


Рисунок 3.18 – Ескіз зливка до роздачі конусною плитою отримана на підставі результатів моделювання QForm 2D

Як інструмент для моделювання було використано нижню сферичну плиту з отвором під цапфу (рис. 3.19), конусний бойок для роздачі заготовки (рис. 3.20) та сферичну плиту (рис. 3.21).

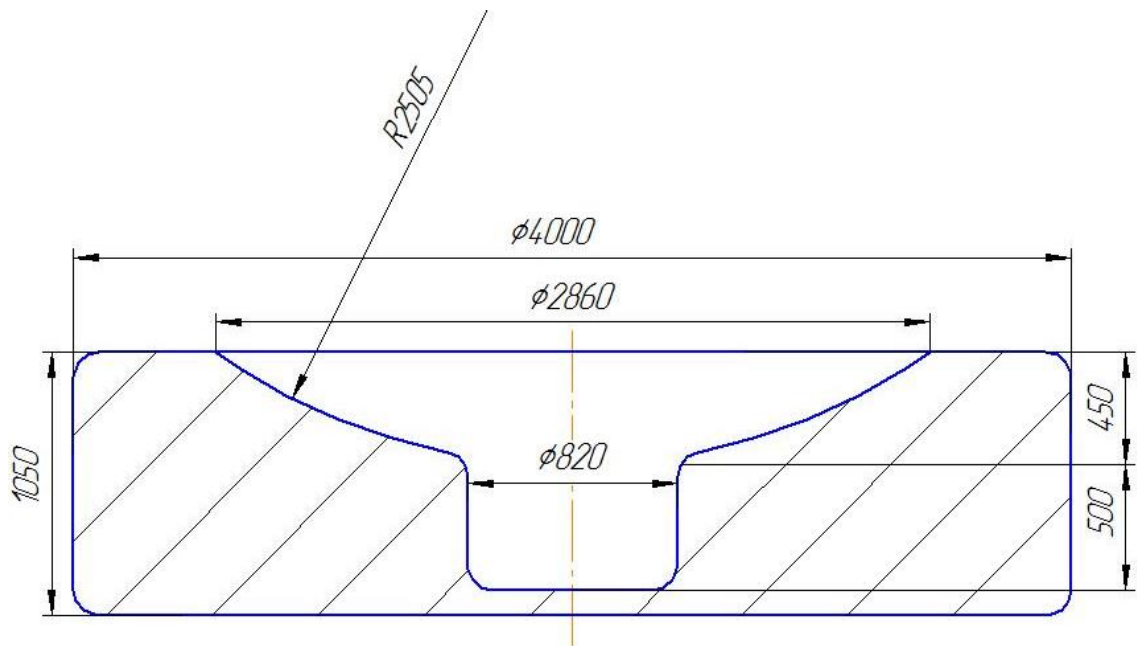


Рисунок 3.19 – Ескіз нижньої плити для схеми №1

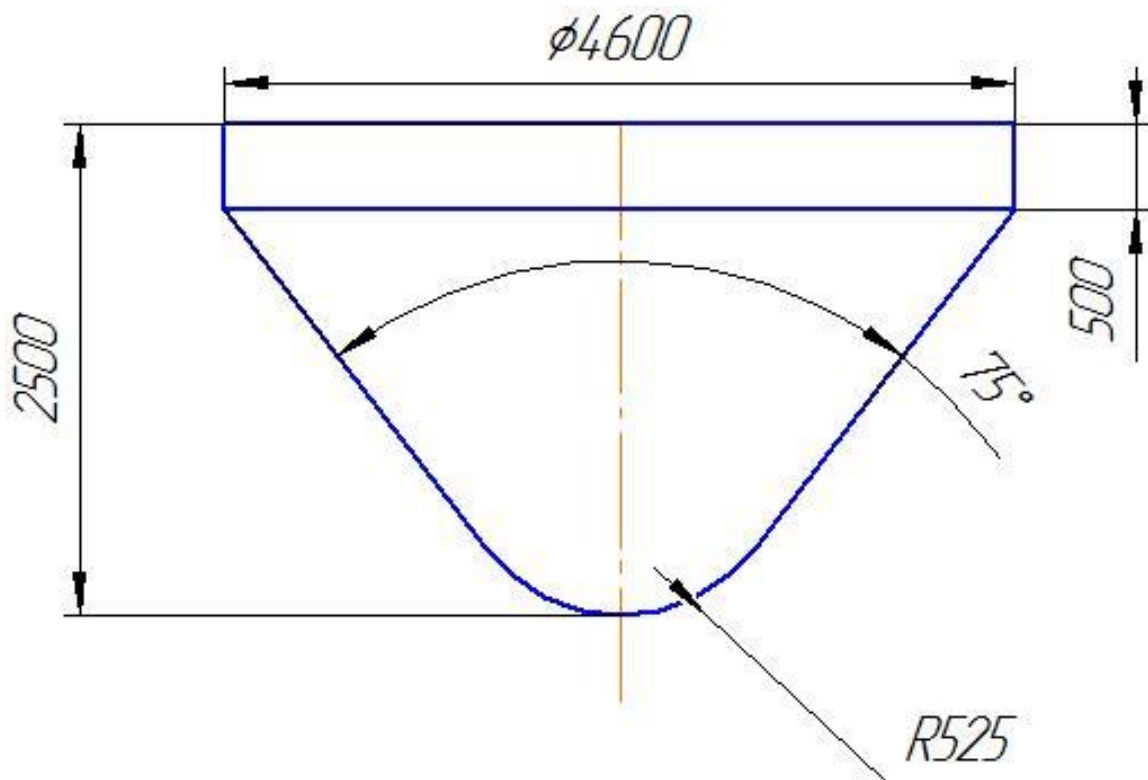


Рисунок 3.20 – Ескіз конусної плити

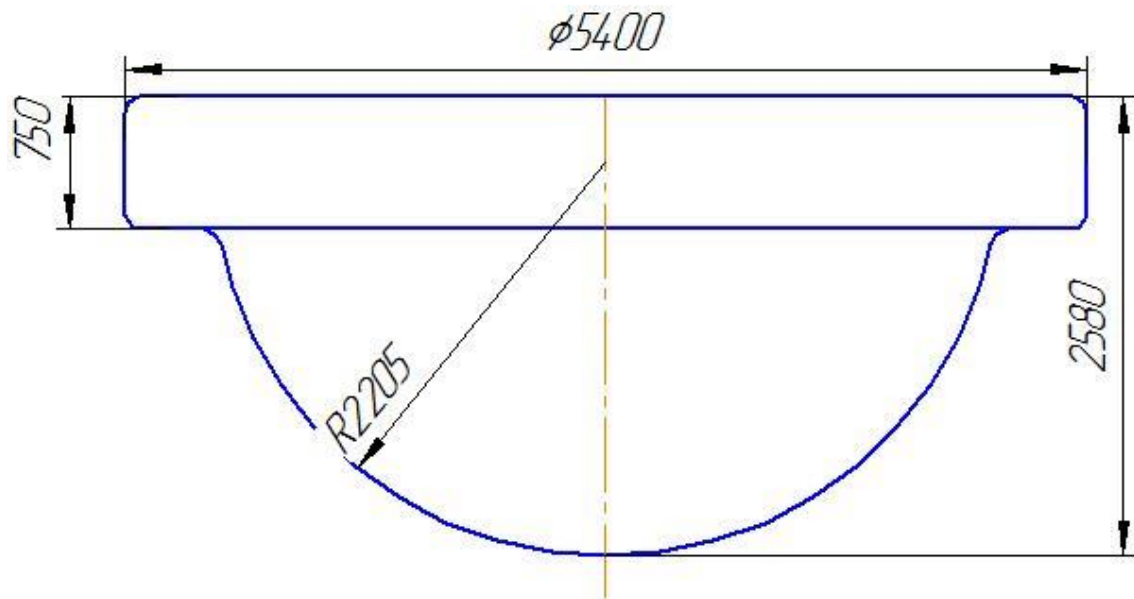
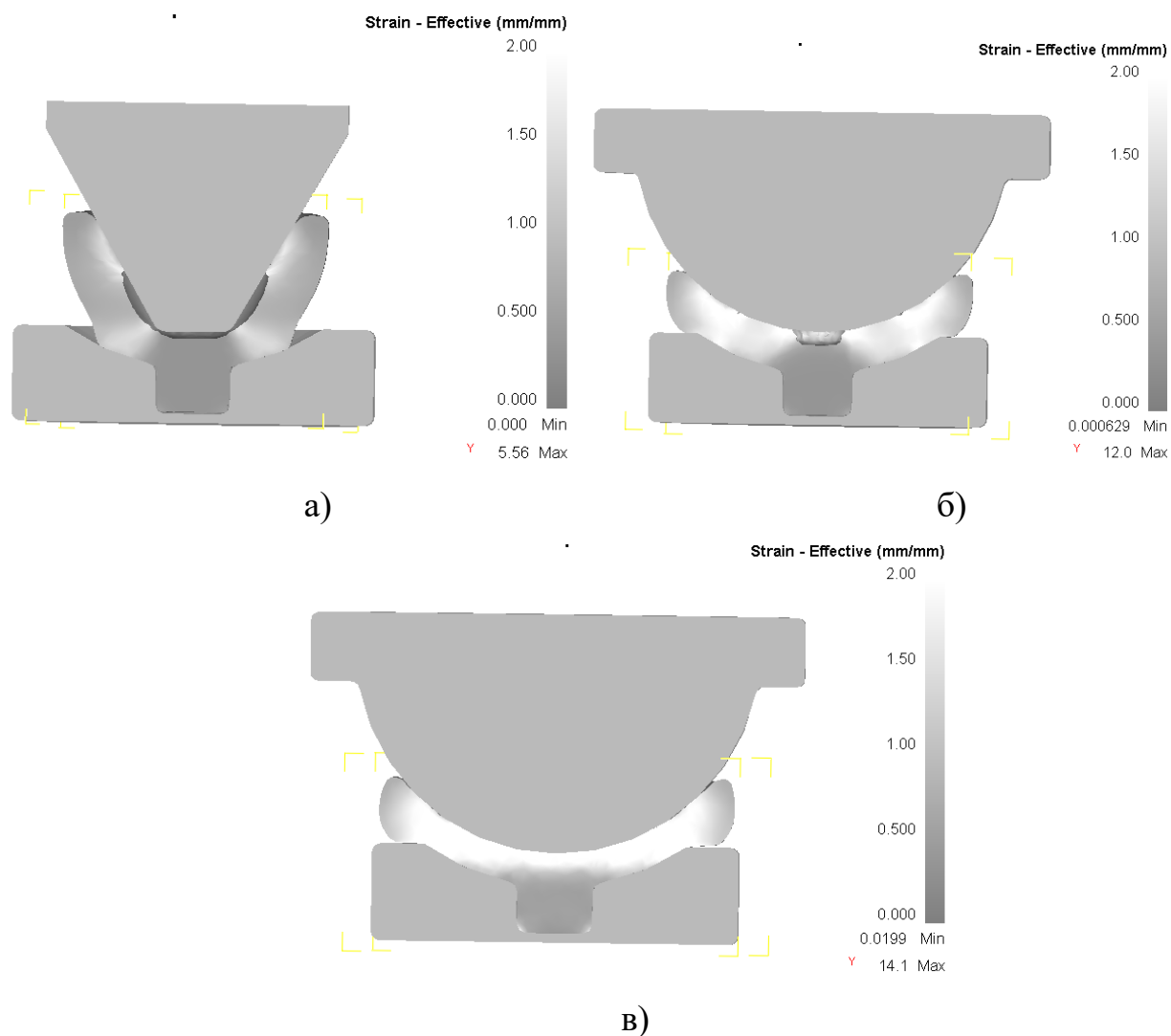


Рисунок 3.21 – Ескіз сферичної цільної плити

В результаті моделювання процесу роздачі запропонованим інструментом були отримані результати формозміни та НДС, представлені на рисунку 3.22.

Результати деформованого стану в процесі роздачі заготовки конусним та сферичним інструментом дозволили встановити характерні для даної схеми дефекти. Так при роздачі конусної плитою (рис. 3.22, а) в стінці поковки утворюється затиски, а на проміжній стадії роздачі сферою (рис.3.22, б) в донній частині поглиблення, яке при подальшій деформації також призводить до затиску в донній частині сфери. На скінченій стадії роздачі (рис. 3.22, в) була отримана поковка зі збільшеною товщиною стінки у верхній частині через малу висоту стінки плити.



а – роздача конусною плитою; б – роздача сферичною плитою (проміжна стадія); в – роздача сферичною плитою (остаточна стадія)

Рисунок 3.22 – Формозміна заготовки під час роздачі

У зв'язку з вищезазначеними дефектами було запропоновано збільшити висоту плити та використовувати сферичну та конусну плити з хрестоподібними виступами, зі змінною товщиною деформуючих виступів (рис. 3.23) та зменшити величину обтиснення на останніх етапах моделювання до 50 мм.



Рисунок 3.23 – Ескіз сферичної (а) та конусної (б) плити з вирізами змінної ширини

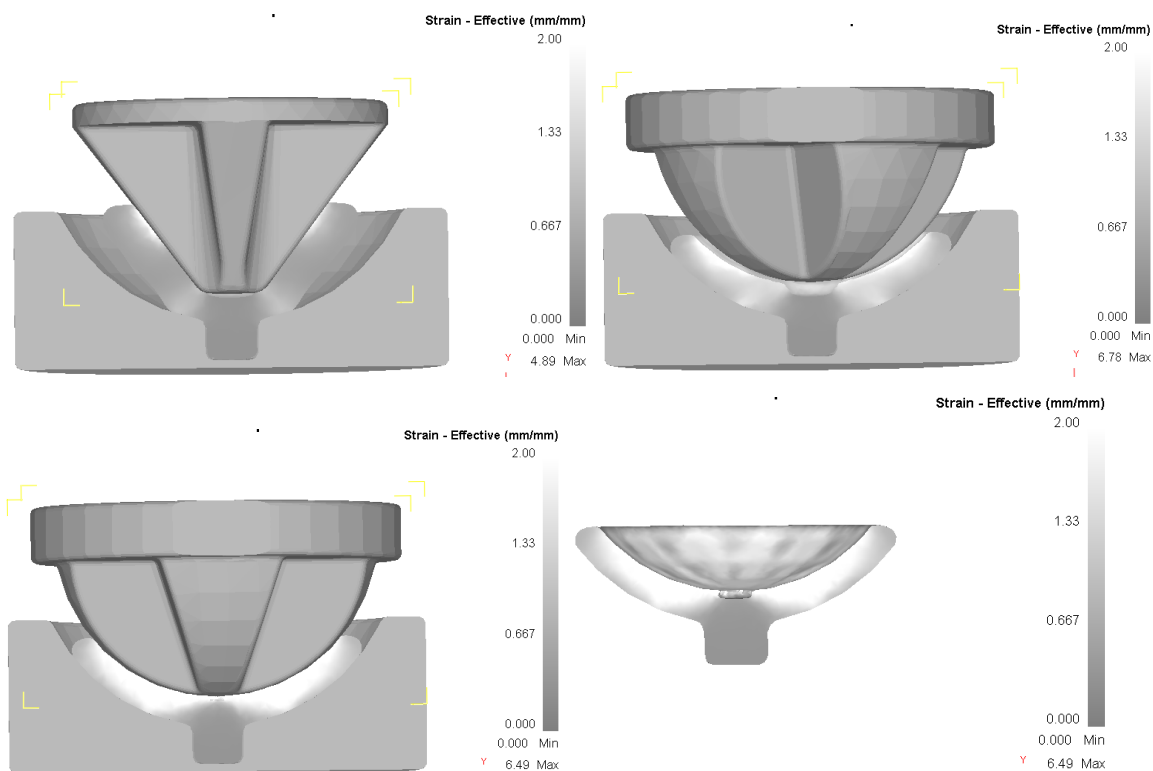
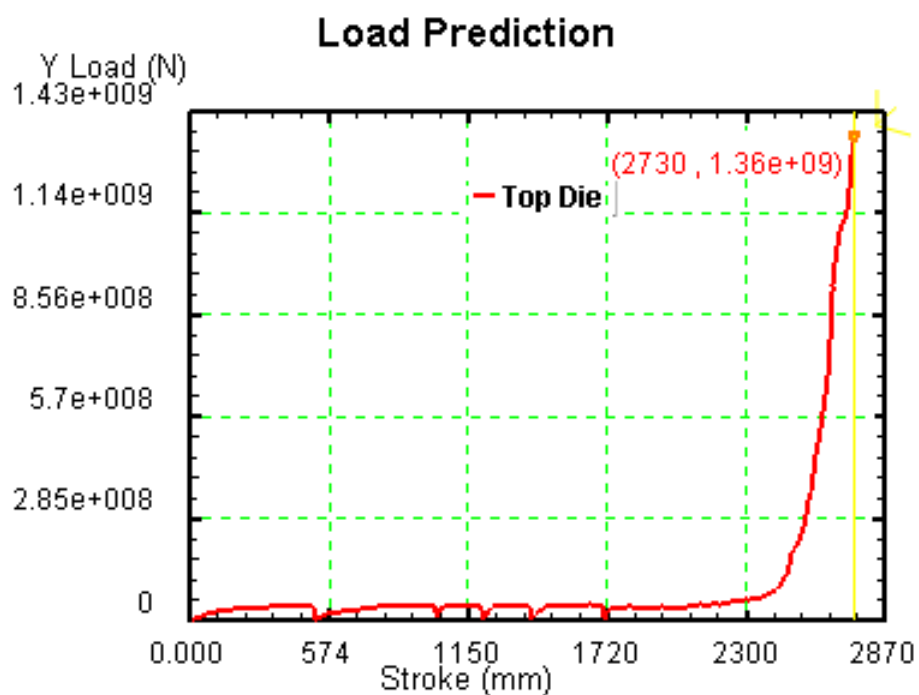


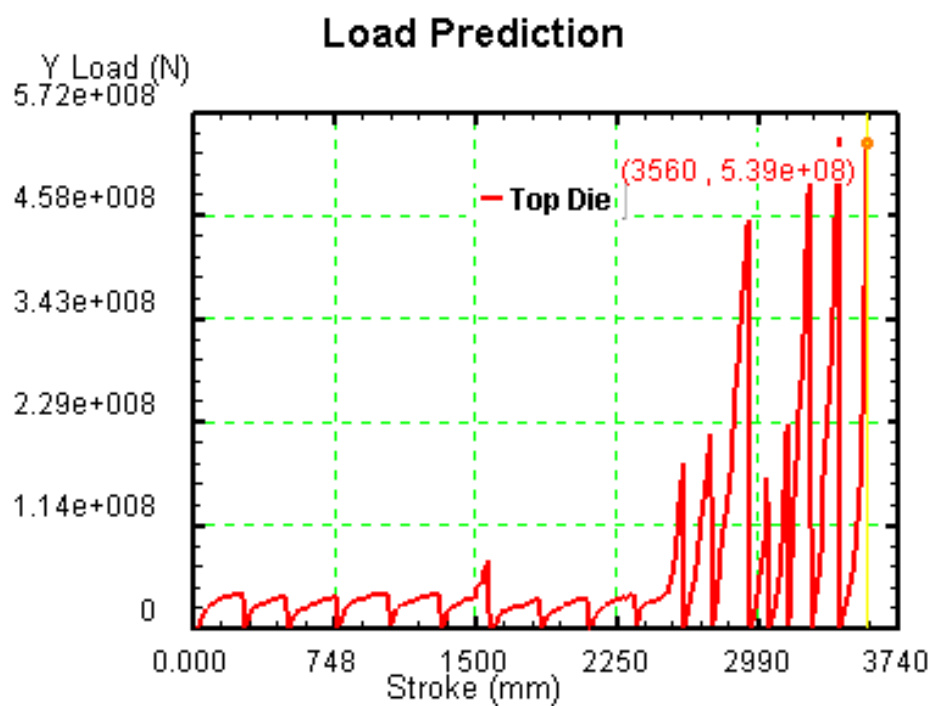
Рисунок 3.24 – Формозміна при роздачі конусної та сферичної плити з вирізами змінної ширини

Однак запропоновані рекомендації не дозволили виключити утворення поглиблення в нижній частині (рис. 3.24). Наявність вирізів дозволило знизити зусилля роздачі (рис. 3.25) порівняно з роздачею суцільною плитою. Порівняння зусилля роздачі цільними та вирізними бойками представлені рисунку 3.25.

Для запобігання утворенню дефекту в донній частині сфери було запропоновано використовувати спеціальний інструмент із увігнутістю в донній частині (рис. 3.26). Радіус увігнутості вирізу відповідає внутрішньому діаметру поковки, при якому почався утворюватися дефект. Передбачалося, що ця увігнутість повинна компенсувати утяжину, що утворюється у процесі кування.



a)



б)

Рисунок 3.25 – Графіки залежності зусилля деформування від переміщення для суцільної сферичної плити (а) та для сферичної плити з вирізами (б)

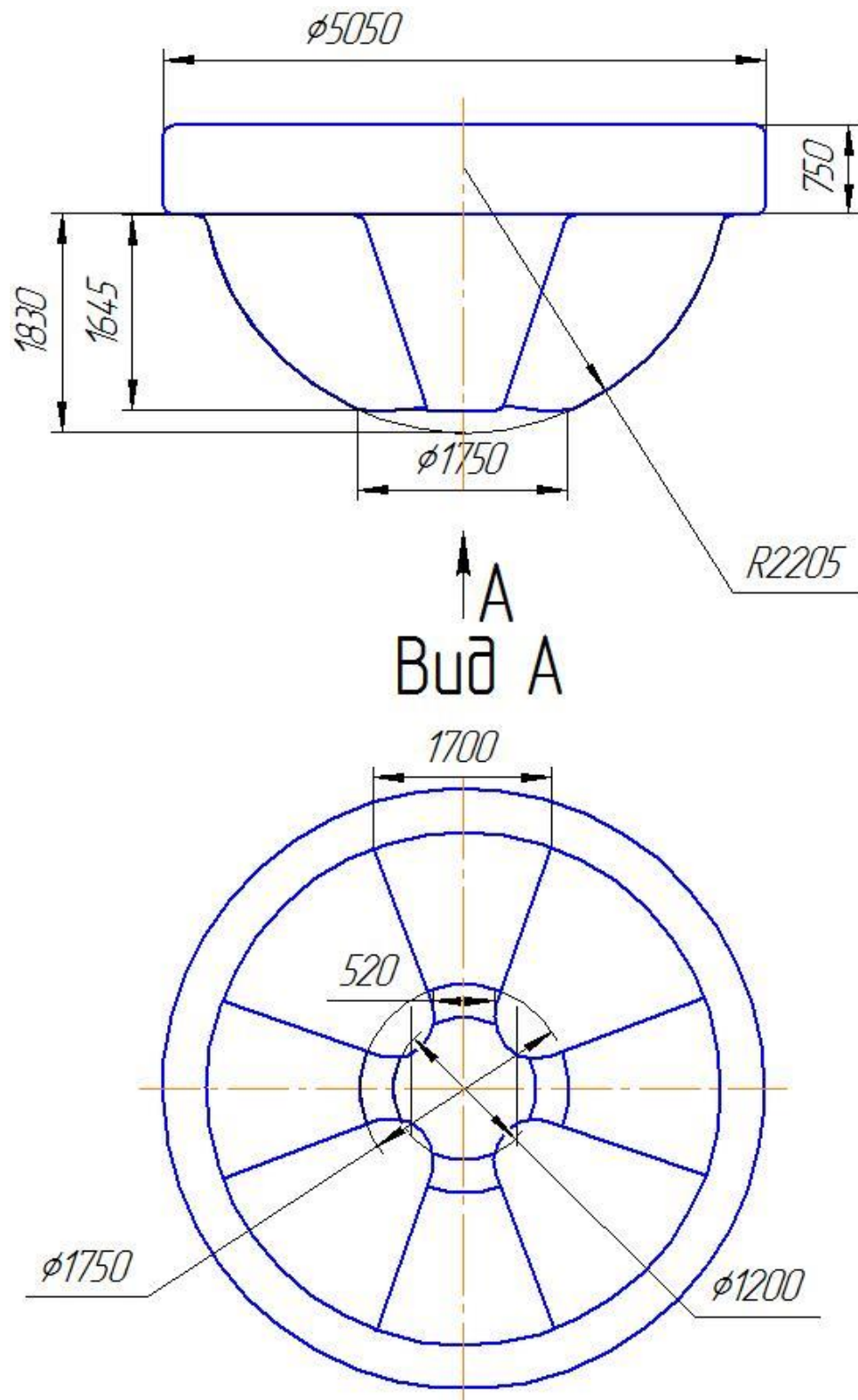
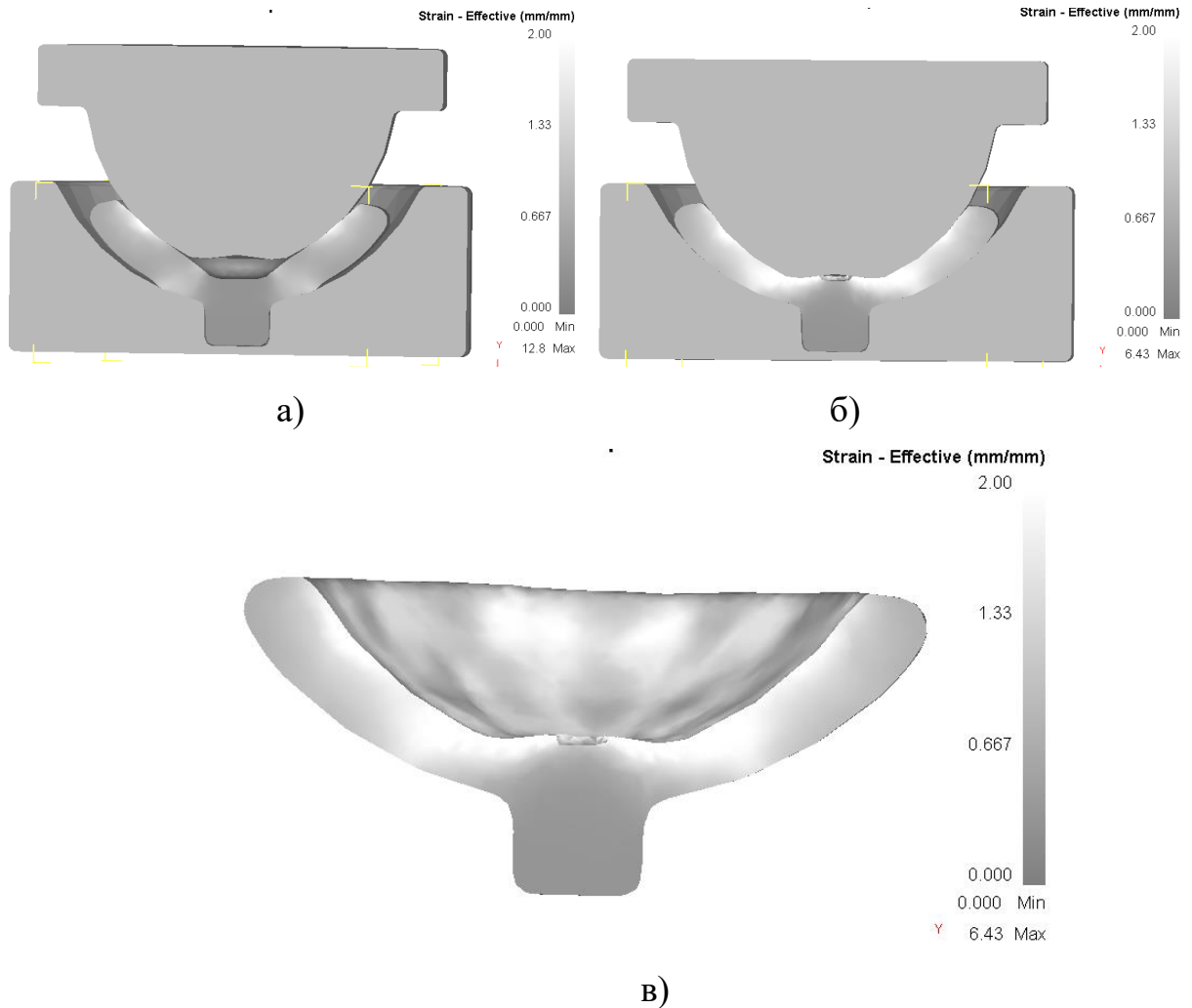


Рисунок 3.26 – Ескіз сферичної плити з вирізом змінної товщини з увігнутістю нижньої частини

Результати моделювання дозволили встановити, що при використанні даного інструменту утяжина зменшується в порівнянні з попередньою схемою, проте повністю виключити її утворення не вдалося (рис. 3.27).



а – проміжна стадія; б – остаточна стадія; в - одержувана поковка.

Рисунок 3.27 – Формозміна в процесі роздачі сферичною плитою з вирізами з увігнутістю нижньої частини

Попередні результати дозволили встановити, що утворення утяжини пояснюється напливом металу з боку стінки при завершальних проходах за рахунок потовщення стінки в нижній частині при роздачі сферичною плитою. Це потовщення викликано малою товщиною стінки в нижній частині заготовки. Усунути цей недолік можна за рахунок збільшення товщини стінки

порожнистої заготовки в нижній частині. Однак збільшення товщини стінки в нижній частині може призвести до зменшення товщини стінки у верхній частині заготовки (при постійній висоті) із закону сталості об'ємів. Тому було прийняте рішення змінити напружений стан нижньої частини заготовки за рахунок заміни плоского дна, сферичним дном, збільшеною товщиною  $t$  (рис. 3.28).

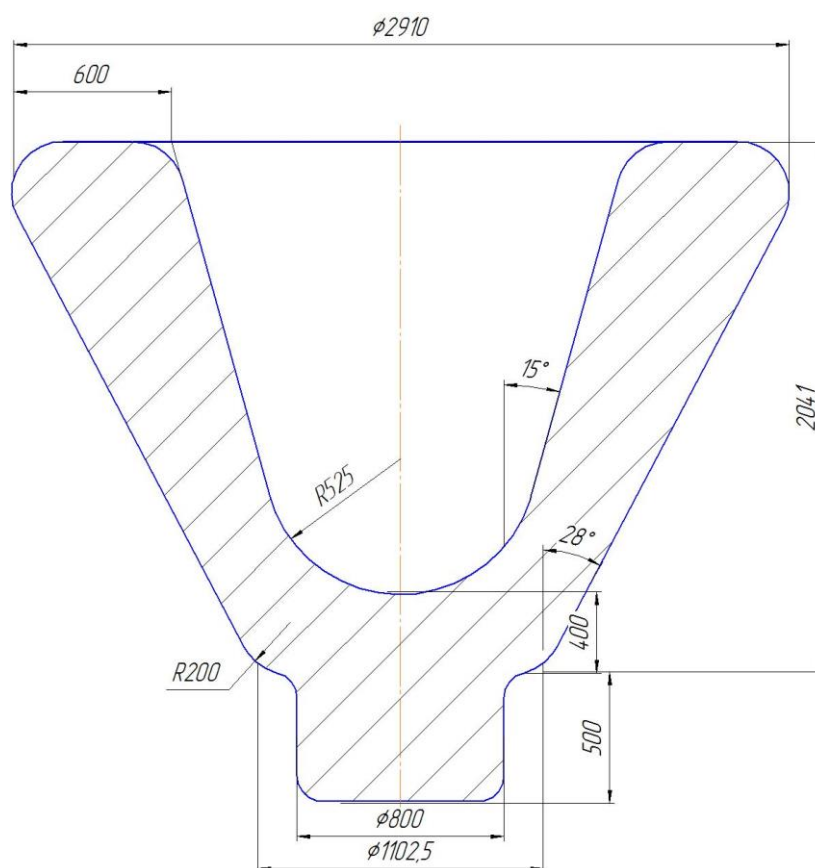


Рисунок 3.28 – Ескіз зливка зі сферичним дном збільшеної товщини

Роздача заготовки запропонованої нової конфігурації дозволяє унеможливити утворення утяжини в нижній частині днища (рис. 3.29). Отримані результати підтверджують припущення про підвищення жорсткості стінки в нижній частині порожнистої заготовки за рахунок застосування сферичного дна. Запропонована заготовка для роздачі конусною та сферичною вирізними

плитами дозволяє рекомендувати її як можливу для отримання бездефектної ПОКОВКИ.

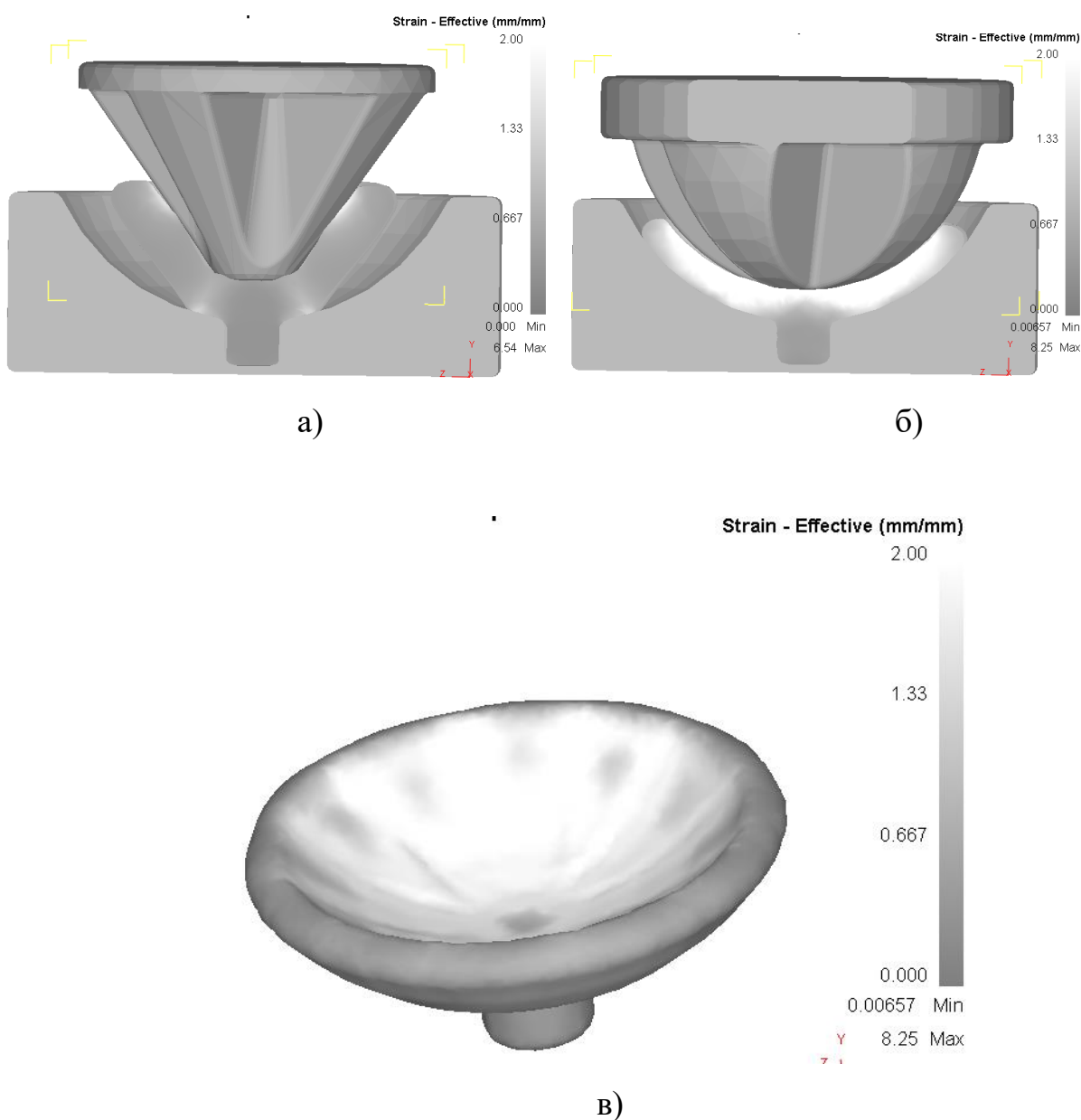


Рисунок 3.29 – Формозміна при роздачі конусною (а) та сферичною плитами (б) зливка зі сферичним дном, одержувана заготовка (в).

Порівняльний аналіз трьох способів роздачі представлено на рисунку 3.30.

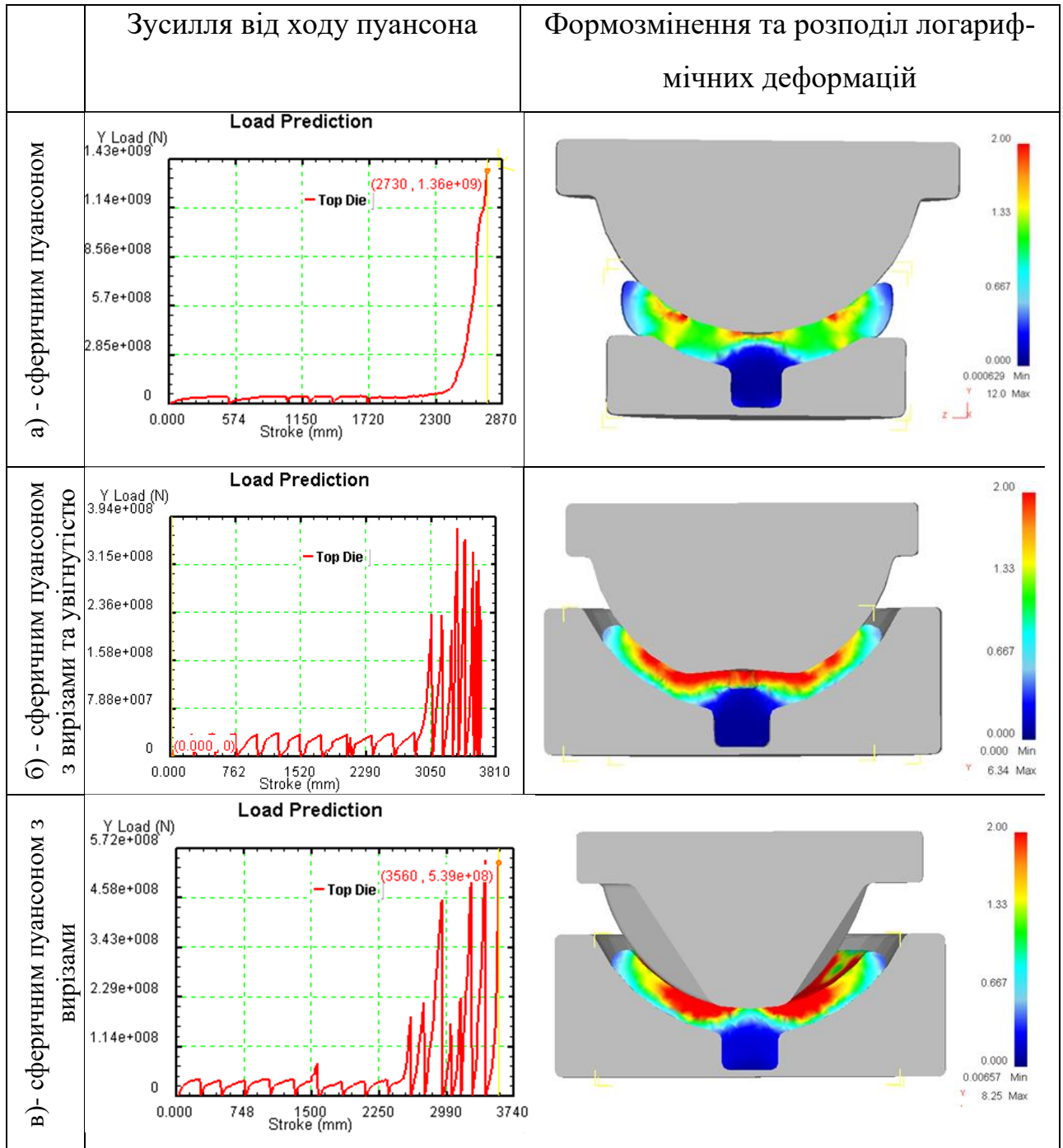


Рисунок 3.30 – Порівняння різних способів роздачі: а - сферичним бойком; б - сферичним бойком з вирізами та увігнутістю; в - сферичним бойком з вирізами

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що мінімальну нерівномірність розподілу деформацій і зусилля деформування забезпечують способи деформування вирізним бойком з увігнутістю.

### Висновки до 3 розділу

1. Було встановлено, що базовий технологічний процес штампування днищ по технології ПАТ «Енергомашспецсталь» призводить до значної різновтовщинності стінки, а також викривленню форми поковки, що потребує призначення додаткових припусків, а відповідно це призводить до збільшення витрат металу.

2. Встановлено, що відносна висота заготовки незначно впливає на різновтовщинність поковки. Зі збільшенням відносного внутрішнього діаметра отвору заготовки різновтовщинність зменшується особливо для високих заготовок. Мінімальну можливу різновтовщинність можна отримати в діапазоні 0,2...0,3.

3. Було встановлено, що на мінімальне потоншення у верхній частині днища при роздачі переважний вплив має фактор  $D_{отв}/D_{сф}$ , (в рівнянні регресії цьому фактору та його взаємодії відповідає максимальний коефіцієнт). Встановлено, що при максимальному діаметрі отвору у верхній частині заготовки і мінімальному зовнішньому діаметрі, різновтовщинність приймає негативне значення, що свідчить про зменшення товщини стінки менше номінального значення, що призведе до браку. Мінімальні значення різновтовщинності спостерігаються при максимальних співвідношеннях  $D_{отв}/D_{сф} = 0,7$  і  $D/D_{сф} < 0,85$ .

4. Задля забезпечення заданої товщини стінки поковки після роздачі конусної заготовки сферичною плитою ефективними виявилися такі геометричні параметри вихідної конусної заготовки:  $\frac{D_{отв}}{D_{сф}} = 0,7$ ;  $\frac{H}{D_{сф}} = 0,4 \dots 0,55$ ;  $\frac{D}{D_{сф}} = 0,85 \dots 0,9$ . Розміри вихідної заготовки в цих діапазонах можна використовувати як рекомендації для розробки нового технологічного процесу штампування днищ сферичною плитою.

5. Нижні діаметри заготовки ( $d_{отв}/D_{сф}$  і  $d/D_{сф}$ ) не впливають на формозміну заготовки при роздачі, тому прийняті не значущими, що

підтверджується коефіцієнтом рівняння регресії (3.1). Для попередження утворення складок рекомендується прийняти у діапазоні  $d_{\text{отв}} / D_{\text{сф}} = 0 \dots 0,2$ .

6. Розроблена номограма для визначення зовнішнього діаметра заготовки після роздачі конусною плитою ( $D/D_{\text{сф}}$ ) через відносну товщину днища ( $S_{\text{к}}/D_{\text{сф}}$ ) та відносний внутрішній діаметр заготовки ( $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ ).

7. Встановлено закономірність змінення зовнішнього діаметра конусної заготовки ( $D/D_{\text{сф}}$ ) від кута конусності вихідного зливка  $\beta$  при роздачі конусною плитою, яка дозволяє визначати кут конусності вихідного зливка перед роздачею конусною плитою, що дозволить виготовляти днища з мінімальними припусками на механічну обробку.

8. Встановлено оптимальну геометрію заготовки після роздачі конусної плитою, на підставі якої визначено раціональну геометрію зливка до роздачі конусною плитою. Ці параметри відповідають:  $d_{\text{отв}} / D = 0,2$ ;  $d / D = 0,25$ ;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\beta = 28^\circ$ .

9. Порівняльний аналіз розглянутих способів роздачі дозволив встановити, що мінімальну нерівномірність розподілу деформацій і зусилля деформування забезпечують спосіб деформування вирізним бойком з увігнутістю.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДАЧІ ДНИЩА КОНУСНИМ ТА СФЕРИЧНИМ ПУАНСОНАМИ

Результати моделювання МСЕ процесу роздачі днищ було перевірено експериментальними дослідженнями на свинцевих моделях. Методика проведення експерименту розглянуто у п. 2.3.

Завданням експериментального дослідження було підтвердити або спростувати отримані раніше дані формозміни заготовки при роздачі днищ, які отримані скінчено-елементним моделюванням. У розділі перевіряється можливість отримання днищ роздачою конусною та сферичною плитами. Варіювалася також геометрія заготовки, а саме досліджувався процес роздачі заготовки з циліндричним пояском у нижній частині для встановлення впливу цього пояса на зниження зусилля роздачі.

Теоретичне дослідження методами МСЕ з використанням плану Хартлі дозволило дати уявлення про оптимальну геометрію заготовки для роздачі та раціональну форму інструменту. За цих даних було проведено експериментальне дослідження на свинцевих зразках. Результуючими параметрами були формозміна у процесі роздачі, різновтовщинність та зусилля деформування.

#### **4.1 Роздача конусної пустотілої заготовки сферичним пуансоном**

Моделювання проводилося на свинцевих зразках. В якості заготовки було обрано заготовку тип 1 (рис. 2.4, а), отриману у виливниці (рис. 2.3, а). Роздача проводилася сферичним бойком, як показано на рисунку 4.1. Отримана заготовка після роздачі показана рисунку 4.2. У ході проведення

експерименту виконувалися виміри розмірів заготовки (рис.4.5 б). Розміри отриманої поковки представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розміри заготовки після роздачі сферичною плитою

$H_{сф}$ , мм	$S_k$ , мм	$d_{сф}$ , мм	$D_{зв.сф}$ , мм	$h_{сф}$ , мм
23,5	5	60,5	70,5	16



Рисунок 4.1 – Оснащення для процесу роздачі конусною та сферичною плитами

В результаті експериментального дослідження було отримано заготовку з тонкою стінкою і не повністю сформованою зовнішньою поверхнею. У внутрішній частині заготовки утворюється дефект – складка, що підтверджує результати моделювання у програмі DEFORM. Порівняння результатів теоретичного та експериментального моделювання представлено на рисунку 4.3.

Отримані результати свідчать про неефективність цієї схеми роздачі. Утворення складки на внутрішній поверхні заготовки пояснюється малим діаметром отвору вихідної конусної глухонної заготовки (рис. 2.4, а) по відношенню до діаметра сферичної плити. У цьому випадку відбувалось осадження заготовки, а не її роздача, що призвело до утворення внутрішньої складки (рис. 4.2, б).



а)

б)



в)

Рисунок 4.2 – Початкова заготовка до роздачі сферичною плитою (а), поковка після роздачі (б) та вид зверху (в)

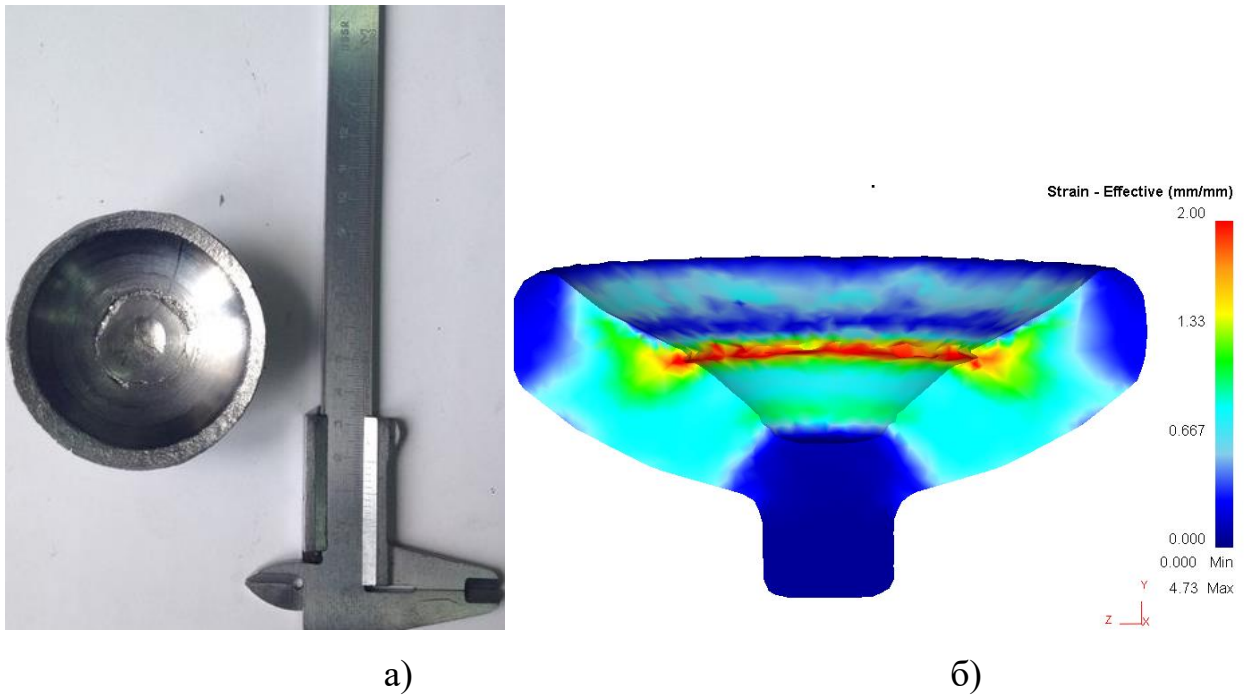


Рисунок 4.3 – Порівняння результатів утворення складки експериментального (а) та теоретичного (б) досліджень

#### 4.2. Роздача конусної порожнистої заготовки з циліндричним паском

Процес роздачі при куванні днищ за новою технологією закінчується доштампуванням для формування необхідної геометрії поковки. При цьому доштампуванні зростає площа контакту заготовки з інструментом, що призводить до значного зростання зусилля деформування. Зниження зусилля деформування можна забезпечити рахунок зменшення площі контакту заготовки з інструментом при отриманні необхідних розмірів поковки. Для цього в спосіб було запропоновано призначити циліндричний поясок у нижній частині заготовки. Запропоноване рішення дозволить зменшити площу контакту заготовки з інструментом за рахунок збільшення товщини дна при призначенні

циліндричного пояса в нижній частині заготовки та утворення зазору з між заготовкою та інструментом (рис. 4.4).

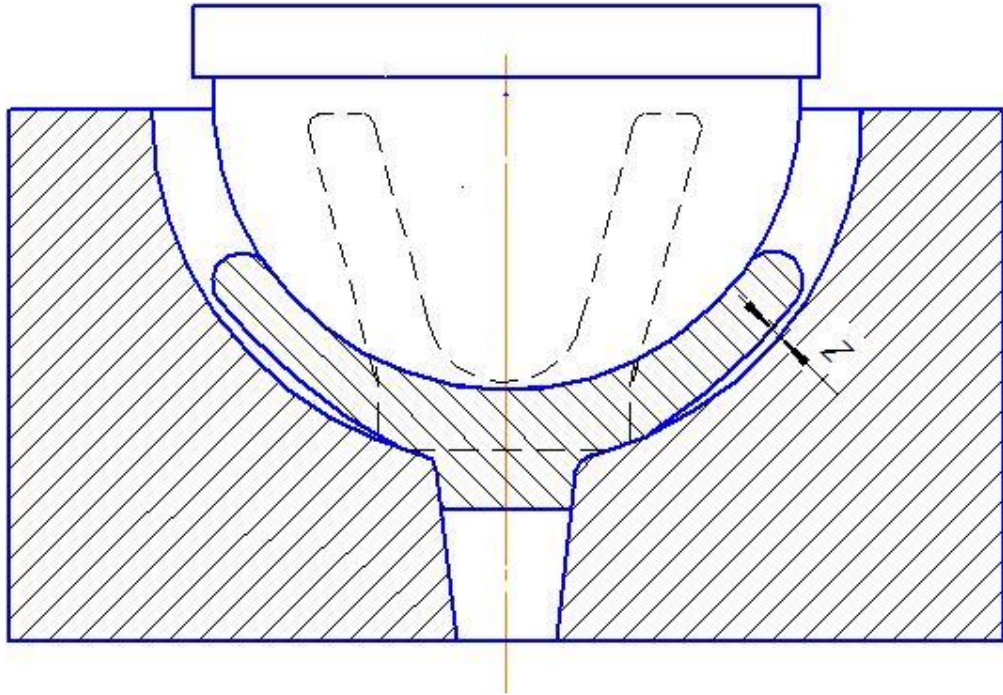


Рисунок 4.4 – Схема роздачі заготовки із циліндричним паском

Експериментальні дослідження проводилися за схемою 2 типу (рис. 2.4, б). Роздача проводилася конусною, а далі сферичною плитою. Заготовки до і після роздачі представлені рисунку 4.5. Розміри одержуваної заготовки представлені у таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Розміри заготовки з циліндричним паском після роздачі конусною та сферичною плитами

Розміри після роздачі конусною плитою					
H, мм	D, мм	D <sub>отв</sub> , мм	d, мм	d <sub>отв</sub> , мм	h, мм
32	59	44	31,5	22	25
Розміри після роздачі сферичною плитою					
H <sub>сф</sub> , мм	S <sub>к</sub> , мм	d <sub>сф</sub> , мм	D <sub>н.сф</sub> , мм	h <sub>сф</sub> , мм	
21,5	6,5	63,5	76,5	15	



Рисунок 4.5 – Заготовки (а), після роздачі конусною плитою (б), після роздачі сферичною плитою (в, г)

В результаті експерименту було відзначено зменшення площі контакту заготовки з нижньою плитою, а відповідно не остаточне формування зовнішньої поверхні. Також частина металу затікає в отвір нижньої плити, що необхідно враховувати у процесі розрахунку об'єму заготовки.

### 4.3 Роздача конусної пустотілої заготовки конусним та сферичним пуансонами

Виключити складкоутворення при роздачі порожнистої заготовки сферичною плитою можна рахунок застосування попередньої роздачі її конусною плитою. Роздача конусною плитою дозволяє збільшити діаметр отвору вихідної пустотілої заготовки та поступово наблизити форму заготовки до форми днища (рис. 4.6). Завдання цього дослідження є перевірка цієї гіпотези.

Деформування проводилось за схемою (рис. 2.5). Було проведено 3 експерименти з однаковими розмірами вихідної заготовки для підтвердження результатів теоретичних досліджень. В результаті роздачі конусною плитою заготовки (тип 1) була отримана пустотіла заготовка (рис. 4.7 а). Після деформування сферичною плитою заготовки після роздачі конусною плитою, було отримано поковку днища (рис. 4.7, б). Дана поковка має гладку поверхню, розміри поковки (табл. 4.3) відповідають необхідним розмірам креслення (рис. 4.6).

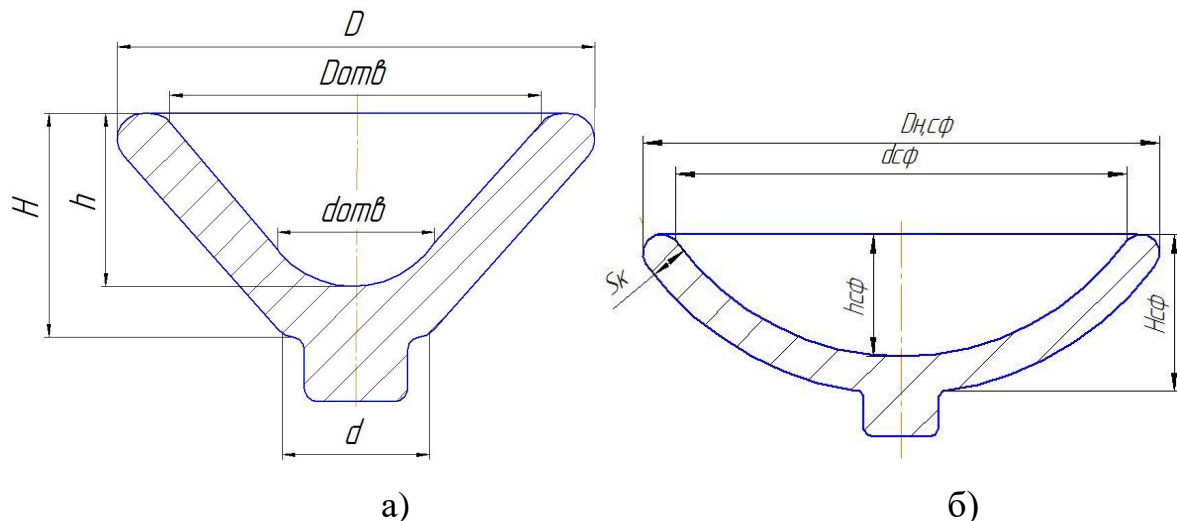


Рисунок 4.6 – Загальний ескіз заготовки після роздачі конусною (а) та сферичною (б) плитами

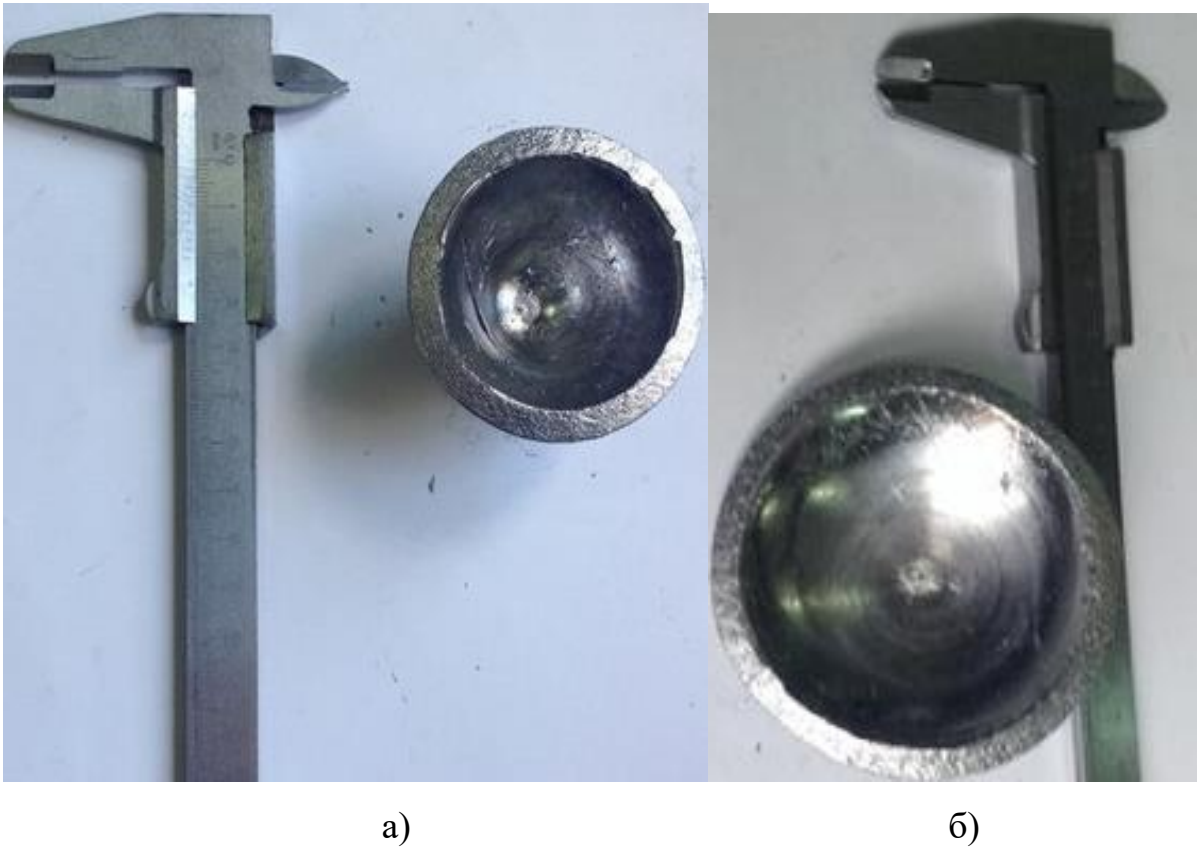


Рисунок 4.7 – Заготовка після роздачі конусною (а) та сферичною (б) плитами

Таблиця 4.3 – Розміри заготовки після роздачі конусною та сферичною плитами

Розміри заготовки після роздачі конусною плитою						
№	H, мм	D, мм	D <sub>отв</sub> , мм	d, мм	d <sub>отв</sub> , мм	h, мм
1	32	69	48	27	24	24
2	31,5	68,5	48	27	24,5	25
3	32	69	48,5	27,5	25	25,5
Розміри заготовок після роздачі сферичною плитою						
№	H <sub>сф</sub> , мм	S <sub>к</sub> , мм	d <sub>сф</sub> , мм	D <sub>н.сф</sub> , мм	h <sub>сф</sub> , мм	
1	21	8,5	61	76	14	
2	21	8,5	60	75,8	13,5	
3	21,5	8,5	60,5	76	14	

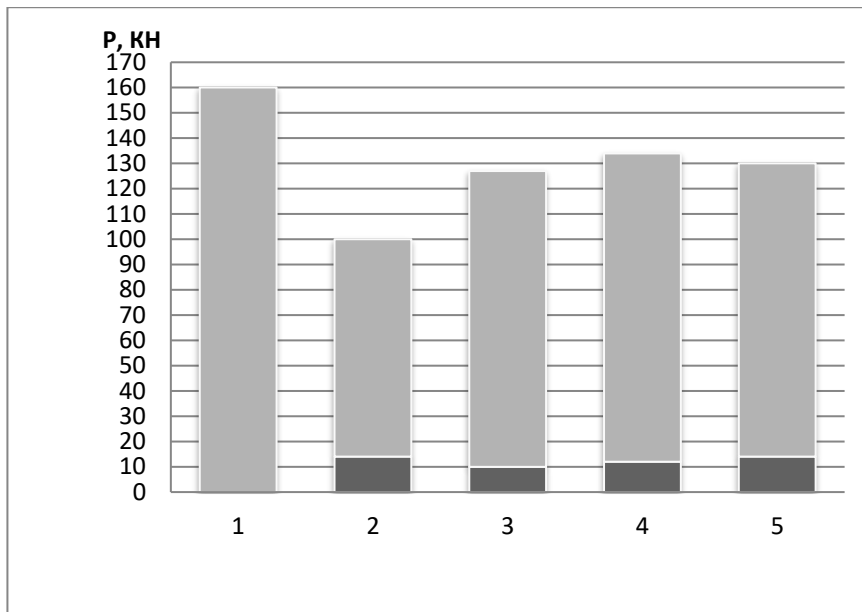
#### 4.4 Порівняння силових параметрів процесу роздачі

Зусилля деформування один із найважливіших чинників під час проектування технологічного процесу кування. У ході експерименту фіксувалися показники зусилля на різних стадіях деформування. Була побудована гістограма (рис. 4.8), що відображає зміну зусилля в залежності від способу роздачі. Також в одному з експериментів відстежувалася зміна зусилля, залежно від товщини стінки. Заготовка типу 1 піддавалася подальшому деформуванню до товщини стінки 6,5 мм.

Показники зусилля фіксувалися через кожні 1 мм ходу. Значення зусиль та розміри отриманої заготовки представлені у таблиці 4.4. Графік залежності зусилля деформування від товщини стінки представлений рисунком 4.10. Зі зменшенням товщини стінки зусилля зростає, це пов'язано зі збільшенням площі контакту інструменту із заготовкою, а відповідно зі збільшенням сил тертя та зменшенням товщини стінки заготовки.

Таблиця 4.4 – Розміри заготовки після роздачі конусною та сферичною плитами залежно від товщини стінки

Розміри після роздачі сферичною плитою						
№	$H_{сф}$ , мм	$S_k$ , мм	$d_{сф}$ , мм	$D_{н.сф}$ , мм	$h_{сф}$ , мм	$P$ , КН
1	21,5	8,5	60,5	77,5	14	130
2	21,5	7,5	66	81	15,5	280
3	22	6,5	71	84	17,5	320



■ - роздача конусною плитою; □ - роздача сферичною плитою;

1 - роздача сферичним бойком заготовки (тип 1); 2 – роздача конусною та сферичною плитами заготовки (тип 2); 3; 4; 5 – роздача конусною та сферичною плитами заготовки (тип 1)

Рисунок 4.8 – Гістограма розподілу зусилля залежно від способу роздачі та форми заготовки

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що в 1 експерименті зусилля має максимальне значення. Це пояснюється тим, що відсутня роздача конусною плитою, а деформація відбувається частково з осадженням заготовки. У другому досліді зусилля роздачі сферичною плитою набуває мінімальне значення, а конусної – максимальне, це пов'язано з тим, що операція роздачі сферичною плитою була розвантажена роздачею конусної плитою. Наявність циліндричного пояса призводить до того, що заготовка контактує з інструментом не по всій поверхні, а відповідно зменшуються сили тертя, також у цьому експерименті метал затікає в отвір нижньої плити, що утворює ще один ступінь свободи течії металу та знижує зусилля. У 3, 4 і 5 експерименті при однаковому способі роздачі конусної та сферичної плитою значення зусиль деформування можна порівняти з відхиленням 7...9%.

Отримані поковки після штампування представлені на рисунку 4.9.



Рисунок 4.9 – Поковки відштамповані конусною та сферичною плитами

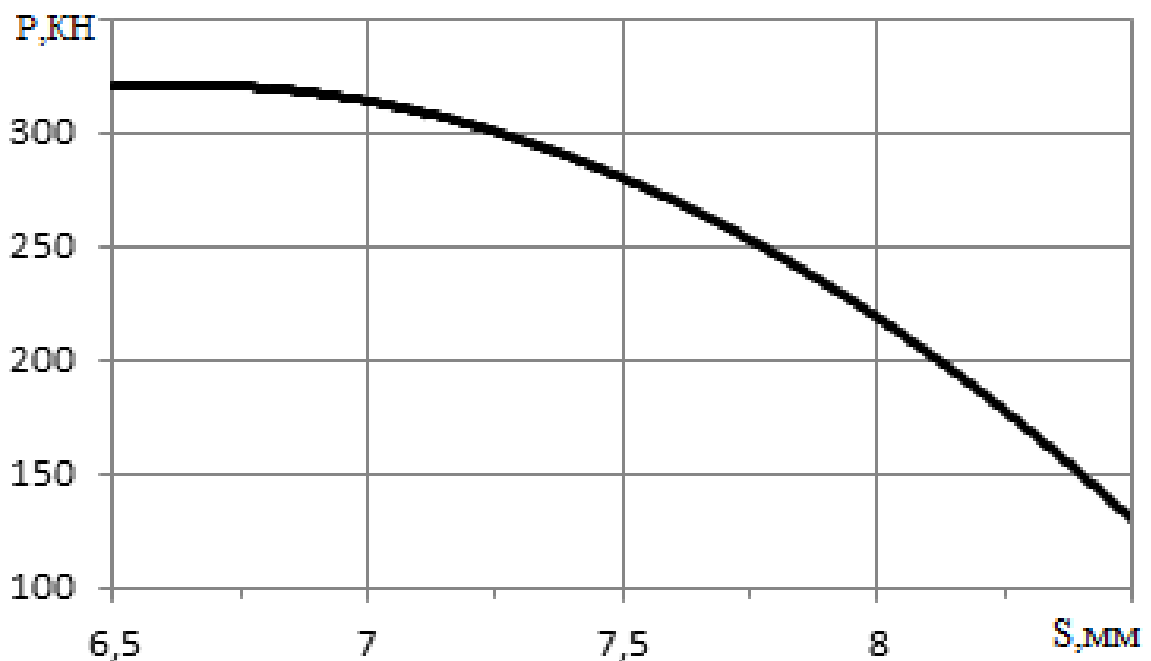


Рисунок 4.10 – Графік залежності зусилля від товщини стінки поковки

#### 4.5 Порівняння теоретичних та експериментальних результатів

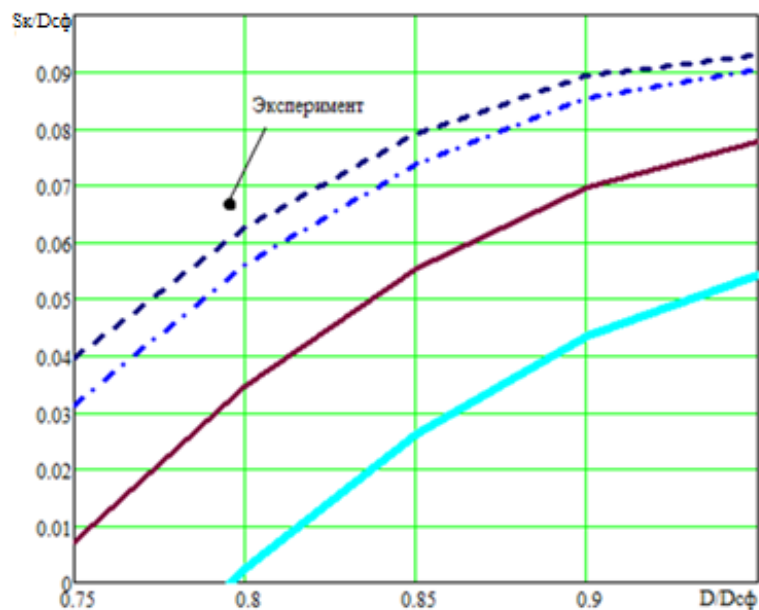
Для порівняння результатів теоретичного та експериментального досліджень побудовано графік, отриманий теоретичним шляхом (рис 3.4, 3.5), на яких вказуємо експериментальні точки (рис. 4.10).

Для побудови експериментальної точки проводився експеримент до формування поковки до кінцевої товщини стінки  $t = 6$  мм. Розміри заготовки після роздачі конусною плитою  $D = 69$  мм,  $D_{\text{отв}} = 48$  мм. Відносний внутрішній діаметр  $D_{\text{отв}} / D_{\text{сф}} = 0,55$ , відносний зовнішній діаметр  $D / D_{\text{сф}} = 0,79$ , відносна товщина стінки  $S_k / D_{\text{сф}} = 0,068$ .

Розрахуємо кут  $\beta$ , заготовки для експерименту

$$\beta = \text{arctg} \left( \frac{\frac{(D_0 - d_0)}{2}}{H_0} \right)$$

$$\beta = \text{arctg} \frac{(58 - 24)/2}{41,5} = 22^\circ$$



---  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,55$ ; -·-·-  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,6$ ; —  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,7$ ; - - -  $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}} = 0,8$

Рисунок 4.11 – Порівняння результатів теоретичного та експериментального досліджень

За результатами досліджень була встановлена закономірність зміння зовнішнього діаметра заготовки від кута конусності  $\beta$  (рис. 4.12).

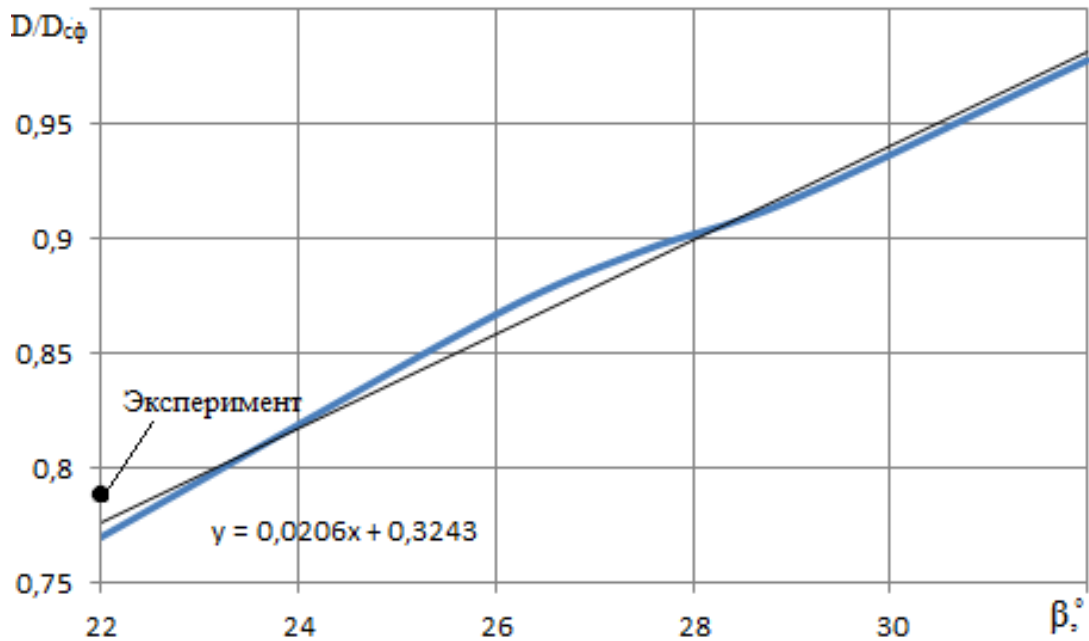


Рисунок 4.12 – Порівняння результатів теоретичного та експериментального дослідження

#### Висновки до розділу 4

1. Отримані результати експериментального дослідження підтверджують попередньо отримані дані теоретичного дослідження. Стінка в процесі роздачі потоншується, що підтверджують графічні залежності.

2. Було встановлено, що зі зменшенням товщини стінки зусилля зростає, а застосування операції роздачі конусним бойком дозволяє знизити зусилля деформування на 20...30%. Результати експериментальних досліджень підтверджують результати теоретичного дослідження з похибкою 5..10%.

3. Результати експериментальних досліджень підтверджують результати теоретичного дослідження, з похибкою 5..10%. В результаті комплексу теоретичних та експериментальних досліджень були розроблені рекомендації для проектування технологічного процесу кування днища конусною та сферичною плитами з вирізами.

## РОЗДІЛ 5

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОСНАЩЕННЯ ПРОЦЕСІВ КУВАННЯ ДНИЩ РОЗДАЧОЮ

#### 5.1 Рекомендації та методика для проектування нових ресурсозберігаючих технологічних процесів кування днищ роздачою

Отримані результати теоретичного та експериментального дослідження дозволили розробити новий технологічний процес кування поковок типу днищ. Відмінністю даного процесу від існуючого є використання спеціального порожнистого зливка з якого виходить задана поковка роздачою конусною та сферичною плитами. Для застосування даної технології потрібна розробка рекомендацій та методики проектування процесу.

Будь-який технологічний процес кування має кілька послідовних етапів: вибір зливка та його форми. Маса зливка розраховується як сума мас: поковки, угару, відходів, прибуткової та донної частин. Маса поковки розраховується через її об'єм. Припуски на деталь визначаються за державними стандартами. Маса угару металу залежить від режиму нагрівання та підігріву.

Розробка технологічних переходів кування днищ складається з наступних основних етапів: визначення ковальських операцій, послідовності їх застосування, інструменту, термомеханічних режимів деформування. Вище перелічені параметри залежать безпосередньо від форми і розмірів поковки, що виготовляється.

Особливістю даного технологічного процесу є застосування конусної та сферичної плити з вирізами, що знижує зусилля деформування та масу інструменту.

Застосування сферичної та конусної плити з вирізом (рис. 5.1) дозволило знизити зусилля деформування у 2 рази, що дає змогу вибрати менш потужне обладнання. Нижня плита представлена рисунку 5.2. Кут кантування за один

оберт становить  $30^\circ$ , величина подачі 250 мм, при зіткненні плити з нижньої частиною заготовки величину обтискання запропоновано зменшити до 50 мм.

Новий технологічний процес одержання поковок типу днищ включає: одержання пустотілого глуходонного зливка (рис. 5.3), підігрів зливка до кувальної температури, роздача конусною плитою (рис. 5.4) та роздача сферичною плитою (рис.5.5).

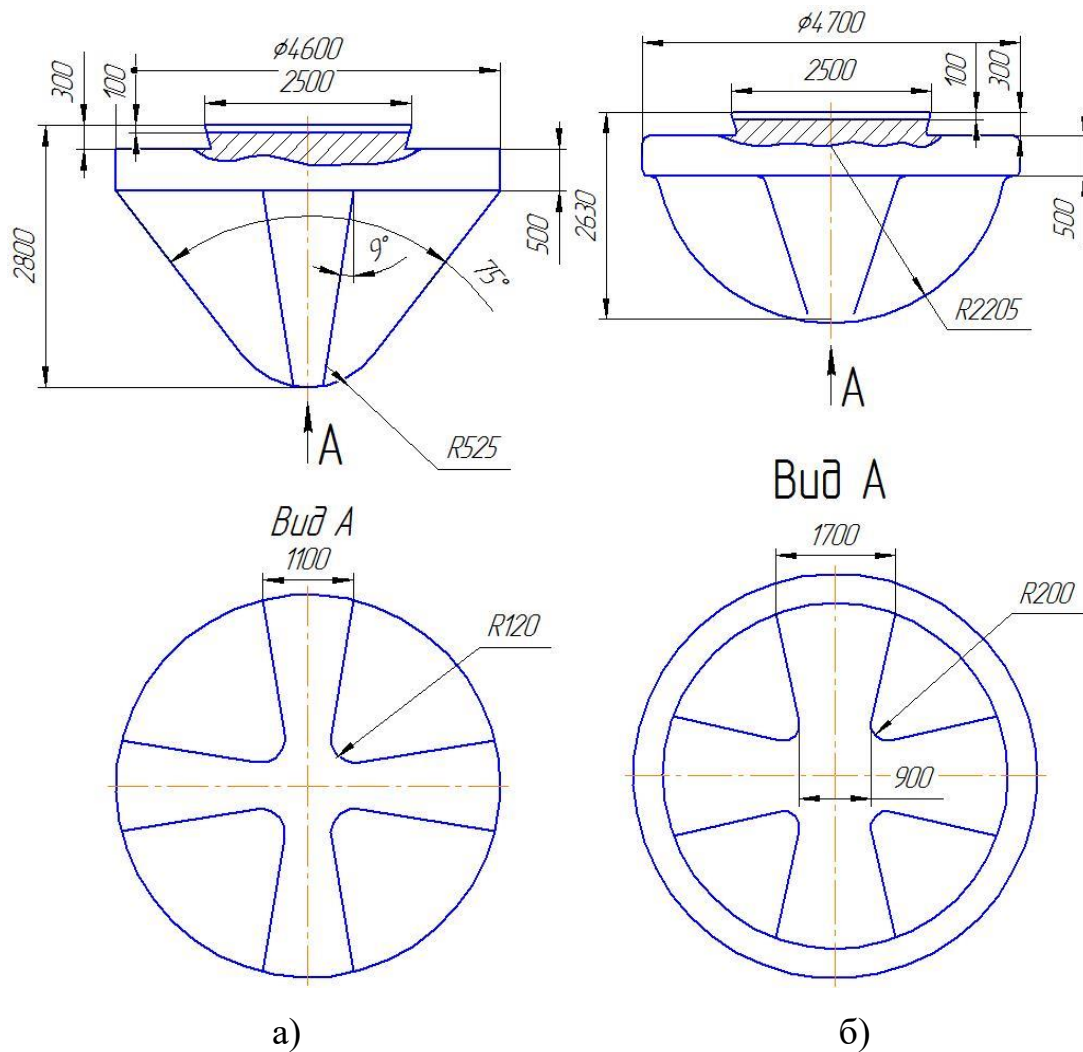


Рисунок 5.1 – Ескіз конусної плити з вирізом (а) та сферичної плити з вирізом (б)

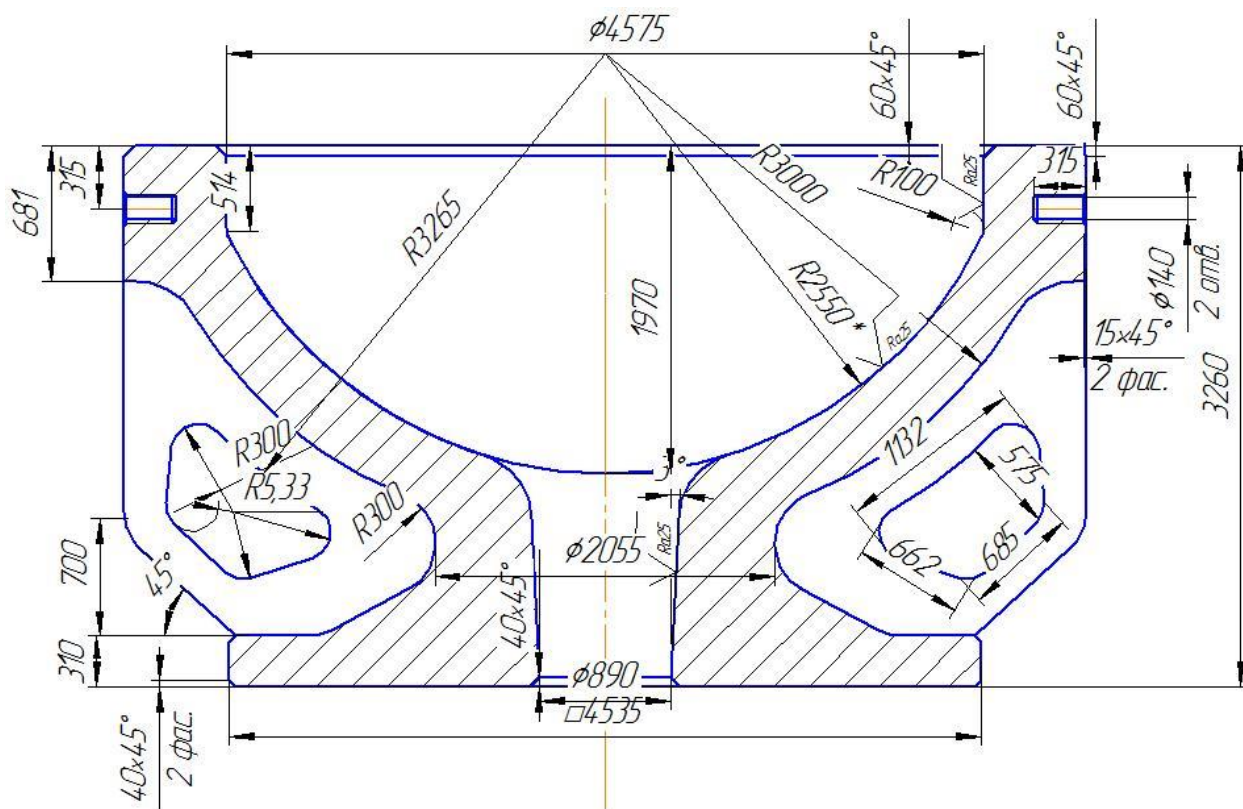


Рисунок 5.2 – Ескіз нижньої плити

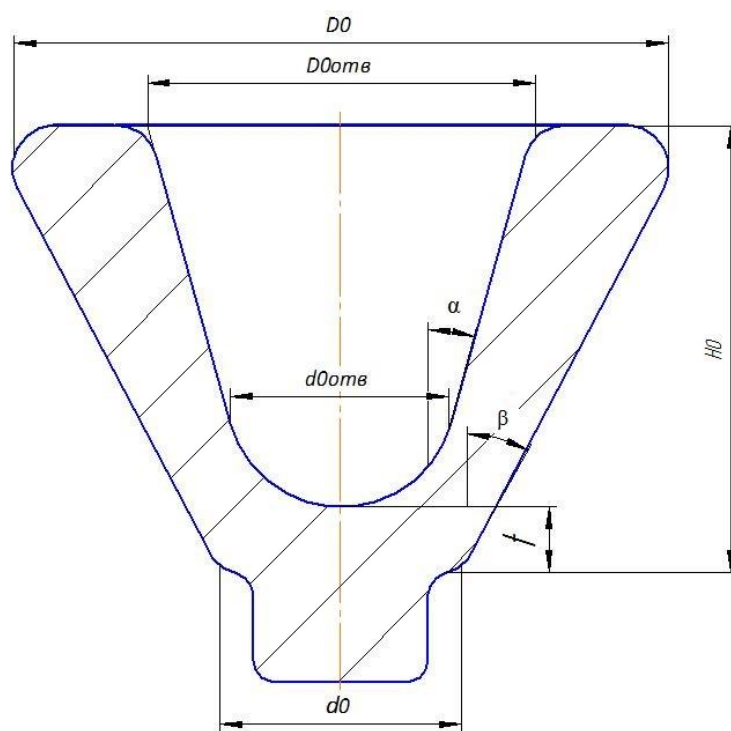


Рисунок 5.3 – Ескіз зливка

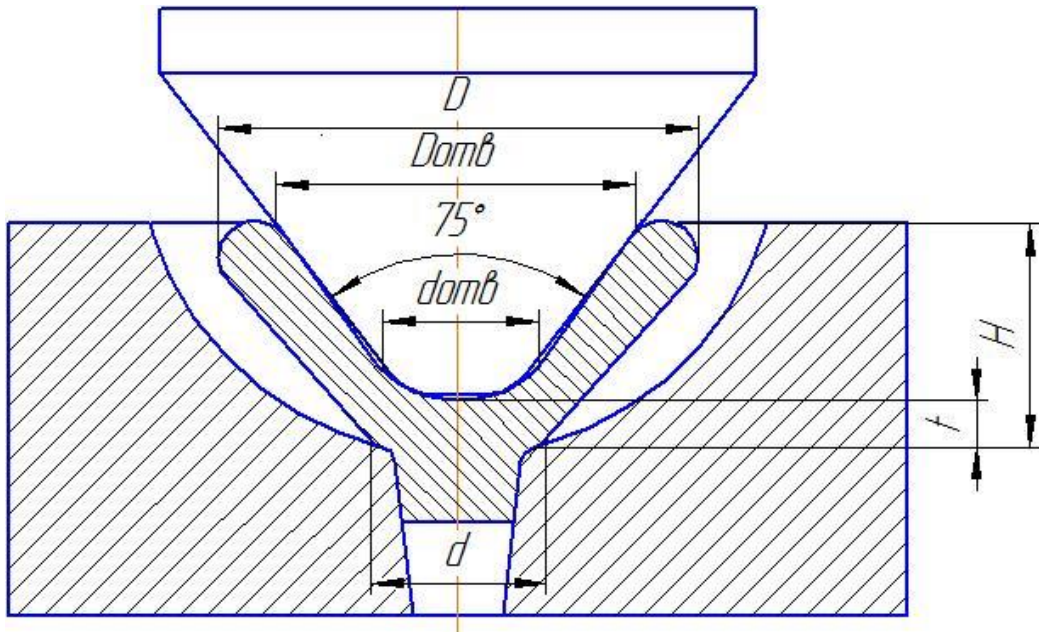


Рисунок 5.4 – Схема роздачі конусною плитою

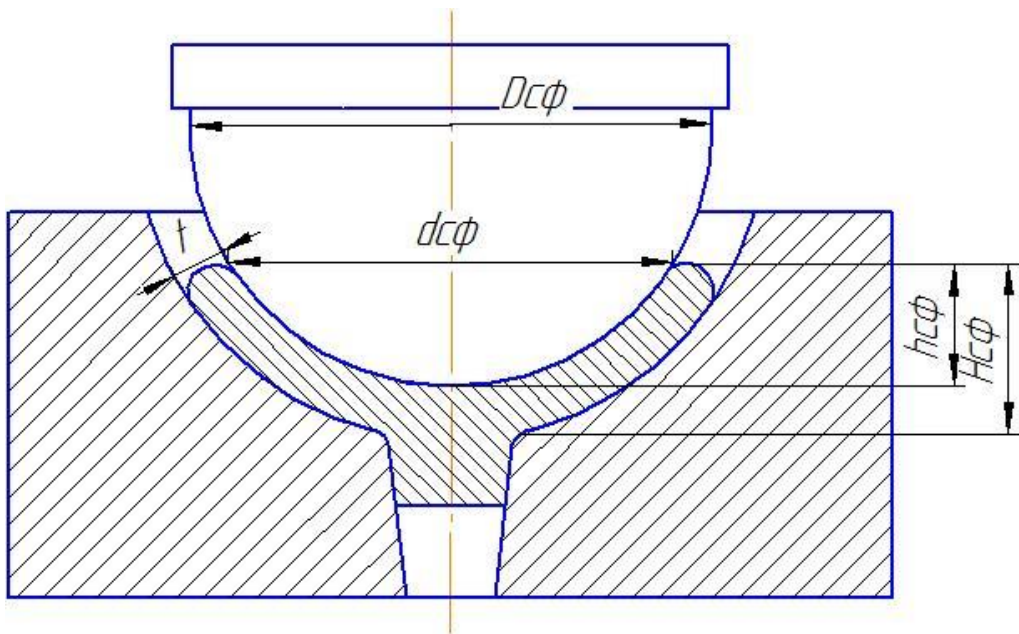


Рисунок 5.5 – Схема роздачі сферичною плитою

Для проектування нового технологічного процесу необхідно визначити вихідні розміри зливка до роздачі конусною плитою. Для цього виходячи з відомих розмірів отримуваної сфери ( $S_k / D_{сф}$ ) та графіка (рис. 5.7) визначаємо розміри проміжної заготовки після роздачі конусної плитою. Маючи

співвідношення  $S_k / D_{cf}$  заданої поковки, при перетині з кривою, яка відповідає за відносний внутрішній діаметр заготовки  $D_{отв} / D_{cf}$  визначаємо відносний зовнішній діаметр заготовки  $D / D_{cf}$ . Для запобігання утворенню складок рекомендується прийняти  $d_{отв} / D_{cf} = 0,2$ , параметр  $d / D_{cf}$  рекомендується прийняти 0,25. Висота заготовки розраховується виходячи з рівності об'ємів

$$V_{пок} = V_{пр.заг} = V_{зл}.$$

Визначивши розміри проміжної заготовки знаходимо розміри вихідного зливка за рисунком 5.8. Для можливості вилучення стрижня зі зливка необхідно забезпечити кут конусності  $=15$ . Діаметр  $d0_{отв} / D_{cf}$  рекомендується прийняти 0,2, параметр  $d0 / D_{cf}$  приймаємо 0,25. Знаючи необхідний відносний проміжний зовнішній діаметр  $D / D_{cf}$ , який отриманий з рисунка 5.5, знаходимо кут  $\beta$  (рис. 5.7).

Як показують результати експериментального моделювання, так само в якості заготовки можна вибирати злиток з циліндричним паском для зниження сили роздачі (рис. 5.6).

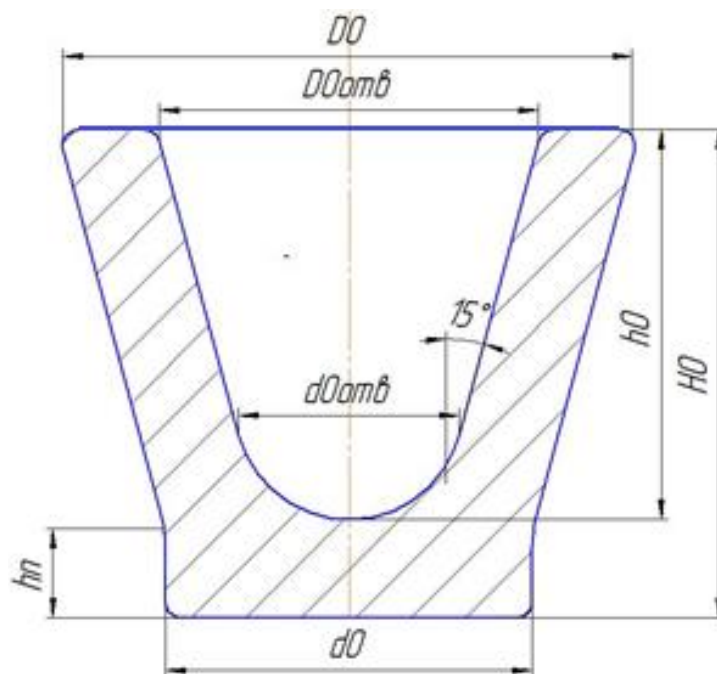


Рисунок 5.6 – Ескіз зливка з циліндричним паском

Використання даного зливка дозволяє зменшити зусилля роздачі за рахунок зниження площі контакту заготовки з інструментом, за рахунок збільшення товщини днища при призначенні циліндричного пояска в нижній частині заготовки та утворення зазору  $z$  між заготовкою та інструментом.

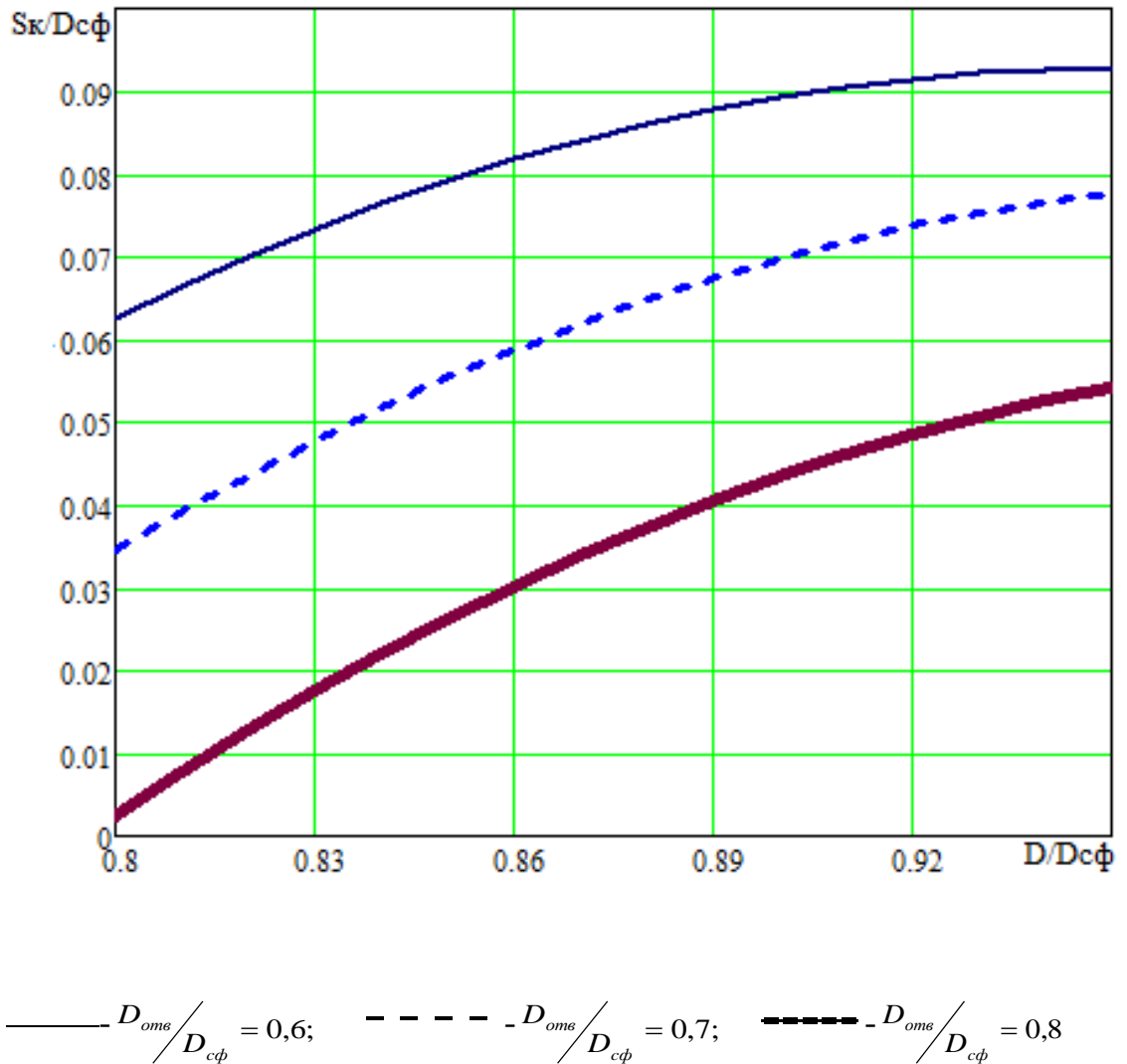


Рисунок 5.7 – Графічна залежність для визначення одержуваної відносної кінцевої товщини стінки від відносного зовнішнього діаметра заготовки при різних відносних внутрішніх діаметрах заготовки

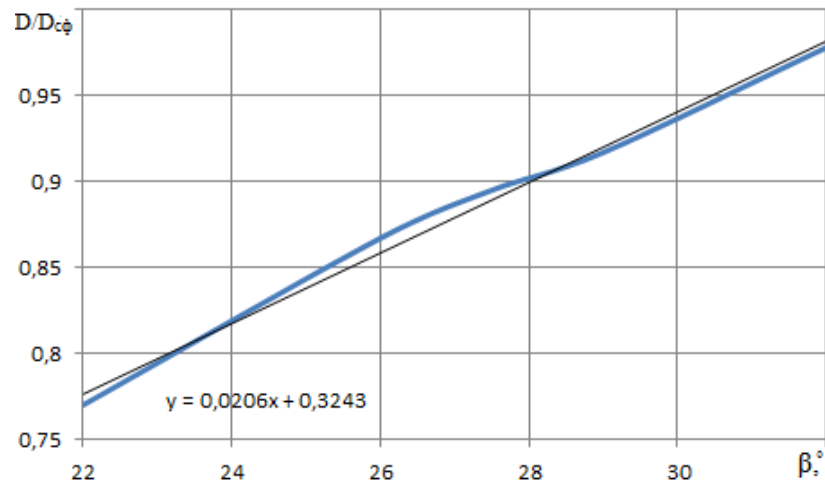


Рисунок 5.8 – Графік залежності одержуваного проміжного зовнішнього діаметра від кута  $\beta$

## 5.2 Проектування технологічного процесу кування деталі «Днище»

Для економічного обґрунтування процесу кування розрахуємо основні показники процесу. Як приклад розрахуємо деталь «Днище», що отримується традиційною технологією зі звичайного ковальського зливка (рис. 5.9).

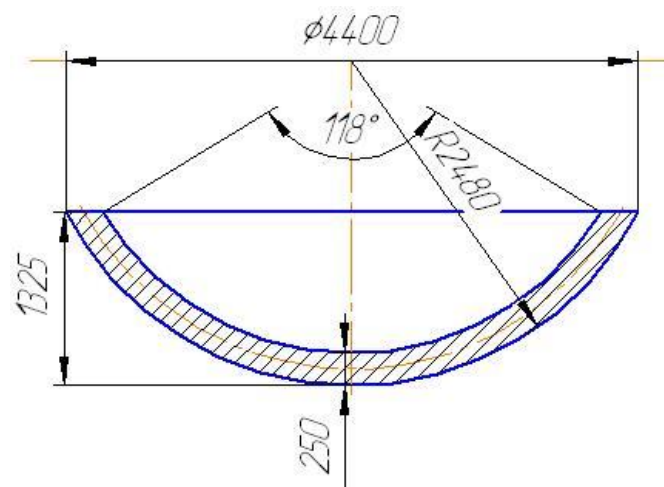


Рисунок 5.9 – Ескіз деталі

Об'єм деталі:

$$V_o = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H^2 \cdot (3 \cdot R - H) - \left( \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (H - S)^2 \cdot (3 \cdot (R - S) - (H - S)) \right)$$

$$V_o = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 1325^2 \cdot (3 \cdot 2480 - 1325) -$$

$$\left( \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (1325 - 250)^2 \cdot (3 \cdot (2480 - 250) - (1325 - 250)) \right) = 4,44 \cdot 10^9 \text{ мм}^3$$

Маса деталі:

$$M_o = V_o \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 4,44 \cdot 10^9 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 34671 \text{ КГ.}$$

Призначення припусків, допусків та напусків.

Визначимо поковочні розміри:

$$D = (4400 + 2 \cdot 20) \pm 25 = 4440 \pm 25 \text{ мм.}$$

$$H = 1325 + 25 + 50 = 1400 \pm 17 \text{ мм.}$$

$$S = (250 + 2 \cdot 25) \pm 10 = 300 \pm 10 \text{ мм.}$$

$$R = (2480 + 25) \pm 20 = 2505 \pm 20 \text{ мм.}$$

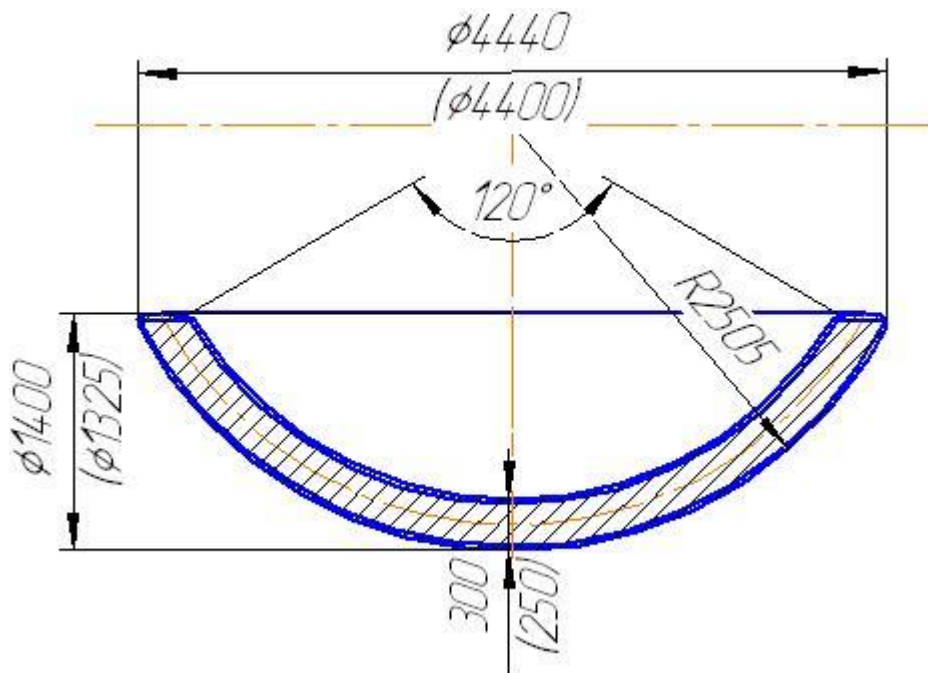


Рисунок 5.10 – Ескіз поковки

Гарячі розміри поковки визначаємо, помноживши знайдені розрахункові значення коефіцієнт лінійного розширення  $\beta=1,5\%$ .

$$D_z = D \cdot \left( 1 + \frac{\beta}{100\%} \right) = 4440 \cdot \left( 1 + \frac{1,5}{100} \right) = 4520 \text{ мм.}$$

$$H_{\text{зоп}} = H \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100\%}\right) = 1400 \cdot \left(1 + \frac{1.8}{100}\right) = 1425 \text{ мм.}$$

$$S_{\text{зоп}} = S_{\text{зоп}} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100\%}\right) = 300 \cdot \left(1 + \frac{1.8}{100}\right) = 306 \text{ мм.}$$

$$R_z = R \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100\%}\right) = 2505 \cdot \left(1 + \frac{1.8}{100}\right) = 2550 \text{ мм.}$$

Розрахунок маси поковки та маси зливка.

$$V_{\text{н.пок}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 1400^2 \cdot (3 \cdot 2505 - 1400) -$$

$$\left(\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (1400 - 300)^2 \cdot (3 \cdot (2505 - 300) - (1400 - 300))\right) = 5,5 \cdot 10^9 \text{ мм}^3$$

Маса поковки, яка відповідає номінальному розміру

$$M_{\text{н.пок}} = M_{\text{н.пок}} \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 5,5 \cdot 10^9 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 42996 \text{ кг.}$$

Маса напусків другого роду

$$M_{\text{нап}} = 0,393 \cdot 10^{-6} \cdot (D - D_{\text{внут}}) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_{\text{внут}}^2) + M_2 =$$

$$= 0,393 \cdot 10^{-6} \cdot (4440 - 3840) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (4440^2 - 3840^2) = 920 \text{ кг.}$$

Повна маса поковки

$$M_{\text{пок}} = M_{\text{н.пок}} + M_{\text{нап}} = 42996 + 920 = 43916 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт виходу придатного:

$$KBГ = \frac{100 - (П + Д + У)}{100} = \frac{100 - (20 + 4 + 3)}{100} = 0,73$$

Визначимо орієнтовну масу зливка

$$M_{\text{сл.о.}} = \frac{M_{\text{пок}}}{K_{\text{г.з.1}}} = \frac{43916}{0,73} = 60159 \text{ (кг).}$$

Приймаємо злиток масою 63 тони з меншим діаметром тіла злитка

$$d_{\text{т.с.}} = 1478 \text{ мм.}$$

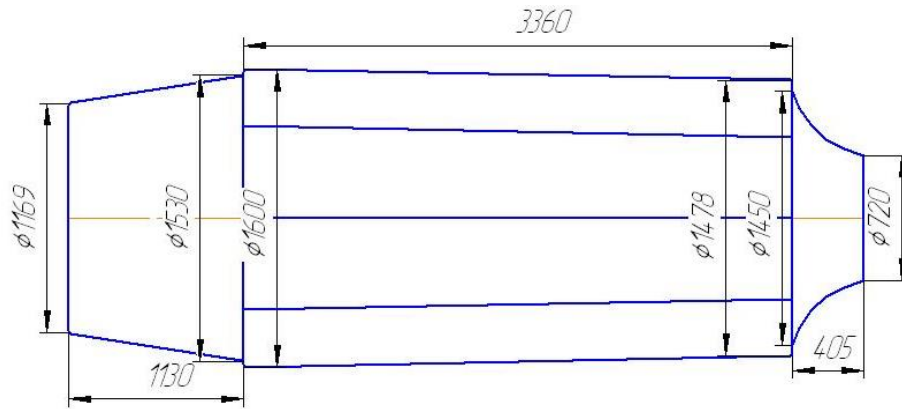


Рисунок 5.11 – Ескіз зливка

За розмірами зливка, обраного в попередньому пункті, визначаємо об'єми прибуткової, донної частини та тіла зливка та їх маси.

$$V_{\text{д.ч.}} = \frac{\pi}{12} \cdot (d_{\text{д.ч.}}^2 + d_{\text{д.ч.}} \cdot D_{\text{д.ч.}} + D_{\text{д.ч.}}^2) \cdot L_{\text{д.ч.}} =$$

$$= \frac{\pi}{12} \cdot (720^2 + 720 \cdot 1450 + 1450^2) \cdot 405 = 3,77 \cdot 10^8 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\text{т.с.}} = \frac{\pi}{12} \cdot (d_{\text{т.с.}}^2 + d_{\text{т.с.}} \cdot D_{\text{т.с.}} + D_{\text{т.с.}}^2) \cdot L_{\text{т.с.}} =$$

$$= \frac{\pi}{12} \cdot (1600^2 + 1600 \cdot 1478 + 1478^2) \cdot 3360 = 6,25 \cdot 10^9 \text{ мм}^3.$$

$$M_{\text{н.ч.}} = V_{\text{н.ч.}} \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 1,63 \cdot 10^9 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 12714 \text{ КГ}.$$

Довжина віночка

$$L_e = 0,05 \cdot d_{\text{т.с.}} = 0,05 \cdot 1478 = 79 (\text{мм})$$

$$M_{\text{д.ч.}} = (3,77 \cdot 10^8 + 0,785 \cdot 1478^2 \cdot 79) \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 4148,1 \text{ КГ}.$$

$$M_{\text{т.с.}} = (6,25 \cdot 10^9 - 0,785 \cdot 1478^2 \cdot 79) \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 47693,3 \text{ КГ}.$$

Маса зливка:

$$M_{\text{сл}} = 12714 + 4148,1 + 47693,3 = 60555,4 \text{ (КГ)}$$

$$\text{Маса угару: } M_{\text{уз}} = M_{\text{сл}} \cdot \frac{Y\%}{100\%} = 60555,4 \cdot \frac{3}{100} = 1816,7 \text{ КГ}.$$

Витратні коефіцієнти:

$$\text{Коефіцієнт використання металу } K_{\text{и.м.}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{сл}}} = \frac{34671}{63000} = 0,55 \cdot$$

$$\text{Коефіцієнт виходу придатного } K_{в.з.} = \frac{M_{нок}}{M_{сл}} = \frac{43916}{63000} = 0,7 \cdot$$

$$\text{Коефіцієнт вагової точності } K_{в.т.} = \frac{M_{д}}{M_{нок}} = \frac{34671}{43916} = 0,79 \cdot$$

Температурний інтервал  $T_{\max} = 1200^{\circ}\text{C}; T_{\min} = 800^{\circ}\text{C}$ .

Уков, який можна забезпечити за одне нагрівання

$$Y_{1н} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{150} = \frac{1200 - 800}{150} = 2,67$$

Кількість нагрівань

$$n = \frac{Y_{\text{общ}}}{Y_{1н}} = \frac{3,5}{2,67} = 2$$

Загальна тривалість нагрівання

$$\tau_{\text{общ}} = \alpha_p \cdot K \cdot \frac{D_{\text{м.с.}}}{1000} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{м.с.}}}{1000}} = 1,4 \cdot 20 \cdot \frac{1478}{1000} \cdot \sqrt{\frac{1478}{1000}} = 50,3 \text{ год.}$$

Тривалість підігріву до витримки

$$\tau_{\text{под}} = \frac{T_{\text{под}} - T_{\min}}{100} = \frac{995 - 800}{100} = 2 \text{ год.}$$

Загальний час підігріву

$$\tau_{\text{под}} = \alpha_p \cdot K \cdot \frac{D_{\text{о.з.}} - D_{\text{нр}}}{2000} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{о.з.}} - D_{\text{нр}}}{2000}} = 1,4 \cdot 20 \cdot \frac{2640 - 1100}{2000} \cdot \sqrt{\frac{2640 - 1100}{2000}} = 18,9 \text{ год.}$$

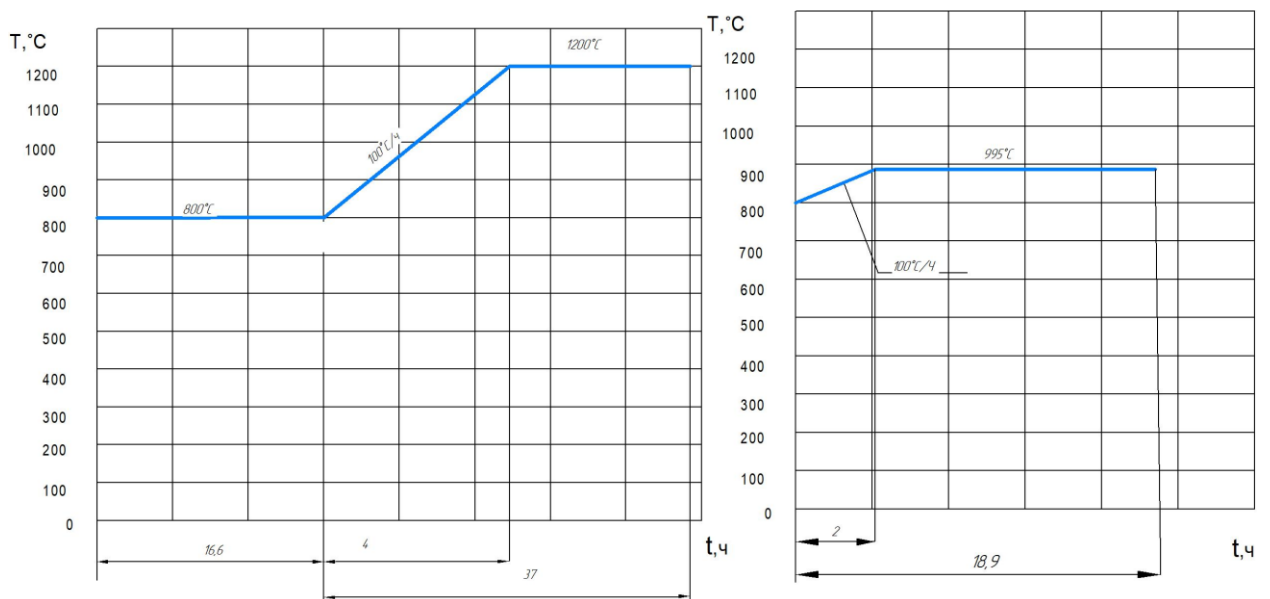


Рисунок 5.13 – Режим нагрівання заготовки та її підігріву

Розрахунок переходів штампування поковки «Днище»:

Довжина зливка після обкочення

$$L_{\text{вил}} = \frac{6,25 \cdot 10^9}{0,785 \cdot 1478^2} \left( \frac{100 - 3,5}{100} \right) = 3514 \text{ мм.}$$

$$D_{\text{вил}} = 1478 \text{ мм.}$$

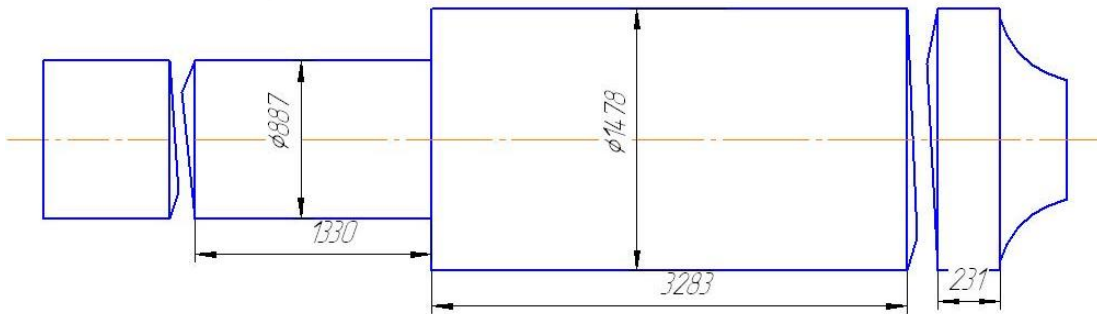


Рисунок 5.14 – Ескіз зливка після вирубки блоку

Після осадження зливка до діаметра  $D_{\text{о.з.}} = 2500$  мм заготовка буде мати висоту

$$H_{\text{о.з.}} = \frac{d_{\text{м.с.}}^2 \cdot L_{\text{м.с.}}}{D_{\text{о.з.}}^2} = \frac{1478^2 \cdot 3283}{2500^2} = 1150 \text{ мм.}$$

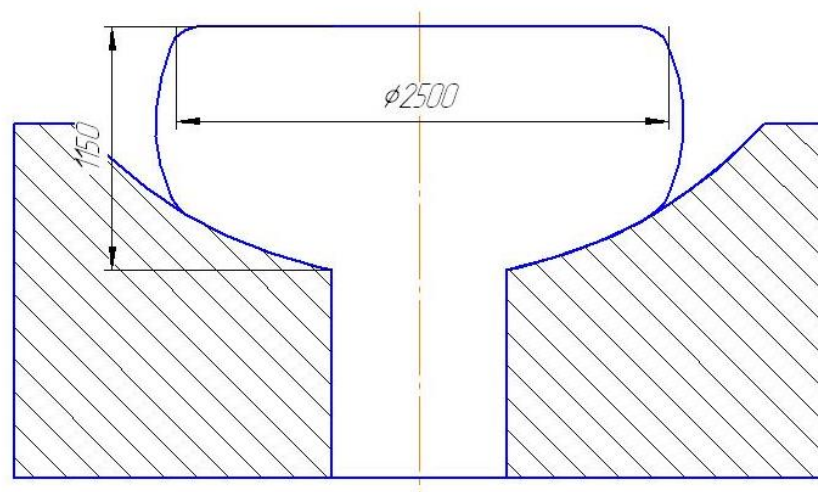


Рисунок 5.15 – Ескіз осадженої заготовки

Далі виробляють не повну прошивку заготовки суцільним прошив-  
нем  $d_{np} = 1100$  мм товщина днища дорівнює товщині поковки  $S = 300$   
мм. Приймаємо діаметр заготовки після прошивки 2640 мм.

Розрахуємо висоту заготовки після не повної прошивки:

$$H_{np} = \frac{M_{пок} / \left( 7,8 \cdot 10^{-6} - \frac{\pi}{4} \cdot D_{оз}^2 \cdot h \right)}{0,785 \cdot (D_{оз}^2 - d_{np}^2)} = \frac{43916 / \left( 7,8 \cdot 10^{-6} - \frac{\pi}{4} \cdot 2640^2 \cdot 300 \right)}{0,785 \cdot (2640^2 - 1110^2)} = 890 \text{ мм.}$$

Повна висота прошитої заготовки

$$H_{np} = 890 + 300 = 1190 \text{ мм.}$$

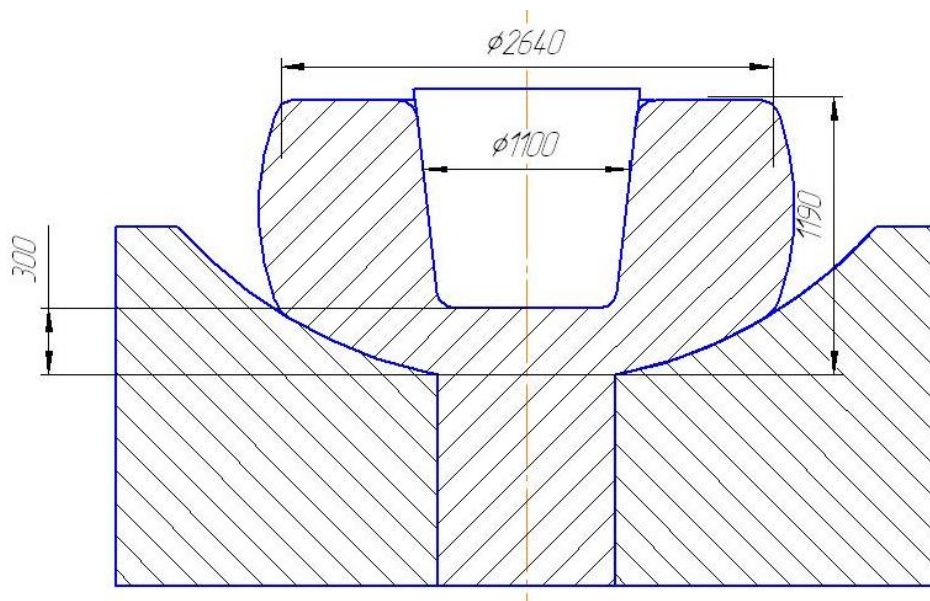


Рисунок 5.16 – Ескіз прошитої заготовки

Далі проводять протяжку заготовки до розмірів заготовки під попе-  
реднє штампування. Розрахуємо розміри заготовки для попереднього  
штампування. Розрахуємо довжину дуги поковки. Розрахунок ведеться за  
середньою лінією  $R_{сер. лін} = 2355$  мм. Кут  $\alpha = 124^\circ$

$$\text{Довжина } L = \frac{\pi \cdot R_{сер. л.} \cdot \alpha}{180} = \frac{\pi \cdot 2355 \cdot 124}{180} = 5094 \text{ мм.}$$

Приймаючи товщину днища 300 мм, виходячи з рівності об'ємів об-  
числюємо висоту заготовки  $H = 2162$  мм.

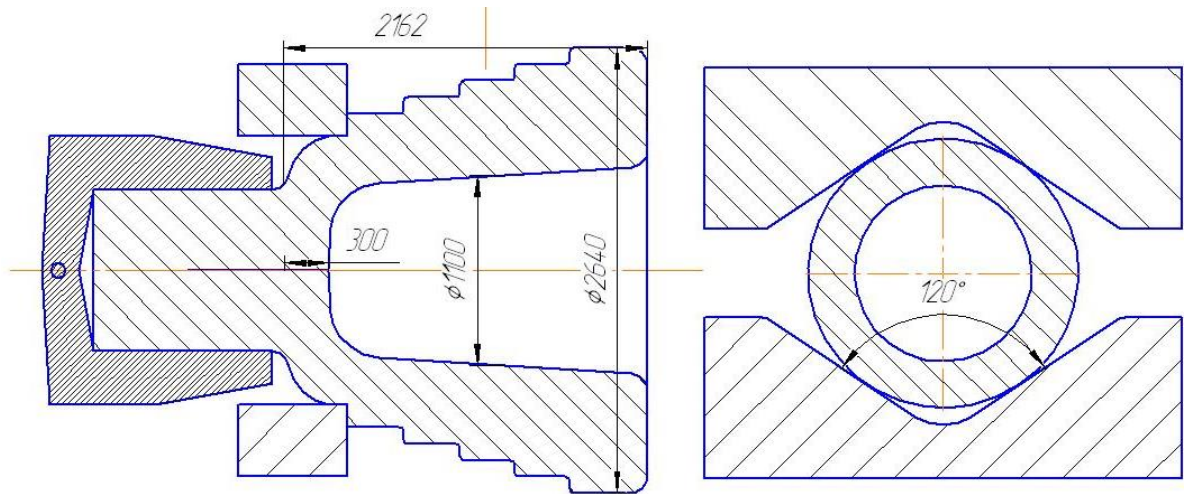


Рисунок 5.17 – Ескіз заготовки після протягування

Далі виробляємо роздачу заготовки в штампі, пуансон якого має кут  $\alpha=90^\circ$  (рис. 5.18). Після операції попереднього штампування проводиться остаточне штампування сферичною плитою, яка повторює форму поковки (рис. 5.19).

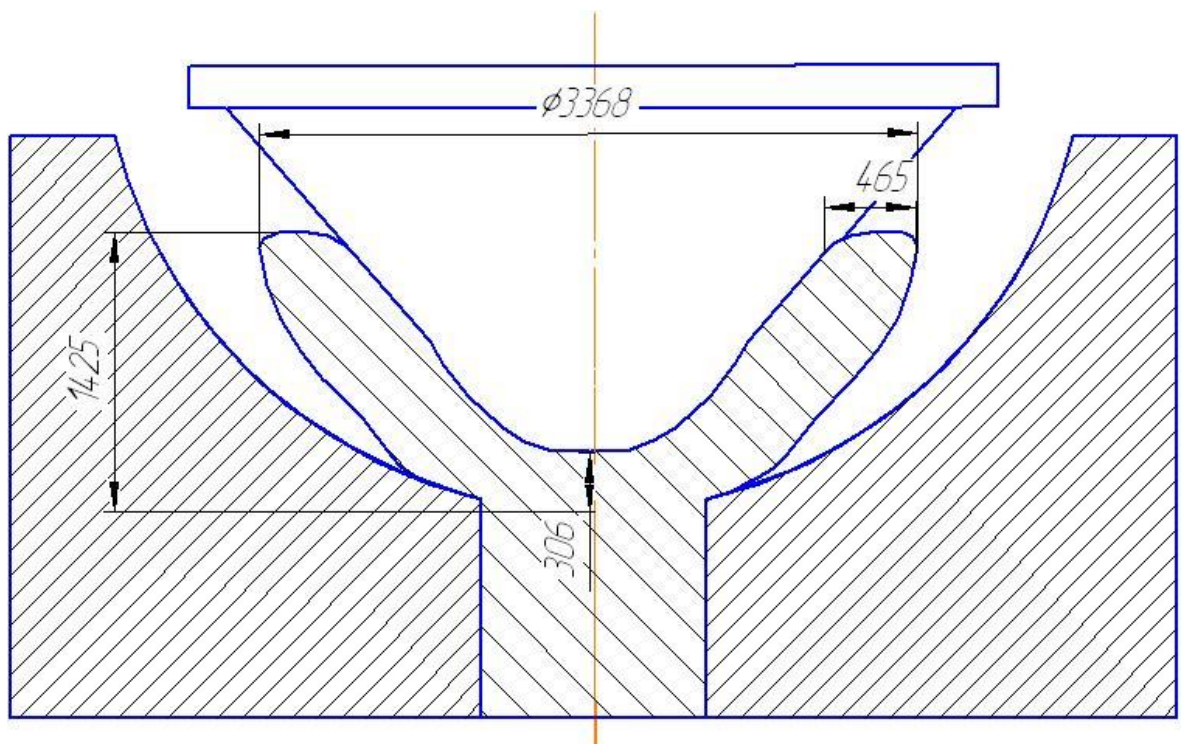


Рисунок 5.18 – Заготовка після роздачі конусним пуансоном

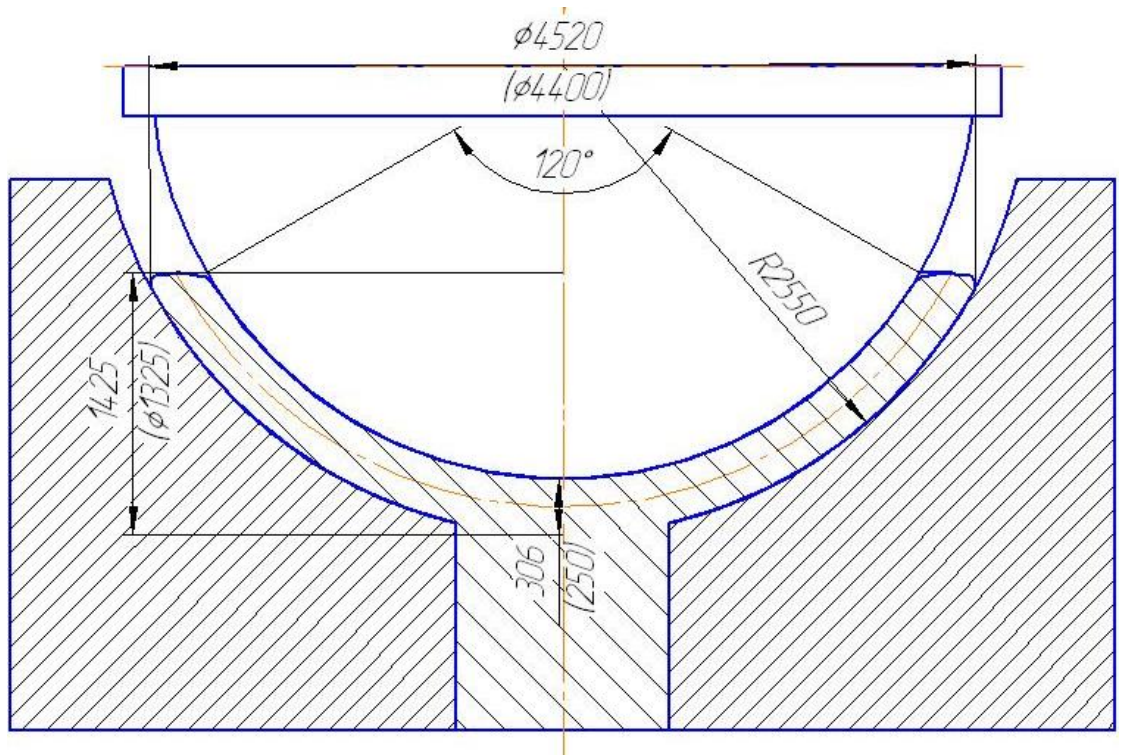


Рисунок 5.19 – Схема остаточного штампування сферичною плитою

Розрахунок зусиль штампування та вибір обладнання:

Технологічний процес кування днища передбачає операції чорного переходу операцію роздачі конусною плитою та чистового - штампування сферичною плитою. Для вибору обладнання необхідно розрахувати силу роздачі та формування. Сили роздачі та формування проводиться з використанням програмного продукту QForm 2 D.

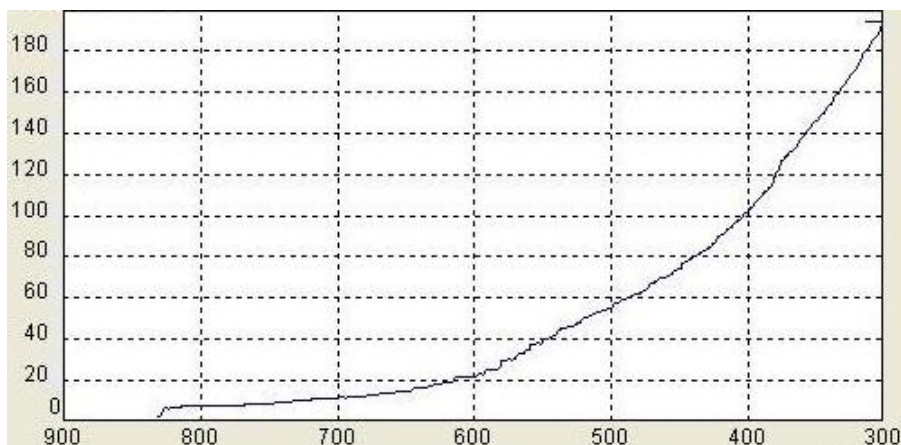


Рисунок 5.20 – Зусилля штампування QForm 2D

### 5.3 Проектування штампового оснащення

На рис. 5.21 представлений штамп для роздачі заготовки конусною плитою складається з корпусу 1, матриці 2, конусної плити 3, клина 4, шпонки 5 і штирів транспортувальних 6. Збір штампу відбувається наступним чином: корпус 1 встановлюється пуансон 3, кріплення відбувається за допомогою клина 4. Для запобігання зміщення плити щодо корпусу, між ними встановлюється шпонка 5. Корпус кріпиться до пресу за допомогою болтів. Далі виробляють центрування пуансону щодо матриці 2, для цього пуансон опускають на матрицю. Центрування відбувається за рахунок співпадіння циліндричних ділянок матриці та корпусу. Далі до нижньої частини преса кріпиться матриця за допомогою гвинтів, встановлюється заготовка та проводиться процес штампування.

Для остаточного штампування використовують штамп для формування (рис. 5.22), який відрізняється від попереднього формою верхньої плити. Встановлення відбувається наступним чином: з корпусу 1 вилучається конусний пуансон, а на його місце встановлюється сферична плита 1 для остаточного штампування.

Збірна конструкція верхніх плит дозволяється економити метал, за рахунок зміни не всього пуансону, а лише необхідною надялинки. Т.к програма випуску даної деталі складає до 100 шт /рік, що відповідає дрібносерійному виробництва, немає необхідності виготовляти штампи з високолегованої сталі, тому деталі штампу виготовляємо із сталі 35Л.

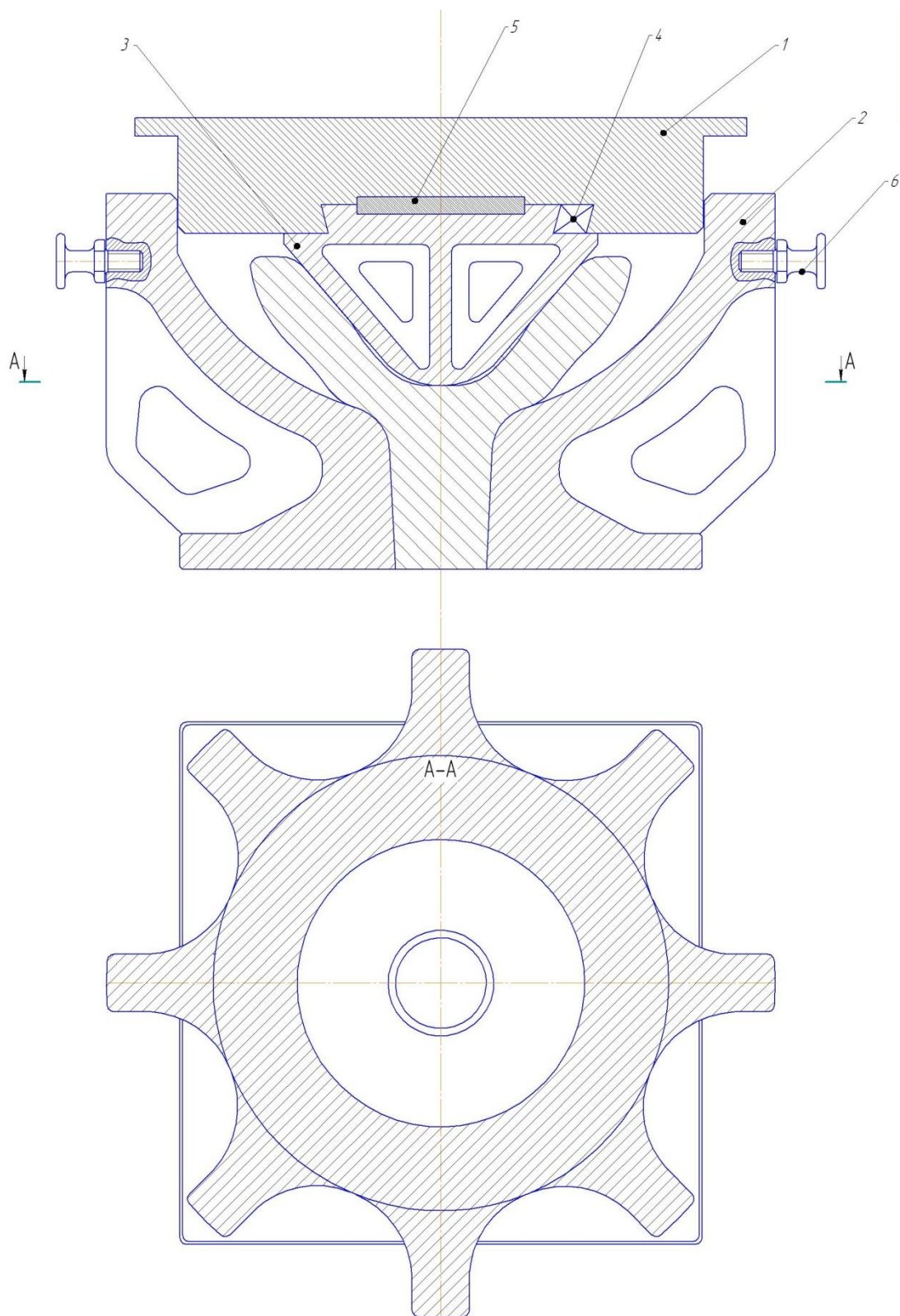


Рисунок 5.21 – Штамп для роздачі конусною плитою

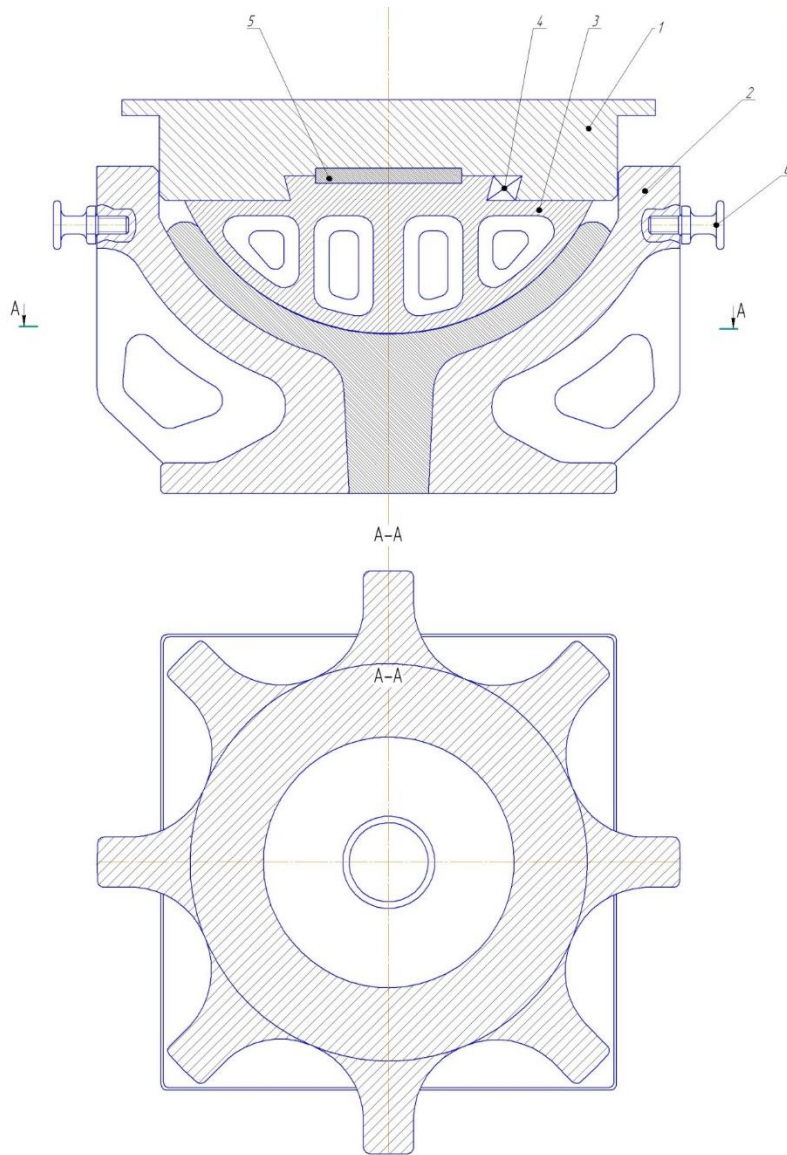
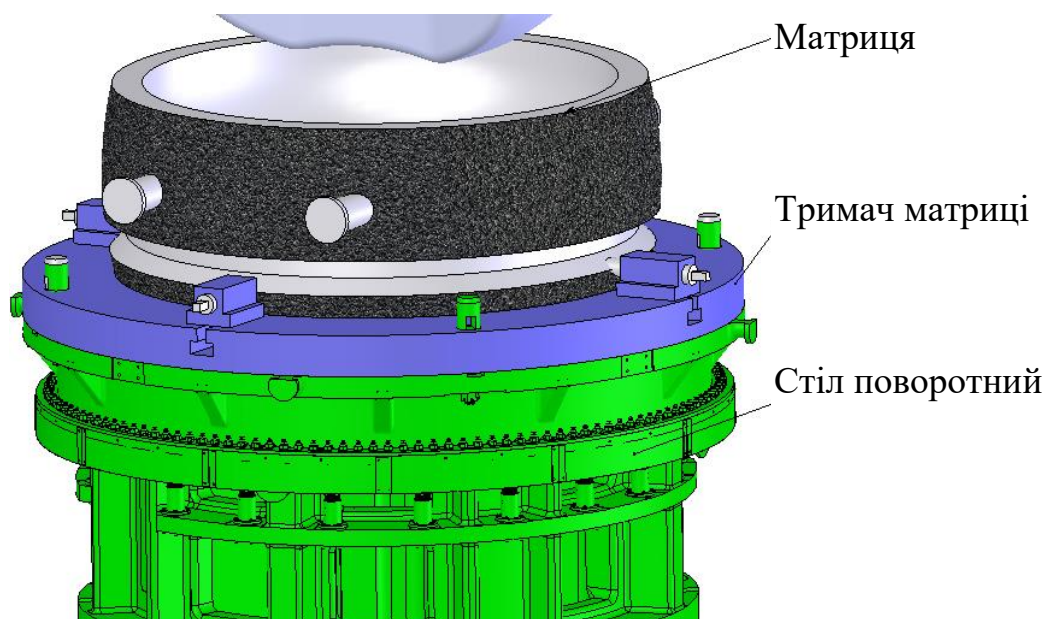
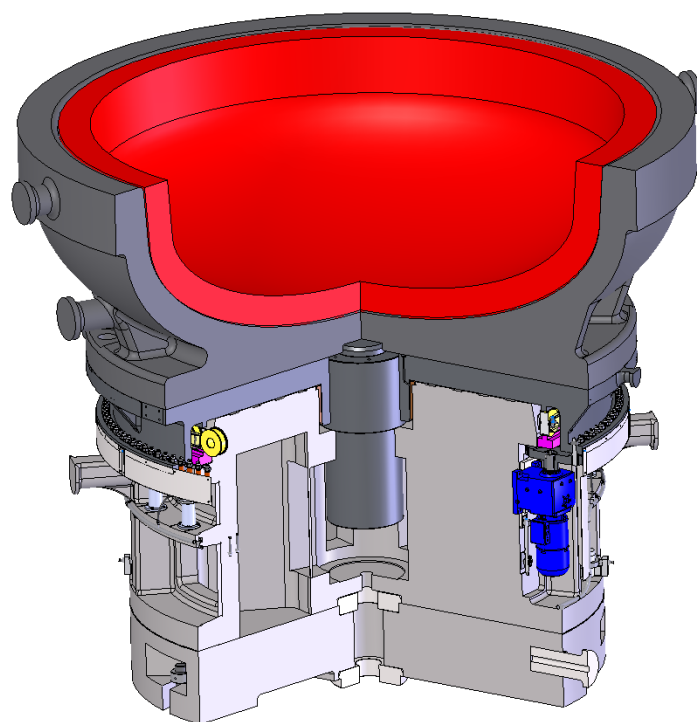


Рисунок 5.22 – Штамп для формування сферичною плитою

На базі моделювання та проведених розрахунків було спроектовано та виготовлене штампове оснащення на ПрАТ «Енергомашспецсталь» (рис. 5.23). Особливістю оснащення є можливість штампування крупногабаритних днищ з мінімальними припусками та високою повторюваністю виробів. Це стає можливим за рахунок використання спеціальної форми деформуючого інструмента, а також можливості застосування поворотної плити на різний кут обертання.



а)



б)

Рисунок 5.23 – Штмп для кування днища роздачою: а – вид з переду; б – четвертний виріз

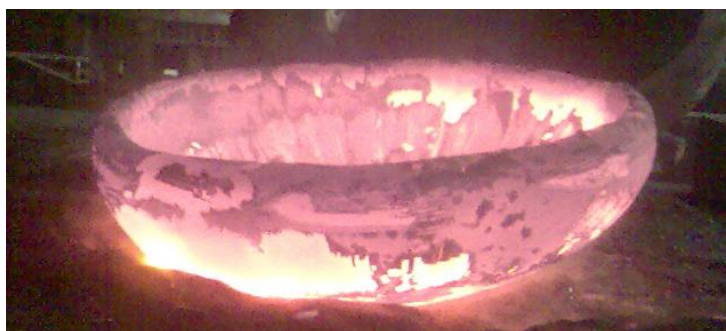
Оснащення є універсальним і може бути використано для штампування днищ/кришок атомних реакторів та парогенераторів. При цьому матриця можна знімати краном з поворотного столу та видаляти відштамповане днище.

#### 5.4 Апробація розробленої технології в умовах ПрАТ «Енергомашспецсталь»

За результатами проведених комплексних досліджень було розроблено технологічний процес та оснащення для штампування крупногабаритних днищ на кувальному гідравлічному пресі зусиллям 150 МН (рис. 5.31, а). Розроблена технологія була апробована та впроваджена на ПрАТ «Енергомашспецсталь». Відштампована поковка для виготовлення днища парогенератора представлена на рисунку 5.31, б.



а)



б)

Рисунок 5.31 - Апробація розробленої технології в умовах ПрАТ «Енергомашспецсталь»: а – прес з оснащенням; б – отримана поковка

Після штампування гаряча поковки охолоджувалась, піддавалась попередній термічній обробці, далі попередній механічній обробці, після чого відбувалась остаточні термічна та механічна обробки.

## 5.5 Випробування якості виготовлених днищ

Всі деталі атомної енергетики відносяться до найвідповідальніших деталей. До їх висуваються високі вимоги з механічних властивостей, ультразвукової дефектоскопії контролю (УЗД) та ін. Далі приведено технічні умови (ТУ 0893-014-00212179-2004), які висуваються до цих деталей. Заготовки із сталей марок 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-ВД, 10ГН2МФА-Ш, 10ГН2МФА-А для обладнання АЕС відносяться до Гр. V, КП30,  $T_{к0} \leq 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , для яких встановлюється обов'язковий обсяг випробувань (табл. 5.6).

**Ультразвукова дефектоскопія.** Заготовки піддаються УЗД. Оцінка якості поковок при УЗД проводиться прямим і похилим перетворювачами. Вимоги до суцільності поковок при контролі прямим перетворювачем:

1. Фіксації підлягають несплошності еквівалентною площею ( $S_0$ ) трохи більше  $15\text{мм}^2$ .
2. Не допускаються несуцільності еквівалентною площею ( $S_1$ ) більше  $30\text{мм}^2$ .
3. На будь-якій квадратній ділянці площею  $300\text{см}^2$ :
  - максимально допустима сумарна площа всіх фіксованих несплошностей -  $400\text{мм}^2$ ;
  - максимально допустима кількість несплошностей площею  $S_{1-5}$  штук
4. На будь-якій квадратній ділянці площею  $1\text{м}^2$ :
  - максимально допустима сумарна площа всіх фіксованих несплошностей -  $800\text{мм}^2$ ;

Основні ознаки групи			Обсяг контролю							
Види контролю	Умови комплектування партії	Характеристики механічних властивостей, обов'язкові для приймання	Механічні властивості	Критична температура крихкості ( $T_{к0}$ )	Вигин	Хімічний склад	Макроструктура	Неметалічні вклучення	Ультразвукова дефектоскопія УЗД	Візуальний та вимірювальний
1. На розтяг при 20°C і 350°C; 2. На ударний вигин при 20°C мінус 10°C; 3. Контроль неметалічних вклучень; 4. Вигин (на вимогу креслення або замовлення); 5. Контроль макроструктури; 6. УЗД; 7. Визначення (підтвердження) $T_{к0}$ (на вимогу креслення чи замовлення); 8. Визначення хімічного складу; 9. Візуальний та вимірювальний.	Кожна заготовка індивідуальна	При температурах 20°C і 350°C : - тимчасовий опір, - межа плинності, - Відносне подовження, - Відносне звуження.  При температурах 20°C та мінус 10°C: - ударна в'язкість.	Кожна заготовка	Кожна заготовка	Від плавки	Кожна заготовка				

### Механічні властивості та результати визначення $T_{к0}$

Механічні властивості при температурі, °C										Критична температура крихкості $T_{к0}$ °C не вище	Випробування на вигин кут 90° (діаметр оправки d, товщина зразка a)	
20					350							Мінус 10
Межа міцності $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ Н/мм <sup>2</sup>	Відносне подовження $\delta_s$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Ударна в'язкість КСВ Дж/см <sup>2</sup>	Межа міцності $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ Н/мм <sup>2</sup>	Відносне подовження $\delta_s$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Ударна в'язкість КСВ Дж/см <sup>2</sup>			
540-700	345-590	16	55	39	490	295	14	50	24	+15	d = 2 a	
Не менш												

Хімічний склад сталі 10ГН2МФА має задовольняти наступним вимогам

Масова частка елементів, %									
вуг- лець	кремній	марга- нець	ні- кель	моліб- ден	вана- дій	хром	мідь	сірка	фос- фор
0,08- 0,12	0,17- 0,37	0,80- 1,10	1,8- 2,3	0,40- 0,70	0,03- 0,07	0,30	0,30	0,02	0,02

Примітка. Не допускаються:

- Несуцільності еквівалентною площею ( $S_0$ ) і більше, якщо вони оцінені як протяжні;
- Несуцільності, що викликають при контролі ослаблення донного сигналу рівня  $S_0$  і нижче.

### Висновки до розділу 5

1. Розроблено новий технологічний процес виготовлення поковки типу «Днище» з використанням порожнистого глухдонного зливка, операцією роздачі конусною та сферичною плитами.

2. Розроблено методику та спроектовано оснащення для реалізації нового технологічного процесу, а також рекомендації щодо розробки нового порожнистого зливка

3. В результаті порівняння нового технологічного процесу з існуючим можна зробити висновок, що з економічної точки зору даний спосіб ефективний і дозволяє економити метал на 16 % більше, порівняно з існуючою технологією. Про це свідчать покращені показники коефіцієнта виходу придатного та коефіцієнта використання металу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На сьогодні в Світі спостерігається зростання виробництва крупногабаритних деталей відповідального машинобудування. Крупнотонажні поковки та деталі робляться у різних країнах Світу. Це зростання виробництва крупногабаритних поковок, зокрема в атомній енергетиці, свідчить про актуальність розвитку енергетичного машинобудування. На сьогодні основний упор роблять на збільшення ваги ковальських злитків, зниження витрат металу, а також покращення якості деталей відповідального призначення і заготовок для них. Традиційні техпроцеси кування крупних днищ не завжди забезпечують відповідність вимогам по УЗД, механічним властивостям і макроструктурі. Деякі ковальські операції малоефективні та приводять до підвищення матеріальних та трудових витрат на кування. Це підвищує собівартість і знижує конкурентоспроможність продукції. Тому слід оптимізувати кількість та вид ковальських операцій, які використовуються для кування днищ. Раціональним є використання спеціальних способів кування днищ, які б дозволяли спростити технологію.

2. Було встановлено, що базовий технологічний процес штампування днищ по технології ПАТ «Енергомашпецсталь» призводить до значної різновтовщинності стінки, а також викривленню форми поковки, що потребує призначення додаткових припусків, а відповідно це призводить до збільшення витрат металу.

3. Для теоретичного дослідження був використаний метод скінченних елементів (МСЕ), який може точно моделювати тривимірні процеси деформування. Розроблено методика теоретичного дослідження процесу роздачі днища на базі МСЕ. Методика дозволяє встановити деформований стан, силові параметри, формозміну у процесі роздачі пустотілої конусної заготовки сферичною плитою. Розроблена методика дозволяє скоротити обсяг експериментальних досліджень у 3-5 разів. Параметром оптимізації була обрана

відносна різнотовщинність заготовки  $\Delta s/t$ , яка оцінює можливість отримання поковки необхідної форми з мінімальними припусками.

4. Для перевірки результатів теоретичного дослідження розроблено методику експериментального дослідження із застосуванням свинцевих моделей. Ця методика призначена для верифікації отриманих теоретичних результатів. На базі цих досліджень розроблятиметься новий технологічний процес штампування крупногабаритних днищ.

5. Встановлено, що відносна висота заготовки незначно впливає на різнотовщинність поковки. Зі збільшенням відносного внутрішнього діаметра отвору заготовки різнотовщинність зменшується особливо для високих заготовок. Було встановлено, що на потоншення стінки у верхній частині днища при роздачі переважний вплив має внутрішній діаметр отвору конусної заготовки ( $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ ). Задля забезпечення заданої товщини стінки поковки після роздачі конусної заготовки сферичною плитою ефективними виявилися такі геометричні параметри вихідної конусної заготовки:  $\frac{D_{\text{отв}}}{D_{\text{сф}}}=0,7$ ;  $\frac{H}{D_{\text{сф}}}=0,7$ ;  $\frac{D}{D_{\text{сф}}}=0,85\dots 0,9$ . Розміри вихідної заготовки в цих діапазонах можна використовувати як рекомендації для розробки нового технологічного процесу штампування днищ сферичною плитою.

6. Нижні діаметри заготовки ( $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$  і  $d/D_{\text{сф}}$ ) не впливають на формозміну заготовки при роздачі, тому прийняті не значущими, що підтверджується коефіцієнтом рівняння регресії (3.1). Для запобігання утворення складок рекомендується прийняти внутрішній нижній діаметр отвору ( $d_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ ) у діапазоні  $0\dots 0,2$ , а  $d/D_{\text{сф}}=0,25$ .

7. Розроблена номограма для визначення зовнішнього діаметра заготовки після роздачі конусною плитою ( $D/D_{\text{сф}}$ ) через відносну товщину днища ( $S_{\text{к}}/D_{\text{сф}}$ ) та відносний внутрішній діаметр заготовки ( $D_{\text{отв}}/D_{\text{сф}}$ ).

8. Встановлена закономірність змінення зовнішнього діаметра конусної заготовки ( $D/D_{\text{сф}}$ ) від кута конусності вихідного зливка  $\beta$  при роздачі конусним пуансоном, яка дозволяє визначати кут конусності вихідного зливка перед

роздачою, що дозволить виготовляти днища з мінімальними припусками на механічну обробку. Встановлено оптимальну геометрію зливка до роздачі:  $d_{\text{отв}}/D = 0,2$ ;  $d/D = 0,25$ ;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\beta = 28^\circ$ .

9. Порівняльний аналіз розглянутих способів роздачі дозволив встановити, що мінімальну нерівномірність розподілу деформацій і зусилля деформування забезпечують спосіб деформування вирізним бойком з увігнутістю.

10. Було експериментально підтверджено, що зі зменшенням товщини стінки зусилля зростає, а застосування операції роздачі конусним пуансоном дозволяє знизити зусилля деформування на 20...30%. Результати експериментальних досліджень підтверджують результати теоретичного дослідження з похибкою 5..10%.

11. В результаті комплексу теоретичних та експериментальних досліджень були розроблені рекомендації для проектування технологічного процесу кування днища конусним та сферичним пуансоном. Розроблено новий технологічний процес виготовлення поковки типу «Днище» з використанням порожнистого глуходонного зливка, операцією роздачі конусним та сферичним пуансоном. Розроблено методику проектування та розроблено оснащення для реалізації нового технологічного процесу.

12. В результаті порівняння нового технологічного процесу з існуючим можна зробити висновок, що з економічної точки зору даний спосіб ефективний і дозволяє економити 16% металу, порівняно з існуючою технологією. Про це свідчать покращені показники коефіцієнта виходу придатного та коефіцієнта використання металу. Розроблений технологічний процес та оснащення для його реалізації апробовано та впроваджено на ПАТ «Енергомашспецталь».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. 1204296 СРСР, МПК В 21 D 22/20 . Спосіб штампування куполоподібних днищ / О.О. Смірнов, Е.Л. Мельников, А.А. Сафронов, В.С. Головін (СРСР). - № 3668651/25-27; заявл. 2.12.83; опубл. 15.01.86; Бюл. №2. - 2 с.: іл.
2. Пат. 871900 СРСР, МПК В 21 D 22/20 Спосіб виготовлення великогабаритних днищ / С. Т. Лії, Ю. І. Козлов, М. С. Сапотницький, Ю.Г. Токарев І.Г. Трухін (СРСР). – №2755434/25-27 заявл. 18.04.79; опубл. 15.10.81; Бюл. № 38. - 2 с.: іл.
3. Пат. 2412777, МПК В21К21/02 , В21J1/04 Спосіб виготовлення поковки днища (кришки) реактора зі злитка /. Онищенко О.К.; заявник та патенто-власник Онищенко О.К. - №2009139368/02; заявл. 27.10.2009; опубл. 27.02.2011; Бюл. № 20. - 6 с.: іл.
4. Пат. 86882 Україна, МПК В21J 5/00 Спосіб кування великих днищ /. О.Є. Марков, М.О. Маркова.; власник О.Є. Марків - № 09699; заявл. 5.08.2013; опубл. 10.01.2014; Бюл. № 1. - 6 с.: іл.
5. Пат. 545406, МПК В 21 D 22/0 2 Спосіб штампування сферичних, еліптичних та інших куполоподібних днищ / Е. Л. Мельников, В. С. Головін та В. В. Буренків; власник Е. Л. Мельников, В. С. Головін та В. В. Буренков (СРСР). - № 2160561/27заявл. 04.08.75; опубл. 5.02.77; Бюл. № 5. - 3 с.:іл
6. Пат. 79728 Україна, МПК В21J 1/04 Спосіб кування осесиметричних виробів локальним деформуванням / Єфімов М. В., Селютін О. А., Панов В.В., Бугайов С. П., Лобанов О. І, Гунько М. І.; власник Єфімов М. В. – № 13550; заявл. 26.11.2012; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8. - 5 с.: іл.
7. Пат. 978976, МПК В 21 D 19/12, Спосіб виготовлення днищ балонів / Н. В. Пирогов, Н. М. Перельмутер, Н. І. Мохначов; власник Н. В. Пи рогів (СРСР). - № 3239730/25-27 заявл. 13.02.81; опубл. 7.12.82; Бюл. № 45. - 4 с.: іл.

8. Пат. 1371740 СРСР, МПК В 21 D 22/2 0, Спосіб виготовлення днищ / Є. Д. Горохів, В. Д. Ареф'єв, А. В. Пакало, С. І. Данилін; власник О. Д. Горохів (СРСР). - № 4104099/25-27 заявл. 12.08.86; опубл. 07.02.87; Бюл. № 5. - 3 с.: іл.
9. Ромашко Н. І. Розробка технології виготовлення великогабаритних товстих плит та витяжки безшовних днищ великого діаметра / Н. І. Ромашко, А. Г. Токарєв, О. А. Кобелєв // Ковальсько-штампувальне виробництво. - 2008. - № 7. - С. 22-26.
10. А.с. 1225116 СРСР, МКІ У 21 J 5/00. Спосіб виготовлення великогабаритних днищ / Кальченко П.П., Овчаренко К.К., Анохін О.М.; заявник і патентовласник Краматорський завод «Енергомашспецсталь». - №3807314/25-27; опубл.9.08.84; Бюл. № 21 - 2 с.
11. Останін В. Г. Нова технологія кування поковок типу днищ і горловин / В. Г. Останін, Н. Є. Сідоров // Ковальсько-штампувальне виробництво, 1966. - № 2 - С. 7-8
12. Tsukada H. Ultra-large size austenitic stainless steel forgings for fast breeder reactor: development, manufacturing and properties achieved / H. Tsukada, K. Suzuki, I. Sato, R. Miura // Nuclear Engineering and Design. - North-Holland, Amsterdam, 1986. - P.495-503.
13. J. Terhaar. Heavy Forgings for the Nuclear Primary Loop in SA-508 Gr.3 Cl.2  
– Development and Manufacture at Saarschmiede // J. Terhaar, J. Jarolimeck, J. Poppenhäger, M. Hümbert, D. Bokelmann, C. Halmen, V. Wagner/ 7th Dialogue Forum; 2013 – (Saarschmiede GmbH Freiformschmiede, Völklingen, Saarland, Germany). – P. 370-375.
14. S. Onodera. Manufacturing of ultra-large diameter 20MnMoNi55 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada, H. Moritani, K. Suzuki, I. Sato // Nuclear Engineering and Design. - North-Holland, Amsterdam, 1985 (The Japan Steel Works, Ltd., Tokyo, Japan). - P.261-272.

15. Chen Zhi-ying. Numerical Simulation and Experimental Studies on Nuclear

Water Chamber Head Forming Processes // Chen Zhi-ying, Ren Yun-lai, Niu Long-jiang, Yu Zhong-hai / School of Mechanical Engineering, 2002. - (Shanghai Dianji University, Shanghai, China) - P . 151-154.

16. I. Sato. Manufacturing and material properties forgings for the high temperature engineering test reactor // I.Sato, K.Suzuki Nuclear Engineering and Design, 1985. – (The Japan Steel Works, Ltd., Tokyo, Japan). – P.46–56.

17. Yasuhiko Tanaka, Ikuo Sato. (2011). Development of high purity large forgings for nuclear power plants // The Japan Steel Works, Ltd., 1-11-1 Osaki, Shinagawa, Tokyo 141-0032, Japan.

18. K. Suzuki. Current steel forgings and their properties for steamgenerator of nuclear power plant //K. Suzukia, I. Sato, M. Kusuhashi, H. Tsukada / Nuclear Engineering and Design, 1999. – (The Japan Steel Works, Ltd., Tokyo, Japan). – P.15–23.

19. I. Lee. Development of a shape forging technique for the APR1400 nuclear vessel heads // Insoo Lee, Dojin Cha, Jihan Ju, Jonghyun Choi, Youngdeak Kim, Dongyoung Kim, Youngkee Baek, Dongkwon Kim, Junghoon Lee / Creusot forge: forty years of expertise in nuclear industry, 2011. – (Doosan Heavy Industries & Construction, Changwon, Gyeongnam and South Korea). – P. 376-380.

20. K. Suzuki. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV//K. Suzukia, I. Sato, H. Tsukada/ Nuclear Engineering and Design, 1992. – (The Japan Steel Works, Ltd., Tokyo, Japan). – P.513–522.

21. M. Toulze. The Extrusion of Integral Nozzles in Large Pressure Vessel Forgings // M. Toulze, J. Talamantes-Silva, M. Kearney, P Davies and M. Talamantes-Silva / Sheffield Forgemasters International Ltd, 2013. – (PO Box 286, Brightside Lane, Sheffield, S9 2RW, UK). – P.381-385.

22. Кобелєв О. А. Розробка ефективних ресурсозберігаючих технологій виробництва великогабаритних плит та виробів з них: Автореф. дис. докт. техн. наук. - Москва, 2010. - 10 с.

23. Wang Bao-zhong. Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel // Wang Bao-zhong, Liu Kai-quan, Liu Ying, Zhang Wenhui, Zhao De-li / China first heavy industries fulaerji, 2008. – (Tianjin heavy industries research & development co., Ltd Tianjin China). – P. 391-396.

24. W. Haselhoff, Ch. Maidorn and J. Meyer Zu Heringdorf (1986). Experience With The Fabrication Of Thick-Walled Forgings Of X5CrNi 13 4 For The Primary Circuit Of Pressurized Water Reactors // Schmiedewerke Krupp-Kl'ockner GMBH, osnabruf~ck, fed. Rep. Germany

25. Кобелєв О. А. Технологія виготовлення цільнокованих великогабаритних плит та безшовних днищ / О. А. Кобелєв // Металург. - 2009. - № 12. - С. 55-58.

26. Пат. 501811, МПК В 21 D 22/02 , Штамп для штампування сферичних днищ / Ю.М. Зверєв, В. І. Чеверєв та В.М. Кулагін (СРСР). - № 1996782/25-27 заявл. 12.02.1974; опубл. 5.02.1976; Бюл. № 5. - 2 с.: іл.

27. Пат. 511127, МПК В 21D 51/24, Спосіб виготовлення товстостінних днищ / М. В. Березин; власник М. В. Березін (СРСР). - № 1698532/27 заявл. 13.09.71; опубл. 25.04.76; Бюл. № 15. - 2 с.: іл.

28. Пат. 123929, МПК В 21D 22/02, Штамп для витяжки днищ / В.М. Потулів; власник В.М. Потулов (СРСР). - 622110/25 заявл. 17.04.59; опубл. 18.08.60; Бюл. № 22. - 2 с.: іл.

29. Пат. 1706751, МПК У 21D 22/20, Пуансон для гарячої витяжки днищ / О.В. Бакієв, Р.Г. Різванов, Р.Г. Абдєєв; заявник та патентовласник Уфінський нафтовий інститут (СРСР). - 4780360/27 заявл. 15.11.89; опубл.23.01.92, Бюл. №3 - 6 с.: іл.

30. Пат. 2201831, МПК В21D22/18 , В21D51/24 Спосіб ротаційного видавлювання днищ та пристрій для його здійснення / Артемів М.С., Баландін Ю.Є. ; заявник і патентовласник ВАТ "Тамбовський завод "Комсомолець" ім.

М.С. Артемова" (RU). - № 35695988/02; заявл. 01.05.2000; опубл. 20.11.2001, Бюл. № 45. – 5 с: іл.

31. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. Development of a new process for expanding stepped tapered rings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2 (1-98). pp. 39-46. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>.

32. Markov O., Gerasimenko O., Khvashchynskiy A., Zhytnikov R., Puzyr R. Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3 (1-99). pp. 42-48. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>.

33. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirska L. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radialbackward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5 (1-101). pp. 49-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>.

34. Markov O., Panov V., Karnaukh S., Khvashchynskiy A., Zhytnikov R., Kukhar V., Kosilov M., Rizak P. Determining the deformed state in the process of rolling conical shells with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (1-108). pp. 34-41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216523>.

35. Hrudkina N., Aliiev I., Markov O., Savchenko I., Sukhovirska L., Tahan L. Designing a kinematic module with rounding to model the processes of combined radial-longitudinal extrusion involving a tool whose configuration is complex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2 (1-110). pp. 81-89. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227120>.

36. Wu Yunjian, Dong Xianghuai, Yu Qiong. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 93. pp. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>.

37. Sizek H. W. Radial Forging. *Metalworking: Bulk Forming*. 2005. pp. 172–178. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14a.a0003984>.
38. Markov O., Kosilov M., Panov V., Kukhar V., Karnaukh S., Ragulina N., Bochanov P., Rizak P. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6 (1-102). pp. 19-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>.
39. Ghaei A., Movahhedy M. R., Karimi Taheri A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel. *Materials & Design*. 2008. № 29. pp. 867–872. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.03.013>.
40. Fan Lixia, Wang Zhigang, Wang He. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014. Vol. 16. Is. 2. pp. 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.01.005>.
41. Allieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhibankov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2 (1-104). pp. 15-22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>.
42. Burkin S. P., Korshunov E. A., Kolmogorov V. L., Babailov N. A., Nalesnik V. M. A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuously-cast ingots. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. № 58. pp. 170–173. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02146-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02146-9).
43. Sanjari M., Saidi P., Karimi Taheri A., Hossein-Zadeh M. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test. *Materials and Design*. 2012. Vol. 38. pp. 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.048>.
44. Knauf Frederik, Nieschwitz Paul-Josef, Holl Albrecht, Pelster Hans, Vest Rolf. Latest Development in Railway Axle and Thick-Walled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMXP. pp. 215–220.
45. Koppensteiner Robert, Tang Zack. Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product. pp. 225–229.

46. Sheu Jinn-Jong, Lin Su-Yi, Yu Cheng-Hsien. Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. *Procedia Engineering*. Vol. 81. pp. 688–693.

47. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Malii K., Sukhovirska L., Kuznetsov M. Predicting the shape formation of parts with a flange and an axial protrusion in the process of combined aligned radial-direct extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5 (1-107). pp. 110-117. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212018>.

48. Li Yong, He Ting, Zeng Zhixin. Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thin-walled copper tube with axially inner micro grooves by radial forging. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213. pp. 987–996. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.002>.

49. Li Yong, Huang Jinlong, Huang Guangwen, Wang Wei, Chen Jucong, Zeng Zhixin. Comparison of radial forging between the two- and three-split dies of a thin-walled copper tube during tube sinking. *Materials and Design*. 2014, Vol. 56. pp. 822–832. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.079>.

50. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radialdirect extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3 (1-105). pp. 17-22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>.

51. Pantalé Olivier, Gueye Babacar. Influence of the Constitutive Flow Law in FEM Simulation of the Radial Forging Process. *Journal of Engineering*. Volume 2013. Article ID 231847. 8 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>.

52. Kowalski J., Hoderny B. Experimental Investigation Of The Strain State In The Ring-Forging Process. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1987. Vol. 14. pp. 309–324. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(87\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0378-3804(87)90016-7).

53. Zhang Qi., Jin Kaiqiang, Mu Dong, Ma Pengju, Tian Jie. Rotary swaging forming process of tube workpieces. 11th International Conference on Technology

of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. pp. 2336–2341.

54. Wang Z. G. The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel. Nanjing University of Science and Technology. 2011. pp. 28–30.

55. Linardon C., Favier D., Chagnon G., Gruez B. A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. Is. 2. pp. 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.021>.

56. Khayatzadeh S., Poursina M., Golestanian H. A Simulation of Hollow and Solid Products in Multi-Pass Hot Radial Forging Using 3D-FEM Method. *Int J Mater Form*. 2008. Suppl 1. pp. 371–374. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0072-6>.

57. Sekiguchi Akio, Ozer Abdullah, Arai Hirohiko. Experimental implementation and analysis of robotic metal spinning with enhanced trajectory tracking algorithms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2012. Vol. 28. Is. 4. pp. 539–55. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.12.003>.

58. Polyblank James A., Allwood Julian M. Parametric toolpath design in metal spinning. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 64. Is. 1. pp. 301–304. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.077>.

59. Music O., Allwood J. M., Kawai K. A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. Is. 1. pp. 3–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.021>.

60. Automatische Schwenkformmaschine Modell AST. Lizenz Autospin/ Kieserling Kieserling & Albrecht GmbH & Co. KG, 1989. – 4s.

61. Теорія обробки металів тиском : навчальний посібник / Л. М. Соколов, С. Г. Прийменко, С. В. Мартинов, П. Абхари. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – 236 с.

62. Гринкевич В.А. Краткий обзор современных методов решения краевых задач обработки металлов давлением и основные тенденции их развития /

В.А. Гриневич, В.Н. Данченко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – С. 113–115.

63. Жульєв С.І. Застосування методів математичного моделювання для вибору оптимальної геометрії ковальських злитків/С.І. Жульєв, Є.І. Бузінов// Технол. машинобудування. - 2006. - № 4. - С. 5-8.

64. Жульєв С.І. Система автоматизованого проектування процесів кристалізації та кування злитків / С.І. Жульєв, Є.І. Бузінов, М.Є. Живов// Технол. машинобудування. - 2003. - № 2. - С. 3-6.

65. Іванов К.М. Оцінка точності пружнопластичного аналізу методу кінцевих елементів/К.М. Іванов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2002. – С. 57–62.

66. Орлов Г.А. Звичайно-елементне уявлення напруг у процесах вісесиметричної пластичної деформації / Г.А. Орлов, В.П. Федоров // Вісті вузів. Чорний металургії. - 1988. - № 8. - С. 49-52.

67. Тюрін В.А. Світова вузівська наука - інноваційним технологіям кування / В.А. Тюрін, В.В. Овечкін // Вісті вузів. Чорний металургії. - 2002. - № 3. - С. 45-48.

68. Mori Ken-ichiro. Some improvemens of the Rigid / Ken-ichiro Mori, Susumo Shima, Kozo Osakada // Plastic Finite Element Method Journal of the Japan society for Technologie of Plasticity. – 1980. – Vol 21. – № 234. – P. 593.

69. Немзер Г.Г. Исследование теплофизических свойств стали / Г.Г. Немзер, М.А. Аронов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – № 3. – С. 26–30.

70. Towards an optimisation of forging processes using geometric parameters / Ibrahim Khoury, Giraud-Moreau Laurence, Pascal Lafon, Carl Labergere // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – Vol. 177. – P. 224–227.

71. Just Hendrik. Blick in das Innere eines Freiformschmiedeprozesses / Hendrik Just // Stahl und Eisen. – 2006. – Vol.126 – P. 70–72.

72. Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis / S.K. Choi, M.S. Chun, C.J. Van Tyne, Moon Y.H. // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – № 1. – P. 88–95.

73. Новий принцип розробки САПР ТП кування / А.В. Коновалов, С.В. Арзамасцев, О.Ю. Муйземнек [та ін] // Ковальсько-штампувальне виробництво. Обробка матеріалів тиском. – 2007. – № 1. – С. 42–47.

74. Юст Х. Сутність процесу вільного кування / Х. Юст // Чорна металургія. – 2007. – С. 46–48.

75. Зенкевич О. Методи кінцевих елементів у техніці / О. Зенкевич. - М.: Світ, 1975. - 541 с.

76. Тюрін В.А. Теорія обробки металів тиском: підручник для вузів / В.А. Тюрін, А.І. Мохів. - ВолгДТУ, Волгоград. - 2000. - 416 с.

77. Марков О. Є. Ресурсозберігаючі технологічні процеси кування великих валів і плит: монографія / О. Є. Марков, І. С. Алієв. - Краматорськ: ДДМА, 2012. - 324 с. - ISBN 978-966-379-583-6.

78. Рябічова Л.А. Застосування методу термомеханічних коефіцієнтів до аналізу напружено-деформованого стану при гарячому осаді // Л.А. Рябічова, Д.А. Усатюк // Вісн. Східноукраїнський нац. ун-ту ім. В. Даля. - 2006. - № 6 (100). – Ч. 1. – С. 45–49.

79. Гринкевич В.А. Застосування дискретного методу змінної в'язкості для моделювання пластичної деформації металів зі складною реологією / В.А. Гринкевич // Теорія та практика металургії. - 2001. - № 5. - С. 25-29.

80. Міленін А.А. Моделювання процесів тривимірної деформації неоднорідних матеріалів за допомогою методу кінцевих елементів / О.О. Міленін, В.Т. Підвисоцький // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні: зб. наук. праць. – Крама-Торськ, 2000. – С. 21–23.

81. Рябічова Л.А. Математичне моделювання вільного осідання мідної заготівлі методом кінцевих елементів / Л.А. Рябічова, Д.А. Усатюк // Метал та лиття України. – 2004. – № 11. – С. 35–38.

82. Біба Н.В. Застосування програми моделювання процесів ЗМД QFORM для навчання та дослідницької роботи в університетах / Н.В. Біба, Ю.А. Гладков, О.А. Білокуров // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С. 9–14.

83. Голенков В.А. Методи математичного моделювання та нові завдання ОМД / В.А. Голенков, П.Г. Морєв, С.Ю. Радченко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. праць. - Краматорськ: ДДМА, 2008. - С. 15-19.

84. Condition of closing voids in solid cylinders during hot forging / C. Zhenshan, R Guangsheng, X. Binqye [and other] // Tsinghua Univ. Sci. and Technol. – 2003. – № 2. – P. 227–229.

85. Weides G. Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation / Weides G., Blaes N., Bokelmann D. // 17 International Forge Masters Meeting, Santander, Spaine, 3-7 Nov. 2008.

86. Бочаров Ю.А. Другий європейський семінар із моделювання процесів в обробці тиском / Ю.А. Бочаров, В.І. Балаганський // Ковальсько-штампувальне виробництво. - 2002. - № 9. - С. 38-41.

87. Комп'ютерне моделювання процесів обробки металів тиском. Чисельні методи/В.М. Данченко, О.О. Міленін, В.І. Кузьменко [та ін.]. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. - 448 с.

88. Hartley P. Numerical simulation of the forging process / P. Hartley, I. Pillinger // Comput. Meth. Appl. Mech. and Eng. – 2006. – Vol. 195. – P. 6676–6690.

89. Грешнов В.М. Застосування теорії пластичності ізотропного матеріалу з анізотропним зміцненням при математичному моделюванні операцій формоутворення / В.М. Грешнов, А.М. Боткін, А.В. Напалков // Вісті вузів. Чорний металургії. - 2000. - № 1. - С. 27-30.

90. Дія Х. Forge 3 у моделюванні процесів обробки тиском / Х. Дія // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. - С. 23-33.

91. Міленін А.А. Проблеми розробки та застосування тривимірних чисельних моделей для оптимізації процесів прокатки / О.О. Міленін // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. - С. 36-46.

92. Markov O. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method / Oleg Markov, Oleksiy Gerasimenko, Leila Aliieva, Alexander Shapoval // «EUREKA: Physics and Engineering», 2019, N 2. – P. 52–60. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00877.

93. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forgings produced / G. Banaszek, A.A. Milenin, H. Dyja, S. Mroz // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – С. 237–244.

94. Іванов К.М. Метод кінцевих елементів у технологічних завданнях ЗМД: навч. посібник / Іванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Е.Є. СПб.: ПИМаш, 2000. - 224 с.

95. Hardening in relation with microstructure evolution of high purity  $\alpha$ -titanium deformed under monotonic and cyclic simple shear loadings at room temperature / S. Bouviera, N. Benmhenni, W. Tirry [and other] // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 535 – P. 12–21.

96. Effect of prior strain on continuous recrystallization in AZ31 magnesium alloy after hot deformation / Xuyue Yang, Yasumasa Okabe, Hiromi Miura, Taku Sakai // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 535. – P. 209–215.

97. Hot deformation behavior and cold workability of Cu–12Mn–13Zn–1Sn–1Al–0.1Si–0.1Ce alloy with white chromaticity / Na Liu, Zhou Li, Genying Xu [and other] // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 553. – P. 67–73.

98. Dariusz Kuc. Influence of deformation parameters and initial grain size on the microstructure of austenitic steels after hot-working processes / Dariusz Kuc,

Grzegorz Niewielski, Jan Cwajm // *Materials Characterization*. – 2006. – Vol. 56. – P. 318–324.

99. Jorge-Badiola D. Study by EBSD of the development of the substructure in a hot deformed 304 stainless steel / D. Jorge-Badiola, A. Iza-Mendi, I. Guti'erez // *Materials Science and Engineering A*. – 2005. – Vol. 394. – P. 445–454.

100. Constitutive equation for elevated temperature flow behavior of TiNiNb alloy based on orthogonal analysis / Meili Xiao, Fuguo Li, Wei Zhao, Genlin Yang // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 35. – P. 184–193.

101. Kugler G. Modeling the dynamic recrystallization under multi-stage hot deformation / G. Kugler, R. Turk // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – P. 4659–4668.

102. Platt J.P. Grainsize evolution in ductile shear zones: Implications for strain localization and the strength of the lithosphere / J.P. Platt, W.M. Behr // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – P. 4659–4668.

103. Effect of Shear Deformation on Microstructural Evolution of Ni-30Fe Alloy during Hot Deformation / Jae-Young Cho, Tadanobu Inoue, Fuxing Yin, Kotobu Nagai // *Materials Transactions*. – 2004. – Vol. 45. – P. 2966–2973.

104. Brand A.J. Microstructural Simulation of Nickel Base Alloy Inconel 718 in Production of Turbine Discs / A. J. Brand, K. Karhausen, R. Kopp // *Materials Science and Technology*. – 1996. – Vol. 12. – P. 963–969.

105. Zhou L.X. Effects of Dynamic and Metadynamic Recrystallization on Microstructure of Wrought IN718 due to Hot Deformation / L. X. Zhou, T.N. Baker // *Materials Science and Engineering A*. – 1995. – Vol. 196. – P. 89–95.

106. The Hot Deformation Behavior of an As-Cast Alloy 718 Ingot / M.J. Weis, M. C. Mataya, S. W. Thompson, D. K. Matlock // *Superalloy 718 – Metallurgy and Applications*. – 1989. – P. 135–154.

107. Metallurgical Aspects of Forge Modeling in Alloy 718 / P. E. Mosser, G. Leconte, J. Leray, A. Lasalmonie // *Superalloy 718 – Metallurgy and Applications*. – 1989. – P. 179–188.

108. Microstructural Modeling of Metadynamic Recrystallization in Hot Working of IN 718 Superalloy / S. C. Medeiros, Y. V. R. K. Prasad, W. G. Frazier, R. Srinivasan // *Materials Science and Engineering A*. – 2000. – Vol. 293. – P. 198–207.
109. Mathematical Modeling of the Hot-Deformation Behavior of Superalloy 718 / J.M. Zhang, Z.Y. Gao, J.Y. Zhuang, Z.Y. Zhong // *Metallurgical and Materials Transactions A* – 1999. – Vol. 30A. – P. 2701–2712.
110. Zhao D. High Temperature Deformation Behavior of Cast Alloy 718 / D. Zhao, S. Guillard, A. T. Male // *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. – 1997. – P. 193–204.
111. Grain Growth Model of IN718 During Holding Period after Hot Deformation / J. M. Zhang, Z. Y. Gao, J. Y. Zhuang, Z. Y. Zhong // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 101. – P. 25–30.
112. Fei Chen. Recrystallization of 30Cr2Ni4MoV ultra-super-critical rotor steel during hot deformation. Part III: Metadynamic recrystallization / Fei Chen, Zhenshan Cui, Dashan Sui, Bo Fu // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 540. – P. 46–54.
113. Prediction of mechanical properties of heavy forgings / J. Sinczak, J. Majta, M. Glowacki, M. Pietrzyk // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – Vol. 80–81. – P. 166–173.
114. Jeong H.S. Microstructure prediction of Nimonic 80A for large exhaust valve during hot closed die forging / H.S. Jeong, J.R. Choa, H.C. Park // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 162–163. – P. 504–511.
115. Yong-Soon Janga. Application of the finite element method to predict microstructure evolution in the hot forging of steel / Yong-Soon Janga, Dae-Cheol Kob, Byung-Min Kim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 101. – P. 85–94.
116. Simulation of microstructures for Alloy 718 blade forging using 3D FEM simulator / Young-Sang Na, Jong-Taek Yeoma, Nho-Kwang Park, Jai-Young Lee // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 141. – P. 337–342.

117. Duan Xing-Wang. Microstructure Evolution of Multi-Heat Forging and Numerical Simulation for 316LN Steel / Duan Xing-Wang, Chen Hui-Qin and Liu Jian-Sheng // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 7. – P. 1012–1016.

118. Wen-wu He. Simulation and Analysis on Microstructure Evolution of Large Generator Retaining Ring during Multi-fire Forging / Wen-wu He, Jian-sheng Liu, Hui-qin Chen, Hui-guang Guo // Advanced Materials Research Vols. – 2010. – Vol. 97–101. – P. 176–181.

## Додаток А – Матриця планування у закодованому вигляді

N	Код				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	-1	+1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	-1	-1	-1	-1
5	-1	+1	-1	+1	+1
6	+1	-1	-1	+1	+1
7	+1	+1	+1	-1	-1
8	-1	-1	+1	-1	-1
9	-1	+1	+1	+1	-1
10	+1	-1	+1	+1	-1
11	+1	+1	-1	-1	+1
12	-1	-1	-1	-1	+1
13	-1	+1	+1	-1	+1
14	+1	-1	+1	-1	+1
15	+1	+1	-1	+1	-1
16	-1	-1	-1	+1	-1
17	0	0	0	0	0
18	+1	0	0	0	0
19	-1	0	0	0	0
20	0	+1	0	0	0
21	0	-1	0	0	0
22	0	0	+1	0	0
23	0	0	-1	0	0
24	0	0	0	+1	0
25	0	0	0	-1	0
26	0	0	0	0	+1
27	0	0	0	0	-1

## Додаток Б – Програма у системі MathCad 7

<u>ORIGIN</u> := 1	Константи для определения коэффициентов регрессии
Количество опытов := 27	O1 := 0.03704    O3 := 0.07220
Количество факторов := 5	O2 := 0.04811    O4 := 0.06250
Матрица планирования эксперимента	Значения отклика функции
Хартля	
x :=	y :=
$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.59 \\ 1.1 \\ 0.716 \\ -0.23 \\ 1.23 \\ 0.32 \\ -0.25 \\ 0.9 \\ 0.83 \\ -0.153 \\ -0.07 \\ 1.13 \\ 0.69 \\ -0.36 \\ 0.34 \\ 1.27 \\ 1.02 \\ -0.1 \\ 1.08 \\ 0.49 \\ 0.74 \\ 0.63 \\ 0.66 \\ 0.59 \\ 0.46 \\ 0.42 \\ 0.53 \end{pmatrix}$

## Коэффициенты уравнения регре

121

$$b1 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot y_i) \quad b2 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot y_i) \quad b3 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,3} \cdot y_i)$$

$$b4 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,4} \cdot y_i) \quad b5 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,5} \cdot y_i)$$

$$b1 = -0.426 \quad b2 = -7.265 \times 10^{-3} \quad b3 = -0.067 \quad b4 = 0.151 \quad b5 = 0.053$$

$$b12 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,2} \cdot y_i) \quad b13 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,3} \cdot y_i) \quad b14 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,4} \cdot y_i)$$

$$b15 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,5} \cdot y_i) \quad b23 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot x_{i,3} \cdot y_i) \quad b24 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot x_{i,4} \cdot y_i)$$

$$b25 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot x_{i,5} \cdot y_i) \quad b34 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,3} \cdot x_{i,4} \cdot y_i) \quad b35 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,3} \cdot x_{i,5} \cdot y_i)$$

$$b45 := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,4} \cdot x_{i,5} \cdot y_i)$$

$$b12 = 0.123 \quad b13 = 0.018 \quad b14 = 0.063 \quad b15 = 0.021 \quad b23 = 0.04$$

$$b24 = 0.05 \quad b25 = 0.025 \quad b34 = -0.014 \quad b35 = 0.011 \quad b45 = 0.044$$

$$b11 := 03 \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left[ (x_{i,1})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,1})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b22 := 03 \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left[ (x_{i,2})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,2})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{33} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left[ (x_{i,3})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,3})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{44} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left[ (x_{i,4})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,4})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{55} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left[ (x_{i,5})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,5})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{11} = -0.049$$

$$b_{22} = -0.031$$

$$b_{33} = -0.027$$

$$b_{44} = -0.044$$

$$b_{55} = -0.051$$

$$b_0 := O1 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \frac{O1}{O2} \cdot \left[ b_{11} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,1})^2}{n} + b_{22} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,2})^2}{n} + b_{33} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,3})^2}{n} + b_{44} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,4})^2}{n} + \dots \right. \\ \left. + b_{55} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,5})^2}{n} \right]$$

$$b_0 = 0.644$$

Общий вид уравнения регрессии

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 \dots \\ + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 \dots \\ + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 \dots \\ + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5$$

$$y(1, 1, -1, 1, -1) = 0.286$$

$$x_1 := \frac{D - 0.6}{0.1}$$

$$x_2 := \frac{D_0 - 0.1}{0.1}$$

$$x_3 := \frac{H - 0.55}{0.15}$$

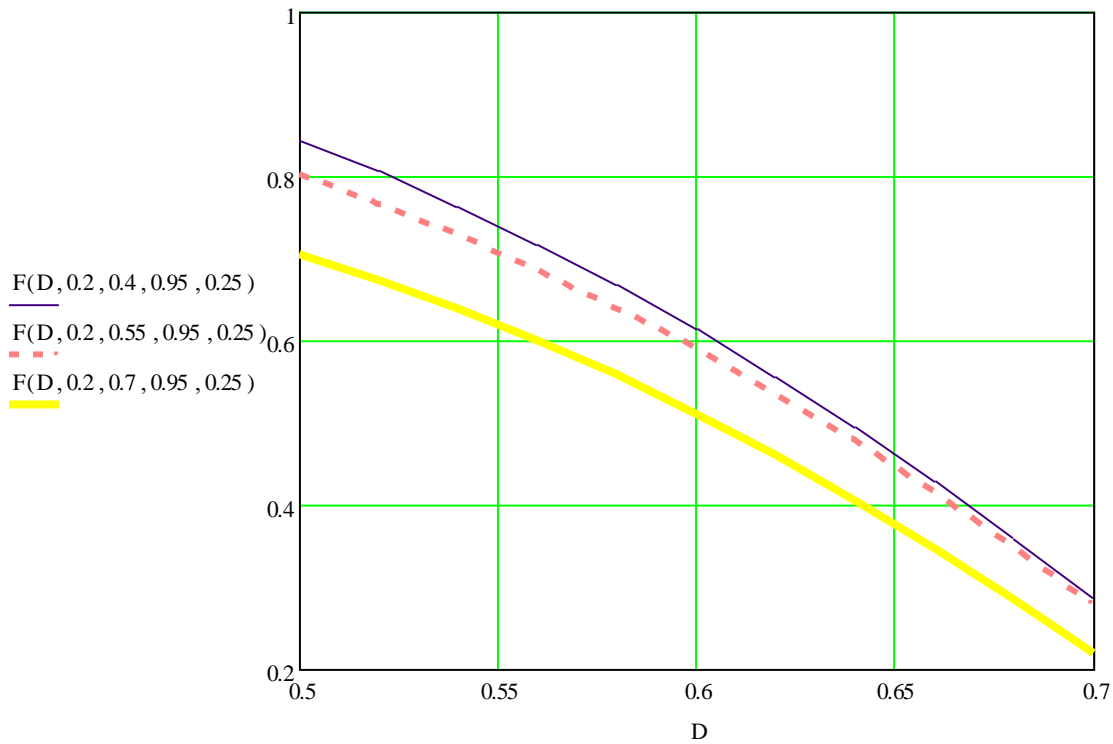
$$x_4 := \frac{D1 - 0.9}{0.05}$$

$$x_5 := \frac{d - 0.275}{0.025}$$

$$\begin{aligned}
 F(D, D0, H, D1, d) := & b_0 + b_1 \cdot \frac{D - 0.6}{0.1} + b_2 \cdot \frac{D0 - 0.1}{0.1} + b_3 \cdot \frac{H - 0.55}{0.15} + b_4 \cdot \frac{D1 - 0.9}{0.05} + b_5 \cdot \frac{d - 0.275}{0.025} \dots \\
 & + b_{11} \cdot \left(\frac{D - 0.6}{0.1}\right)^2 + b_{22} \cdot \left(\frac{D0 - 0.1}{0.1}\right)^2 + b_{33} \cdot \left(\frac{H - 0.55}{0.15}\right)^2 + b_{44} \cdot \left(\frac{D1 - 0.9}{0.05}\right)^2 \dots \\
 & + b_{55} \cdot \left(\frac{d - 0.275}{0.025}\right)^2 + b_{12} \cdot \frac{D - 0.6}{0.1} \cdot \frac{D0 - 0.1}{0.1} + b_{13} \cdot \frac{D - 0.6}{0.1} \cdot \frac{H - 0.55}{0.15} \dots \\
 & + b_{14} \cdot \frac{D - 0.6}{0.1} \cdot \frac{D1 - 0.9}{0.05} \dots \\
 & + b_{15} \cdot \frac{D - 0.6}{0.1} \cdot \frac{d - 0.275}{0.025} + b_{23} \cdot \frac{D0 - 0.1}{0.1} \cdot \frac{H - 0.55}{0.15} + b_{24} \cdot \frac{D0 - 0.1}{0.1} \cdot \frac{D1 - 0.9}{0.05} \dots \\
 & + b_{25} \cdot \frac{D0 - 0.1}{0.1} \cdot \frac{d - 0.275}{0.025} + b_{34} \cdot \frac{H - 0.55}{0.15} \cdot \frac{D1 - 0.9}{0.05} + b_{35} \cdot \frac{H - 0.55}{0.15} \cdot \frac{d - 0.275}{0.025} \dots \\
 & + b_{45} \cdot \frac{D1 - 0.9}{0.05} \cdot \frac{d - 0.275}{0.025}
 \end{aligned}$$

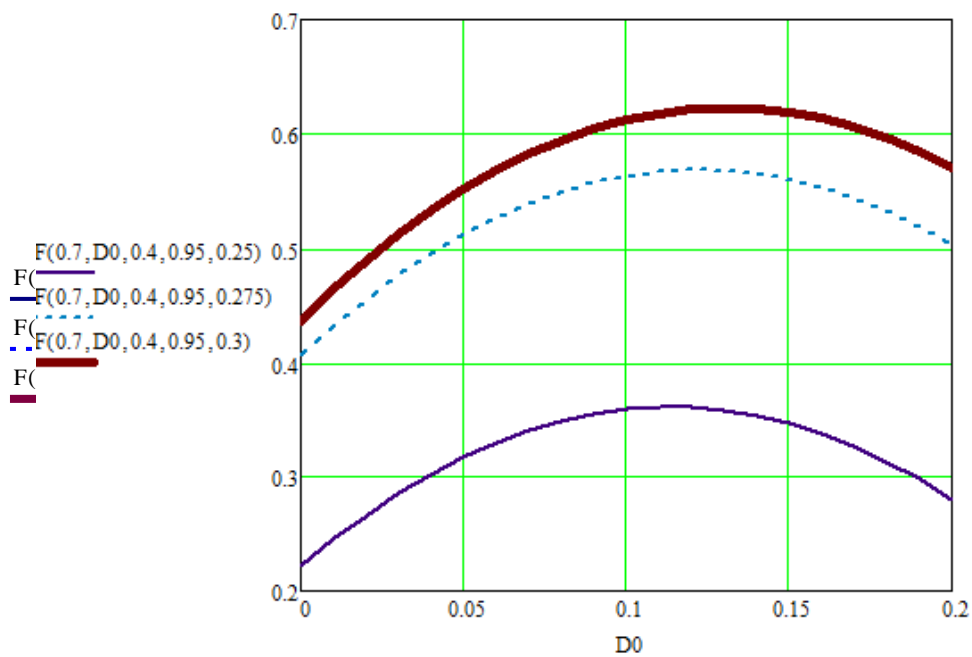
$F(0.7, 0.2, 0.7, 0.95, 0.3) = 0.526$

$D := 0.5, 0.52..0.7$



$D0 := 0, 0.01.. 0.2$

E



# Додаток В – Креслення деталі «Днище»

AM16.05.01.903

Вид сверху  
Для измерительных измерений  
Top view  
For measuring dimensions

Вид сверху  
Линейные размеры  
Top view  
Linear dimensions

Ж(140)

Вид сверху  
Линейные размеры  
Top view  
Linear dimensions

М(10)

AM16.05.01.903

Вид сверху  
Для измерительных измерений  
Top view  
For measuring dimensions

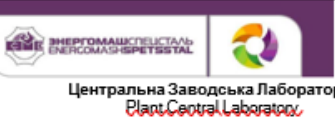

Вид сверху  
Линейные размеры  
Top view  
Linear dimensions

163

1. КИЗЛ. р. 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.



**ДОДАТОК Д – Результати механічних випробувань**

 <p>Центральна Заводська Лабораторія Plant Central Laboratory</p>		КОЛ ВИПРОБУВАНЬ / THE TEST REPORT														
84306, ПАТ «EMSS», м.Краматорськ, Донецькій обл., Україна / 84306, PJSC "EMSS", Краматорськ, Donetsk reg., Україна tel./tel: +38 (06264) 6-51-14; e-mail: czl@emss.dn.ua		ис в журналі № / The log entry No. A/49-22		201293 DСТU ISO/IEC 17025												
назва випробування / Name of the test		випробування механічних властивостей / Testing of mechanical properties														
назва виробу / The product name		вироби / Item No		креслення виробу / Item Drawing No												
Днище заготівля / Bottom blank		15-21117		712321.017/ 1435-20												
назва / Heat No.		421381		матеріал / Material 15Х2МФА-А мод. А / mod. А												
нормативний документ на виріб / Standard for product		5.961-11060-2008, технічні вимоги креслення / ТУ 5.961-11060-2008, technical requirements of drawing														
Метод випробувань / Test procedure																
ГОСТ 1497-84; ГОСТ 9454-78; ГОСТ 9651-84 ; ПНАЕ Г 7-002-86 (Додаток 2 розділ 5)			ГОСТ 1497-84; ГОСТ 9454-78; ГОСТ 9651-84 ; ПНАЕ Г 7-002-86 (appendix 2 section 5)													
Устаткування / Equipment																
Машина випробувальна Z250RED № 196349/2010 (Fmax=250 кН); Машина випробувальна UMP-100 № 1661 (Fmax=100 кН); Копер маятниковий RKP 450GE № 196292/2010 (Kp= 450 Дж)			Testing machine Z250RED No 196349/2010 (Fmax=250 kN); Testing machine UMP-100 No.1661 (Fmax=100 kN); Pendulum impact RKP 450GE No.196292/2010 (Kp= 450 J)													
Кількість зразків згідно технологічного, шт. / Quantity of specimens according to the technical process, ПК. 11																
тип випробування / Type of test		Дані по зразкам для випробувань / Data on test sample														
		без напр. / without direct	подовж. / longit	радіальні / radial	тангенц. / tangent	поперечний. / transv.	тип (Розмір) зразка / type (Size) of specimen									
на розтягування / tensile test		--	--	--	12	--	ГОСТ1497-84 III №4									
на розст. при підвищенні температури / tensile test at elevated temperature		--	--	--	12	--	ГОСТ9651-84 I №4									
на ударний вигин / impact test		--	--	--	144	--	ГОСТ9454-78 11									
на вигин / bend test		--	--	--	--	--	--									
на твердість / hardness test		--	--	--	--	--	--									
Задане значення (вказуються необхідні характеристики) / Preset value (specify the necessary characteristics)																
назва випробування / Name	Умовний меж плинності / Yield Strength	Тимчасове опір / Tensile Strength	Відносне подовження / Percentage elongation after fracture	Відносне звуження / Percentage reduction of area	Тип зразка / Sample type	Ударний вигин / Impact strength				Температура / Temp.	Вигин / Bend	Твердість / Hardness	Відповідає / OK	Не відповідає / Not OK	Інформативно / Informative	Примітка / Note
						Робота удару / Impact energy	Ударна в'язкість / Impact toughness	В'язка складова в зламі / Shear fracture in fracture surface	Лінійне розширення / Linear expansion							
Позначення (місце відбору) проб / Designation (location) of samples	Вр 0.2	Rm	A 5	Z	тип / type	KV	KCV	B	Ab	T	α	HV	OK	Not OK	Inf	Note
Оск. т/о / Sample A (Basic h/t)	430-690	570-770	≥15	≥55	--	--	--	--	--	+20	--	--	--	--	--	--
	≥390	≥490	≥14	≥50	--	--	--	--	--	+350	--	--	--	--	--	--
	--	--	--	--	--	визначення до / determination T до				≤ -20	--	--	--	--	--	--
Проба У (мін. цикл т/о); Проба З (Макс. цикл т/о) / Sample B (мін цикл h/t); Sample C (max cycle h/t)	430-690	≥570	≥15	≥55	--	--	--	--	--	+20	--	--	--	--	--	--
	≥390	≥490	≥14	≥50	--	--	--	--	--	+350	--	--	--	--	--	--
	--	--	--	--	--	визначення до / determination T до				≤ -20	--	--	--	--	--	--
Примітки / Notes																
1) Кількість фактично випробуваних зразків може відрізнятися / 1) The number of actually tested specimens may differ																

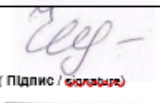

ис в журналі № / The log entry No		Найменування виробу / The product name											вироби / Item No				
A/49-22		Днище заготівля / Bottom blank											15-21117				
Фактичне значення (вказуються необхідні характеристики) / Actual value (specify the necessary characteristics)																	
Позначення (місце відбору) проб Designation (location) of samples	Обозн. Зразка Specimen ID	R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>5</sub>	Z	тип / type	KV	KCV	B	Δb	T	α	НВ	Cor.	Not cor.	Inf.	Note
		MPa / MPa	MPa / MPa	%	%		kJ / J	kJ/cm <sup>2</sup> / J/cm <sup>2</sup>	%	mm / mm	°C	rad. / deg.					
Проба А(П)1 (0°, осн. т/о, тангенц.) / Sample A(П)1 (0°, basic h/t, tangent.)	A(П)1P1	647	747	23	77	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
	A(П)1P2	648	749	22	79	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
	A(П)1P3	552	633	18	76	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
	A(П)1P4	554	636	17	75	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
	A(П)1У7	---	---	---	---	11	---	313	100	2.25	-40	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У8	---	---	---	---	11	---	321	100	2.35	-40	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У9	---	---	---	---	11	---	326	100	2.41	-40	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У10	---	---	---	---	11	---	314	100	2.32	-50	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У11	---	---	---	---	11	---	316	100	2.21	-50	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У12	---	---	---	---	11	---	310	100	2.15	-50	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У13	---	---	---	---	11	---	224	56	1.96	-60	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У14	---	---	---	---	11	---	203	50	1.97	-60	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У15	---	---	---	---	11	---	215	56	2.01	-60	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У16	---	---	---	---	11	---	213	49	1.88	-70	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У17	---	---	---	---	11	---	316	100	2.16	-70	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У18	---	---	---	---	11	---	101	31	0.85	-70	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У19	---	---	---	---	11	---	229	56	2.05	-80	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У20	---	---	---	---	11	---	220	56	2.01	-80	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У21	---	---	---	---	11	---	205	50	1.97	-80	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У22	---	---	---	---	11	---	181	44	1.73	-90	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У23	---	---	---	---	11	---	248	62	2.10	-90	---	---	---	---	x	---
	A(П)1У24	---	---	---	---	11	---	210	50	1.94	-90	---	---	---	---	x	---
	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>ис</sub> ≤ -90°C	---	---	x	---	---
	Проба А(П)2 (180°, осн. т/о, тангенц.) / Sample A(П)2 (180°, basic h/t, tangent.)	A(П)2P1	635	738	23	78	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---
A(П)2P2		637	740	22	78	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
A(П)2P3		548	627	18	75	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
A(П)2P4		538	621	19	76	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
A(П)2У4		---	---	---	---	11	---	320	100	2.34	-30	---	---	---	---	x	---
A(П)2У5		---	---	---	---	11	---	321	100	2.48	-30	---	---	---	---	x	---
A(П)2У6		---	---	---	---	11	---	321	100	2.42	-30	---	---	---	---	x	---
A(П)2У7		---	---	---	---	11	---	316	100	2.22	-40	---	---	---	---	x	---
A(П)2У8		---	---	---	---	11	---	300	100	2.08	-40	---	---	---	---	x	---
A(П)2У9		---	---	---	---	11	---	321	100	2.36	-40	---	---	---	---	x	---
A(П)2У10		---	---	---	---	11	---	323	100	2.37	-50	---	---	---	---	x	---
A(П)2У11		---	---	---	---	11	---	249	70	2.39	-50	---	---	---	---	x	---
A(П)2У12		---	---	---	---	11	---	314	100	2.29	-50	---	---	---	---	x	---
A(П)2У13		---	---	---	---	11	---	294	100	2.12	-60	---	---	---	---	x	---
A(П)2У14		---	---	---	---	11	---	205	50	1.92	-60	---	---	---	---	x	---
A(П)2У15		---	---	---	---	11	---	324	100	2.29	-60	---	---	---	---	x	---
A(П)2У16		---	---	---	---	11	---	235	68	2.17	-70	---	---	---	---	x	---
A(П)2У17	---	---	---	---	11	---	184	44	1.81	-70	---	---	---	---	x	---	
A(П)2У18	---	---	---	---	11	---	194	44	1.92	-70	---	---	---	---	x	---	
A(П)2У19	---	---	---	---	11	---	30	6	0.28	-80	---	---	---	---	x	---	
A(П)2У20	---	---	---	---	11	---	155	19	1.23	-80	---	---	---	---	x	---	
A(П)2У21	---	---	---	---	11	---	10	5	0.08	-80	---	---	---	---	x	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>ис</sub> = -70°C	---	---	x	---	---	

Протокол № / The test report No	Дата випробування / Test date	22.02.2022	Розділ; сторінка в розділ; всього сторінок в розділі / Section; page in section; total pages in section	2	2	5
---------------------------------	-------------------------------	------------	---	---	---	---

ис в журналі № / The log entry No		Найменування виробу / The product name											вироби / Item No					
A/49-22		Днище заготівля / Bottom blank											15-21117					
Фактичне значення (вказуються необхідні характеристики) / Actual value (specify the necessary characteristics)																		
Позначення (місце відбору) проб Designation (location) of samples	Образ, Зразка Specimen ID	R <sub>p0.2</sub>		R <sub>m</sub>	A <sub>5</sub>	Z	тип / type	KV	KCV	B	Δb	T	α	HB	Cor.	Not cor.	Inf.	Note
		МПа / MPa	МПа / MPa	%	%	жк / J		ж/см <sup>2</sup> / J/cm <sup>2</sup>	%	мм / mm	°C	рад. / deg.						
Проба В(П)1 (0°, хв. цикл т/о, тангенс.) / Sample В(П)1 (0°, h/t cycle, h/t, tangent.)	В(П)1P1	585	693	23	79	III, №4	---	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
	В(П)1P2	581	691	25	79	III, №4	---	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
	В(П)1P3	507	583	19	77	I, №4	---	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
	В(П)1P4	503	583	19	77	I, №4	---	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
	В(П)1У1	---	---	---	---	11	---	316	100	2.41	-40	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У2	---	---	---	---	11	---	314	100	2.47	-40	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У3	---	---	---	---	11	---	325	100	2.49	-40	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У4	---	---	---	---	11	---	320	100	2.45	-50	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У5	---	---	---	---	11	---	323	100	2.50	-50	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У6	---	---	---	---	11	---	320	100	2.47	-50	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У7	---	---	---	---	11	---	321	100	2.40	-60	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У8	---	---	---	---	11	---	321	100	2.45	-60	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У9	---	---	---	---	11	---	315	100	2.46	-60	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У10	---	---	---	---	11	---	231	64	2.19	-70	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У11	---	---	---	---	11	---	249	64	2.17	-70	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У12	---	---	---	---	11	---	313	100	2.34	-70	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У13	---	---	---	---	11	---	228	56	2.18	-80	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У14	---	---	---	---	11	---	246	69	2.22	-80	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)1У15	---	---	---	---	11	---	225	56	2.29	-80	---	---	---	---	---	x	---
В(П)1У16	---	---	---	---	11	---	185	44	1.89	-90	---	---	---	---	---	x	---	
В(П)1У17	---	---	---	---	11	---	208	50	2.04	-90	---	---	---	---	---	x	---	
В(П)1У18	---	---	---	---	11	---	218	50	2.22	-90	---	---	---	---	---	x	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>но</sub> ≤ -90°C	---	---	x	---	---	
Проба В(П)2 (180°, хв. цикл т/о, тангенс.) / Sample В(П)2 (180°, h/t cycle, h/t, tangent.)	В(П)2P1	582	692	24	79	III, №4	---	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
	В(П)2P2	591	698	23	79	III, №4	---	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	---
	В(П)2P3	504	580	19	77	I, №4	---	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
	В(П)2P4	499	579	19	77	I, №4	---	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	---
	В(П)2У1	---	---	---	---	11	---	333	100	2.40	-40	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У2	---	---	---	---	11	---	328	100	2.43	-40	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У3	---	---	---	---	11	---	325	100	2.42	-40	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У4	---	---	---	---	11	---	328	100	2.43	-50	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У5	---	---	---	---	11	---	319	100	2.43	-50	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У6	---	---	---	---	11	---	325	100	2.38	-50	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У7	---	---	---	---	11	---	321	100	2.37	-60	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У8	---	---	---	---	11	---	269	73	2.32	-60	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У9	---	---	---	---	11	---	245	66	2.15	-60	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У10	---	---	---	---	11	---	324	100	2.36	-70	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У11	---	---	---	---	11	---	249	64	2.24	-70	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У12	---	---	---	---	11	---	304	100	2.27	-70	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У13	---	---	---	---	11	---	210	52	2.04	-80	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У14	---	---	---	---	11	---	201	50	1.95	-80	---	---	---	---	---	x	---
	В(П)2У15	---	---	---	---	11	---	235	62	2.13	-80	---	---	---	---	---	x	---
В(П)2У16	---	---	---	---	11	---	9	5	0.11	-90	---	---	---	---	---	x	---	
В(П)2У17	---	---	---	---	11	---	200	50	1.79	-90	---	---	---	---	---	x	---	
В(П)2У18	---	---	---	---	11	---	23	12	0.25	-90	---	---	---	---	---	x	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>но</sub> = -80°C	---	---	x	---	---	

Протокол № / The test report No	Дата випробування / Testing date	22.02.2022	Розділ; сторінка в розділі; всього сторінок в розділі / Section; page in section; total pages in section	2	3	5
---------------------------------	----------------------------------	------------	--	---	---	---

ис в журналі № / The log entry No		Найменування виробу / The product name											вироби / Item No				
A/49-22		Днище заготівля / Bottom blank											15-21117				
Фактичне значення (вказуються необхідні характеристики) / Actual value (specify the necessary characteristics)																	
Позначення (місце відбору) проб Освідчення (освідчення) об'єкту	Образ. Зразка Specimen ID	R <sub>p0.2</sub> MPa / MPa	R <sub>m</sub> MPa / MPa	A <sub>5</sub> %	Z %	тип / type	KV J / J	KCV J/cm <sup>2</sup> / J/cm <sup>2</sup>	B %	Δb mm / mm	T °C	α	HB	Cor. Not cor.	Inf.	Note	
																	рад. / deg.
Проба С(П)1 (0°, макс. цикл т/о, тангенц.) / Sample C(П)1 (0°, max. cycle h/t, tangent.)	C(П)1P1	551	668	25	79	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	
	C(П)1P2	552	668	24	79	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	
	C(П)1P3	472	552	18	77	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	
	C(П)1P4	472	556	19	78	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	
	C(П)1У4	---	---	---	---	11	---	328	100	2.50	-40	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У5	---	---	---	---	11	---	331	100	2.52	-40	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У6	---	---	---	---	11	---	330	100	2.48	-40	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У7	---	---	---	---	11	---	328	100	2.56	-50	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У8	---	---	---	---	11	---	333	100	2.44	-50	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У9	---	---	---	---	11	---	341	100	2.54	-50	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У10	---	---	---	---	11	---	321	100	2.38	-60	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У11	---	---	---	---	11	---	331	100	2.51	-60	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У12	---	---	---	---	11	---	329	100	2.47	-60	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У13	---	---	---	---	11	---	191	46	1.88	-70	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У14	---	---	---	---	11	---	278	70	2.35	-70	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У15	---	---	---	---	11	---	260	64	2.45	-70	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У16	---	---	---	---	11	---	206	50	2.12	-80	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У17	---	---	---	---	11	---	239	64	2.10	-80	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У18	---	---	---	---	11	---	328	100	2.44	-80	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У19	---	---	---	---	11	---	208	44	2.03	-90	---	---	---	---	x	---
	C(П)1У20	---	---	---	---	11	---	225	50	2.12	-90	---	---	---	---	x	---
C(П)1У21	---	---	---	---	11	---	206	44	2.09	-90	---	---	---	---	x	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>но</sub> ≤ -90°C	---	---	x	---	---	
Проба С(П)2 (180°, макс. цикл т/о, тангенц.) / Sample C(П)2 (180°, max. cycle h/t, tangent.)	C(П)2P1	557	671	25	80	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	
	C(П)2P2	554	669	24	80	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	x	---	---	
	C(П)2P3	474	554	19	79	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	
	C(П)2P4	474	554	18	79	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	x	---	---	
	C(П)2У4	---	---	---	---	11	---	331	100	2.50	-40	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У5	---	---	---	---	11	---	320	100	2.38	-40	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У6	---	---	---	---	11	---	341	100	2.64	-40	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У7	---	---	---	---	11	---	331	100	2.50	-50	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У8	---	---	---	---	11	---	278	75	2.25	-50	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У9	---	---	---	---	11	---	329	100	2.35	-50	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У10	---	---	---	---	11	---	328	100	2.51	-60	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У11	---	---	---	---	11	---	269	68	2.38	-60	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У12	---	---	---	---	11	---	328	100	2.53	-60	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У13	---	---	---	---	11	---	251	62	2.34	-70	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У14	---	---	---	---	11	---	271	68	2.35	-70	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У15	---	---	---	---	11	---	251	62	2.46	-70	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У16	---	---	---	---	11	---	230	61	2.26	-80	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У17	---	---	---	---	11	---	241	61	2.17	-80	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У18	---	---	---	---	11	---	75	17	0.76	-80	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У19	---	---	---	---	11	---	198	44	1.85	-90	---	---	---	---	x	---
	C(П)2У20	---	---	---	---	11	---	10	6	0.10	-90	---	---	---	---	x	---
C(П)2У21	---	---	---	---	11	---	219	50	2.18	-90	---	---	---	---	x	---	


ис в журналі № / The log entry No		Найменування виробу / The product name										вироби / Item No					
A/49-22		Днище заготовки / Bottom blank										15-21117					
Фактичне значення (вказуються необхідні характеристики) / Actual value (specify the necessary characteristics)																	
Позначення (місце відбору) проб Designation (location) of samples	Образ. Зразка Specimen ID	R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>5</sub>	Z	тип / type	KV	KCV	B	Δb	T	α	HB	Cor.	Not cor.	Inf.	Note
	---	МПа / MPa	МПа / MPa	%	%		кДж / J	кДж/см <sup>2</sup> / J/cm <sup>2</sup>	%	мм / mm	°C	рад. / deg.					
											T <sub>к0</sub> = -80°C			x			
Додаткові відомості для замовника (заповнюється при необхідності) / Additional data for the customer (it is filled if necessary)																	
---																	
Висновок о результатах випробування / Conclusion of test results																	
повідєє ТУ 5.961-11060-2008, технічним вимогам креслення / Corresponds to ТУ 5.961-11060-2008, technical requirements of drawing																	
Випробування виконав / The test was done by		Інженер-дослідник / Engineer-researcher (посада / position)				 (Підпис / signature)				Р. Ст. Чмирьов / R. Chmyrov (П.І.Б. / Name-Surname)							
Перевірів / Verified by		Начальник лабораторії / Chief of laboratory (посада / position)				 (Підпис / signature)				З. Ст. Кривошеєв / S. Krivosheev (П.І.Б. / Name-Surname)							



Запис в журналі № / The log entry No		Найменування виробу / The product name											№ виробу / Item No				
A/-45-22а		Днище заготівля / Bottom blank											15-21117а				
Фактичне значення (вказуються необхідні характеристики) / Actual value (specify the necessary characteristics)																	
Позначення (місце відбору) проб / Designation (location) of samples	Обозн. Зразка / Specimen ID	Rp <sub>0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50</sub>	Z <sub>п</sub>	тип / type	KV <sub>п</sub>	KCV <sub>п</sub>	B <sub>п</sub>	Δb <sub>п</sub>	T <sub>п</sub>	α <sub>п</sub>	НВ <sub>п</sub>	Cor.	Not cor.	Inf.	Note
		МПа / MPa	МПа / MPa	%	%		Дж / J	Дж/см <sup>2</sup> / J/cm <sup>2</sup>	%	мм / mm	°C	град. / deg.					
Проба А1 (0°, осн. т/о, тангенц.) / Sample A1 (0°, basic h/t, tangent)	A1P1	690	788	24	78	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	---	---	---	---
	A1P2	692	791	23	77	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	---	---	---	---
	A1P3	589	672	18	76	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	---	---	---	---
	A1P4	578	661	18	76	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	---	---	---	---
	A1Y16	---	---	---	---	11	---	221	55	1.96	-30	---	---	---	---	---	---
	A1Y17	---	---	---	---	11	---	318	100	2.33	-30	---	---	---	---	---	---
	A1Y18	---	---	---	---	11	---	233	58	2.07	-30	---	---	---	---	---	---
	A1Y1	---	---	---	---	11	---	306	100	2.22	-40	---	---	---	---	---	---
	A1Y2	---	---	---	---	11	---	313	100	2.30	-40	---	---	---	---	---	---
	A1Y3	---	---	---	---	11	---	300	100	20.6	-40	---	---	---	---	---	---
	A1Y4	---	---	---	---	11	---	248	66	2.11	-50	---	---	---	---	---	---
	A1Y5	---	---	---	---	11	---	239	58	1.98	-50	---	---	---	---	---	---
	A1Y6	---	---	---	---	11	---	201	50	1.82	-50	---	---	---	---	---	---
	A1Y7	---	---	---	---	11	---	218	50	2.05	-60	---	---	---	---	---	---
	A1Y8	---	---	---	---	11	---	213	50	1.74	-60	---	---	---	---	---	---
	A1Y9	---	---	---	---	11	---	193	44	1.76	-60	---	---	---	---	---	---
A1Y10	---	---	---	---	11	---	209	37	1.82	-70	---	---	---	---	---	---	
A1Y11	---	---	---	---	11	---	208	44	1.74	-70	---	---	---	---	---	---	
A1Y12	---	---	---	---	11	---	141	31	1.25	-70	---	---	---	---	---	---	
A1Y13	---	---	---	---	11	---	74	12	0.69	-80	---	---	---	---	---	---	
A1Y14	---	---	---	---	11	---	60	12	0.51	-80	---	---	---	---	---	---	
A1Y15	---	---	---	---	11	---	26	11	0.48	-80	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>ис</sub> = -70°C	---	---	---	---	---	
Проба А2 (180°, осн. т/о, тангенц.) / Sample A2 (180°, basic h/t, tangent)	A2P1	678	779	23	78	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	---	---	---	---
	A2P2	674	774	22	79	III, №4	---	---	---	---	+20	---	---	---	---	---	---
	A2P3	579	661	18	76	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	---	---	---	---
	A2P4	569	652	17	79	I, №4	---	---	---	---	+350	---	---	---	---	---	---
	A2Y16	---	---	---	---	11	---	223	68	2.07	-30	---	---	---	---	---	---
	A2Y17	---	---	---	---	11	---	229	63	2.06	-30	---	---	---	---	---	---
	A2Y18	---	---	---	---	11	---	216	52	1.89	-30	---	---	---	---	---	---
	A2Y1	---	---	---	---	11	---	251	70	2.17	-40	---	---	---	---	---	---
	A2Y2	---	---	---	---	11	---	318	100	2.34	-40	---	---	---	---	---	---
	A2Y3	---	---	---	---	11	---	299	100	2.08	-40	---	---	---	---	---	---
	A2Y4	---	---	---	---	11	---	246	64	2.18	-50	---	---	---	---	---	---
	A2Y5	---	---	---	---	11	---	236	63	2.08	-50	---	---	---	---	---	---
	A2Y6	---	---	---	---	11	---	231	63	2.06	-50	---	---	---	---	---	---
	A2Y7	---	---	---	---	11	---	189	44	1.70	-60	---	---	---	---	---	---
	A2Y8	---	---	---	---	11	---	221	52	1.89	-60	---	---	---	---	---	---
	A2Y9	---	---	---	---	11	---	218	50	1.83	-60	---	---	---	---	---	---
A2Y10	---	---	---	---	11	---	84	19	0.72	-70	---	---	---	---	---	---	
A2Y11	---	---	---	---	11	---	213	37	1.76	-70	---	---	---	---	---	---	
A2Y12	---	---	---	---	11	---	136	29	1.15	-70	---	---	---	---	---	---	
A2Y13	---	---	---	---	11	---	11	5	0.05	-80	---	---	---	---	---	---	
A2Y14	---	---	---	---	11	---	196	37	1.73	-80	---	---	---	---	---	---	
A2Y15	---	---	---	---	11	---	103	29	0.84	-80	---	---	---	---	---	---	

Запис в журналі № / The log entry No <sup>□</sup>		Найменування виробу / The product name <sup>□</sup>										№ виробу / Item No <sup>□</sup>					
A/-45-22 <sup>□</sup>		Днище заготівля / Bottom blank <sup>□</sup>										15-21117 <sup>□</sup>					
Фактичне значення (вказуються необхідні характеристики) / Actual value (specify the necessary characteristics) <sup>□</sup>																	
Позначення (місце відбору) проб <sup>□</sup> Designation (location) of samples <sup>□</sup>	Обозн. Зразка <sup>□</sup> Specimen ID <sup>□</sup>	R <sub>p0.2</sub> <sup>□</sup>	R <sub>m</sub> <sup>□</sup>	A <sub>50</sub> <sup>□</sup>	Z <sub>□</sub>	тип / type <sup>□</sup>	KV <sup>□</sup>	KCV <sup>□</sup>	B <sup>□</sup>	Δb <sup>□</sup>	T <sub>□</sub>	α <sup>□</sup>	HВ <sup>□</sup>	Cor. cor. <sup>□</sup>	Not con. <sup>□</sup>	Inf. <sup>□</sup>	Note <sup>□</sup>
		МПа / MPa <sup>□</sup>	МПа / MPa <sup>□</sup>	% <sup>□</sup>	% <sup>□</sup>		Дж / J <sup>□</sup>	Дж/см <sup>2</sup> / J/cm <sup>2</sup> 2 <sup>□</sup>	% <sup>□</sup>	мм / mm <sup>□</sup>	°C <sup>□</sup>	град. / deg. <sup>□</sup>					
□	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	T <sub>тв</sub> = -70°C <sup>□</sup>	---	---	Х <sup>□</sup>	---	---	---
Додаткові відомості для замовника (заповнюється при необхідності) / Additional data for the customer (it is filled if necessary) <sup>□</sup>																	
---																	
Висновок о результатах випробування / Conclusion of test results <sup>□</sup>																	
Не відповідає ТУ 5.961-11060-2008, технічним вимогам креслення / Not corresponds to ТУ 5.961-11060-2008, technical requirements of drawing <sup>□</sup>																	
Випробування виконав / The test was done by <sup>□</sup>		Інженер-дослідник / Engineer-researcher <sup>□</sup>  (посада / position) <sup>□</sup>					 (Підпис / signature) <sup>□</sup>					Р. Ст. Чмир-у <sup>□</sup> / R. Chmyrov <sup>□</sup>  (П.І.Б. / Name-Surname) <sup>□</sup>					
Перевірів / Verified by <sup>□</sup>		Начальник лабораторії / Chief of laboratory <sup>□</sup>  (посада / position) <sup>□</sup>					 (Підпис / signature) <sup>□</sup>					З. Ст. Кривошеєв / S. Krivosheev <sup>□</sup>  (П.І.Б. / Name-Surname) <sup>□</sup>					

## ДОДАТОК Е – Ультразвукове дослідження поковки «Днище»

ЕНЕРГОМАШ СПЕЦІАЛЬНІ ENERGOMASH SPETSIAL		ООНМК		Протокол УЗК № 256-22				Дата
		Цех:	МОЦ					24.02.2022
Найменування виробу	№ виробу (фіксація)	Креслення	Замовлення	Об'єм контролю		Методика контролю	Норми оцінки якості	Чутливість контролю екв., мм
Днище заготовля	15-21117	1435-20	554398	100% по зовнішній циліндричній поверхні і по торцю		ОСТ 5Р.9675-88 Карта контролю У-023-19(Атом) / Process sheet У.023-19(Атом)	ТУ 5.961-11060-2008	2,5
Матеріал виробу	Плавка	Шорсткість поверхні Ra, мкм	Стадія контролю	Тип і номер приладу	Тип перетворювача Частота УЗК	№ перетворення теля	Спосіб налаштування чутливості	
15Х2МФА-А мод. А	421381-3	3.2	після т/о	EP650-BX-EER-K 170363503	PF2R - 24	914794	з допомогою АРД - діаграми по донному сигналу на заготовлі	
Розмір виробу на постачальних розміру					AM2R- 20x22-45	695063	з допомогою АРД - діаграми по відображення від радіусу R=100мм на стандартному зразку V-1	
					DL2R7x18	1063268	з допомогою АРД - діаграми по донному сигналу на стандартному зразку V-1 (H = 25мм)	
<b>Висновок о результатах контролю</b>								
<ol style="list-style-type: none"> <li>Індикацій, перевищують рівень реєстрації, не виявлено</li> <li>Відповідає ТУ 5.961-11060-2008</li> <li></li> </ol>								
Дефектоскопіст						УЗК, сертифікат №10194-2020-01,384- 11		
Начальник відділу						Лискобилин А. Ст.		

## ДОДАТОК I – Акт впровадження результатів роботи на ПрАТ «Енергомашспецсталь»



### ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

Местонахождение:  
Украина, 08301, Киевская область, Бориспольский район, город Борисполь, улица Ботаническая, дом 1/Б  
Телефон: (06264) 6-01-32  
Факс: (06264) 6-55-67  
ОКПО: 00210602  
№ свидетельства: 100336168  
Email: [central@emss.dn.ua](mailto:central@emss.dn.ua)  
Сайт: [www.emss.ua](http://www.emss.ua)

### ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «ЕНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

Місцезнаходження:  
Україна, 08301, Київська область, Бориспільський район, місто Бориспіль, Вулиця Ботанічна, будинок 1/Б  
Телефон: (06264) 6-01-32  
Факс: (06264) 6-55-67  
ЄДРПОУ: 00210602  
№ свідоцтва: 100336168  
Email: [central@emss.dn.ua](mailto:central@emss.dn.ua)  
Сайт: [www.emss.ua](http://www.emss.ua)

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі представників ПрАТ «Енергомашспецсталь» (ЕМСС): директора з виробництва Валентія А.Д., технічного директора Станкова В.Ю. та представників Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА): проректора з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків М. А. Турчаніна та професора кафедри обробки металів тиском (ОМТ) О.Є. Маркова склали цей акт в тім, що в результаті проведення спільних наукових досліджень та опитно-промислової апробації на ПрАТ «ЕМСС» у рамках науково-практичного договору о співдружності, науковцями кафедри «Обробка металів тиском» В. В. Пановим, С. Г. Карнаухом та В. М. Левченко впроваджені наступні результати робіт:

1. Удосконалено технологічні процеси виготовлення пустотілих поковок відповідального призначення конусної форми, які передбачають використання операції профілювання пустотілих заготовок. Розроблені нові процеси пластичної деформації покращують проробку внутрішньої структури металу заготовки. Запропонована спеціальна схема деформації змінює напружено-деформований стан металу заготовки та сприяє підвищенню точності виробів.
2. Рекомендації для розробки нових технологічних процесів виготовлення металопродукції відповідального призначення, креслення деформуючого інструменту та режими деформування.

Розроблені технологічні процеси забезпечили підвищення якості та точності металопродукції, що дозволило знизити відсоток браку на 25% та знизити витрати металу на 15%. Механічні властивості підвищилися на 15%.

Сумарний економічний ефект від впровадження розроблених технологічних процесів склав близько двох мільйонів гривень.

Акт призначений для вченої ради з захисту дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

ЕМСС

Технічний директор

В.Ю. Станков

Директор з виробництва

А.Д. Валентій

ДДМА

Професор кафедри ОМТ

О.Є. Марков

Проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків

М. А. Турчанін

