

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

ПАНОВ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.777.4:621.77.01

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
РОЗКОЧУВАННЯ КОНУСНИХ ВТУЛОК СХІДЧАСТИМ БОЙКОМ**

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. В. Панов)

Науковий керівник

д. т. н., професор

Марков Олег Євгенійович

Краматорськ –Тернопіль 2025

АНОТАЦІЯ

Панов В.В. Удосконалення технологічного процесу розкочування конусних втулок східчастим бойком. – 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-Тернопіль, 2025.

Зменшення енергозалежності України вимагає збільшення потужностей атомних електростанцій, що потребує збільшення потужностей та кількості енергетичних установок, а також заміну існуючих реакторів, в яких закінчується терміни експлуатації. Більш того, є актуальна проблема підвищення безпеки реакторів атомних електростанцій які є дуже навантаженими та відповідальними елементами. Деталі реактора працюють при високих тисках, температурах та в умовах радіаційної корозії.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси й інструмент для кування конусних втулок для енергетичного машинобудування.

Метою проекту є підвищення механічних властивостей, зниження витрат металу й енергії при виготовленні конусних втулок реакторів на базі використання нових операцій кування пустотілих заготовок з буртом.

Основні задачі проекту: 1) розробити нову концепцію виготовлення конусних втулок реакторів з урахуванням утворення корозійної пористості у зварних швах між складовими елементами реактору, які виготовлені зі спеціальних сталей, що леговані титаном, нікелем та ін.; 2) встановити формозмінення та кількісні оцінки напружено-деформованного стану при виготовленні конусних втулок з фланцем; 3) експериментально дослідити операцію розкочування конусних втулок та уточнити закономірності формозмінення заготовки від величини обтискання та способу розкочування; 4) визначити характеристики поетапної зміни напружено-деформований стан конусної втулки; 5) провести металографічні дослідження та встановити базові показники якості конусної втулки, яка виготовлена за новою

технологією; 6) провести апробацію операції розкочування конусних втулок та перевірити якість отримуваних деталей.

Методи дослідження – теоретичні дослідження напружено-деформованого стану та формозмінення заготовки проводилися з використанням МСЕ. Перевірка достовірності отриманих теоретичних результатів проводилася експериментальними дослідженнями в лабораторних і виробничих умовах. Експериментальні дослідження базувалися на законах подібності і моделювання процесів гарячого пластичного деформування на свинцевих і сталевих зразках. Обробка результатів досліджень проводилася з використанням методів статистики. Достовірність встановлених наукових результатів моделювання, підтверджена експериментальними дослідженнями та промисловою апробацією.

Розробка та дослідження техпроцесів кування конусних втулок реакторів були проведені з використанням «потужного інструменту» – методу скінчених елементів, який з достатнім ступенем достовірності дозволив розраховувати показники напружено-деформований стан поковки при деформуванні. Одним з основних підходів до проведення досліджень операції розкочування конусних втулок була розробка скінчено-елементної 3D моделі, що враховує механічні властивості сталі при куванні. На основі розробленої СЕ моделі було встановлено напружено-деформований стан конусних втулок при розкочуванні. Встановлені математичні моделі, які враховують механічні моделі сталі при високих температурах. Більш того, стали відомі данні з напружено-деформований стан поковки при розкочування східчастої обичайки. Тому цей підхід є новим для теорії та практики обробки металів тиском. Експериментальне моделювання операції розкочування східчастих обичайок було проведено з використанням спеціально спроектованого оснащення. Була досліджена нова геометрія бойків для розкочування. Крім цього, у роботі було проведено визначення базових показників механічних властивостей конусних втулок, які

деформуються з використанням нового способу. Аналіз результатів регресійних залежностей формозмінення при розкочуванні східчастим бойком, дозволив визначити науково обґрунтовані режими деформування і впровадити розроблений технпроцес кування конусних втулок. Крім цього, були підвищені механічні властивості деталей відповідального призначення. Робочі гіпотези науково-дослідної роботи полягали у зміні напружено-деформованого стану при куванні конусних втулок на основі використання способу розкочування та спеціального інструменту східчастої форми. В результаті досліджень були отримані: підвищене проковування структури металу, забезпечене сприятливе розташування волокна, підвищені механічні характеристики деталі та знижені витрати металу при виробництві крупногабаритних конусних втулок. На базі розроблених способів розкочування конусних втулок був спроектований спеціальний деформувальний інструмент. Цей спосіб дозволив визначити оптимальні режими розкочування східчастої обичайки, які забезпечать інтенсивне проковування литої структури сталі, сприятливе розташування волокна металу. Дослідження формозміни східчастої обичайки на свинцевих моделях потребувало складання спеціальної методики, що враховує багато-стадійність операції розкочування. Була розроблена методика дослідження змінення внутрішньої будови конусних втулок на сталевих зразках на основі металографічних досліджень. Крім цього, була складена методика фізичного моделювання, яка дозволила врахувати температурні та швидкісні режими натурного процесу розкочування великогабаритних конусних втулок. Новизна цих моделювань полягає у максимальному врахуванні фізичних особливостей операції розкочування. За результатами роботи був проведений аналіз відомих технологічних процесів виготовлення конусних втулок реакторів та був розроблений новий спосіб їх розкочування. На основі цього способу було розроблено експериментальне оснащення. Була розроблена методика дослідження перерозподілу макропотоків металу для формування сприятливої внутрішньої будови конусних втулок з буртом. Були встановлені

залежності формозмінення для нової операції розкочування, що характеризують вплив режимів розкочування та форму бойків на НДС конусних втулок. Були розроблені методики та рекомендації для розробки техпроцесів і оснащення для розкочування конусних втулок реакторів.

Наукова новизна: 1) Розроблена нова концепція проектування технологічних процесів кування крупногабаритних конусних втулок, яка дозволила знизити витрати металу та забезпечити утворення сприятливої внутрішньої будови готового виробу. 2) Встановлені залежності змінення форми та кількісні оцінки НДС конусних втулок при розкочуванні східчастим інструментом для різних співвідношень діаметрів заготовки та режимів деформування, що дозволило розробити рекомендації з інструменту й технологічних параметрів розкочування для виготовлення конусних втулок заданих розмірів. 3) Встановлена математична модель та закономірності формозмінення заготовки від величини обтискання та способу розкочування, для визначення діаметрів вихідної східчастої заготовки в залежності від співвідношень розмірів деталі, які дозволили встановити розміри пустотілої заготовки до деформації. 4) Встановлені кількісні оцінки поетапної зміни НДС конусних втулок в залежності від висоти уступу та виявлена небезпечна зона, в якій утворюється затиск між фланцем та уступом та встановлено оптимальний кут східчастого переходу. 5) Встановлено вплив способу розкочування конусних втулок на базові показники механічних властивостей деталей, що дозволило оцінити якість деталей, які будуть виготовлятися за новою технологією.

Практична цінність результатів роботи полягають у підвищенні механічних властивостей, а також зниженні витрат металу та енергії на їх виробництво, а саме: 1. На відміну від існуючих конструкцій реакторів, які складаються зі зварених деталей простої форми, новий підхід передбачає суміщення окремих деталей реактора в одну цільно ковану заготовку більш складної форми, що дозволило зменшити кількість зварних швів, особливо в активній зоні реактора, які є концентраторами корозії та внутрішніх

напружень. За рахунок цього буде підвищена міцність та надійність роботи реакторного блоку. 2. Запропонований у роботі спосіб деформування, передбачає виготовлення заготовок по контуру деталі, що дозволяє створити сприятливу внутрішню волокнисту будову, сприятливу анізотропію механічних властивостей та високу проробку структури металу, що підвищить механічні властивості виробів у тангенціальному та радіальному напрямках на 10 ... 20 %. А також запропонований спосіб деформування знижує витрати металу на 15...25 %, які пов'язані зі зменшенням напусків на механічну обробку. 3. На відміну від базових способів деформування конусних втулок, які виготовляються зі значною кількістю операцій універсальним інструментом з багаторазовим підігріванням масивних заготовок, новий спосіб деформування дозволяє зменшити кількість витрат природного газу для нагрівань багатотонних заготовок на 20...30 % та знизити трудомісткість деформування на 10...15 % за рахунок зменшення кількості технологічних операцій. 4. Розроблений технологічний процес кування східчастих обичайок буде корисними для таких виробників даної продукції: ПАТ «Енергомашспецсталь», ПрАТ «НКМЗ», ПАТ «Турбоатом», ДП «Електроважмаш» та ін. Результати роботи були апробовані та впроваджені на ПАТ «Енергомашспецсталь». Результати роботи підтверджені актом впровадження.

Ключові слова: деформування, кування, МСЕ, формозмінення, заготовка, поковка, бойок, втулка, деформація, напруження, якість, прес

ABSTRACT

Panov V. V. Improvement of the technological process of rolling out conical bushings with a stepped die. – 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-Ternopil, 2025.

Reducing Ukraine's energy dependence requires increasing the capacity of nuclear power plants, as well as replacing existing reactors that are nearing the end of their service life. Moreover, there is a pressing problem of increasing the safety of nuclear power plant reactors, which are very loaded and responsible elements. Reactor parts operate at high pressures, temperatures and in conditions of radiation corrosion.

The object of research is technological processes and tools for forging conical bushings for power engineering. The goal of the project is to improve mechanical properties, reduce metal and energy consumption in the manufacture of conical reactor sleeves based on the use of new forging operations of hollow billets with a collar. The main objectives of the project: 1) to develop a new concept for the manufacture of conical reactor bushings, taking into account the formation of corrosion porosity in welds between the reactor components, which are made of special steels alloyed with titanium, nickel, etc.; 2) to establish deformation and quantitative assessments of the stress- strain state during the manufacture of conical bushings with a flange; 3) to experimentally investigate the rolling operation of conical bushings and clarify the regularities of the deformation of the workpiece depending on the amount of compression and the rolling method; 4) to determine the characteristics of the gradual change in the stress- strain state of the conical bushing; 5) to conduct metallographic studies and establish basic quality indicators of the conical bushing manufactured using the new technology; 6) to conduct testing of the rolling operation of conical bushings and check the quality of the resulting parts.

Research methods – theoretical studies of the stress-strain state and deformation of the workpiece were carried out using the FEM. Verification of the reliability of the obtained theoretical results was carried out by experimental studies in laboratory and production conditions. Experimental studies were based on the laws of similarity and modeling of hot plastic deformation processes on lead and steel samples. Processing of research results was carried out using statistical methods. The reliability of the established scientific results, conclusions and recommendations is ensured by the use of modern modeling methods, confirmed by experimental studies and industrial testing.

The development and research of technological processes for forging conical reactor liners were carried out using a “powerful tool” – the finite element method, which allowed calculating with a sufficient degree of reliability the indicators of the stress- strain state of the forging during deformation. One of the main approaches to conducting research on the rolling operation of conical liners was the development of a finite element 3D model that takes into account the mechanical properties of steel during forging. Based on the developed FE model, the stress- strain state of conical liners during rolling was established. Mathematical models were established that take into account the mechanical models of steel at high temperatures. Moreover, data on the stress- strain state of the forging during rolling of a stepped shell became known. Therefore, this approach is new for the theory and practice of metal processing by pressure. Experimental modeling of the rolling operation of stepped shells was carried out using specially designed equipment. A new geometry of rolling dies was investigated. In addition, the work determined the basic parameters of the mechanical properties of conical sleeves that are deformed using the new method. Analysis of the results of regression dependencies shape change during rolling with a stepped punch, made it possible to determine scientifically substantiated deformation modes and implement the developed technical process for forging conical bushings. In addition, the mechanical properties of parts of critical purpose were increased. The working hypotheses of the research work consisted in changing the stress-strain state during

forging conical bushings based on the use of the rolling method and a special stepped tool. As a result of the research, the following were obtained: increased forging of the metal structure, a favorable arrangement of the fiber, increased mechanical characteristics of the part and reduced metal consumption in the production of large-sized conical bushings. Based on the developed methods for rolling conical bushings, a special deforming tool was designed. This method made it possible to determine the optimal rolling modes of the stepped shell, which will ensure intensive forging of the cast steel structure and a favorable arrangement of the metal fiber. The study of the shape change of the stepped shell on lead models required the development of a special methodology that takes into account the multi-stage nature of the rolling operation. A methodology for studying the change in the internal structure of conical sleeves on steel samples was developed based on metallographic studies. In addition, a physical modeling methodology was developed that allowed taking into account the temperature and speed regimes of the full-scale rolling process of large-sized conical sleeves. The novelty of these modeling lies in the maximum consideration of the physical features of the rolling operation. Based on the results of the work, an analysis of known technological processes for manufacturing conical reactor sleeves was carried out and a new method for rolling them was developed. Experimental equipment was developed based on this method. A methodology for studying the redistribution of metal macroflows for the formation of a favorable internal structure of conical sleeves with a shoulder was developed. The shape change dependencies for the new rolling operation were established, characterizing the influence of rolling modes and the shape of the strikers on the stress- strain state of conical sleeves.

Scientific novelty: 1) A new concept for designing technological processes for forging large-sized conical bushings has been developed, which has allowed to reduce metal consumption. 2) The dependences of the shape change and quantitative estimates of the stress- strain state of conical bushings during rolling with a stepped tool have been established for different ratios of workpiece diameters and deformation modes, which has allowed to develop recommendations

on the tool and technological parameters of rolling for the manufacture of conical bushings of given sizes. 3) A mathematical model and regularities of the shape change of the workpiece depending, to determine the diameters of the initial stepped workpiece depending on the ratios of the dimensions of the part, which have allowed to establish the dimensions of the hollow workpiece before deformation. 4) Quantitative estimates of the gradual change in the stress- strain state of conical bushings depending on the height of the step were established, and a dangerous zone was identified in which a clamp is formed between the flange and the step, and the optimal angle of the stepped transition was established. 5) The influence of the method of rolling out conical bushings on the basic indicators of the mechanical properties of the parts was established, which allowed assessing the quality of the parts that will be manufactured using the new technology.

The practical value: 1. Unlike existing reactor designs, which consist of welded parts of simple shape, the new approach involves combining individual reactor parts into one integrally forged workpiece of a more complex shape, which allowed to reduce the number of welds, especially in the reactor core, which are concentrators of corrosion and internal stresses. Due to this, the strength and reliability of the reactor unit will be increased. 2. The deformation method proposed in the work involves the manufacture of workpieces along the contour of the part, which allows creating a favorable internal fibrous structure, favorable anisotropy of mechanical properties and high processing of the metal structure, which will increase the mechanical properties of products in the tangential and radial directions by 10 ... 20%. And also the proposed deformation method reduces metal consumption by 15...25%, which is associated with a decrease in allowances for machining. 3. Unlike the basic methods of deforming conical sleeves, which are manufactured with a significant number of operations using a universal tool with multiple heating of massive blanks, the new deformation method allows to reduce the amount of natural gas consumption for heating multi-ton blanks by 20...30% and reduce the labor intensity of deformation by 10...15% due to a decrease in the number of technological operations. 4. The developed technological process of

forging stepped shells will be useful for the following manufacturers of this product: PJSC «EMSS», PrJSC «NKMZ», PJSC «Turboatom», SE «Electrozahmash», etc. The results of the work were tested and implemented at PJSC «EMSS». The results of the work are confirmed by the act of implementation.

Keywords: deformation, forging, FEM, workpiece, shapeshifting, part, die, bushing, straine, stress, quality, press

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кобелєв О. А., Єфімов М. В., Лобанов О.І., Панов В.В. Перспективні напрямки розвитку заготівельного виробництва енергетичного та важкого машинобудування // Обробка матеріалів тиском. – 2012. – № 2 (31) 74 – 78 с.
2. Кобелев О.А., Марков С.И., Жидков Д.А., Панов В.В., Лобанов А.И., Технологические и материаловедческие перспективы развития реакторов ВВЭР большой мощности. //Металлург. – 2014. -№8. – С. 87-91
3. Розробка рекомендацій для автоматизованого проектування процесів осадження профільованих заготовок / О. Е. Markov, V. N. Zlygorev, O. V. Gerasimenko, V. V. Panov, R. Yu. Zhytnikov, U. O. Ivanova // Mechanics and Advanced Technologies. – 2019. – №2 (86). – С. 47–53. – <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2019.86.181050>
4. Удосконалення процесу осадження масивних заготовок для виготовлення деталей енергетичного машинобудування / О.Марков, А.Хващинський, В.Панов, П.Різак, Р.Житніков // Технічні науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – № 2 (20). – С.46–52.
5. Марков О., Панов В., Іванова Ю., Хващинський А., Житніков Р., Косілов М. Удосконалення операції кування великогабаритних пустотілих поковок зі складним профілем. Технічні науки та технології: науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 1(23). С. 25-36. DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-25-36
6. Марков О.Є., Панов В.В., Косілов М.С., Іванова Ю.О., Коткова В.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування конусних обичайок зі складним профілем // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2021. – №2(127). – С. 129-134.
7. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець / Марков О.Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Хващинський А.С.,

Мусорін А.В., Косілов М.С. // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 42. – (Технічні науки). – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2021. – С. 92-99. – Режим доступу: DOI: 10.31498/2225-6733.42.2021.24059

8. Скінчено-елементне дослідження напружено-деформованого стану процесу профілювання циліндричних заготовок / Марков О., Мусорін А., Хващинський А., Панов В., Житніков Р., Лисенко А. Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 2(24). С. 9-16. DOI: 10.25140/2411-5363-2021-2(24)-9-16

9. 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)

10. Марков О. Є., Шевцов С. А., Алдохін М.Д., Панов В.В., Ровенский С. Г. Дослідження способу обкочування снарядів з трубної заготовки // Обробка матеріалів тиском. – 2024. – № 1 (53) 53 – 58 с.

11. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool / O. Markov, M. Kosilov, V. Panov, V. Kukhar, S. Karnaukh, N. Ragulina, P. Bochanov, P. Rizak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6/1(102), p.19–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>

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

13. Жбанков Я.Г. Уменьшение неравномерности распределения деформаций при осадке профилированных заготовок / Я.Г. Жбанков, В.В. Панов, О.Е. Марков // Тезисы докладов V научно-технической конференции

молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013». Краматорск, 22-24 травня 2013. – С. 28-30.

14. Панов В.В., Марков О.Є., Іванова Ю.О., Мусорін А.В., Степура С.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту», 13-15 травня 2021 р., Вінниця, ВПІ – 2021. – с. 111-112

15. Панов В.В., Марков О.Є., Іванова Ю.О., Степура С.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // Матеріали МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» 13–15 травня 2021. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. – 129-130
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/schedConf/presentation>
 sc

16. Марков О. Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Мусорін А.В. Дослідження та розробка процесу розкочення ступінчастих конусних кілець // Матеріали ХІ міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 26-27 травня 2021 р., Чернігів, НУ «Чернігівська політехніка» – 2021. – Т.1. – С. 56–58

17. Іванова Ю.О., Марков О. Є., Панов В.В., Мусорін А.В. Розробка технологічного процесу кування крупних поковок з мінімальними припусками // Матеріали ХІІ МНТК ««Інновації, моделювання, технології в машинобудуванні та металургії», 28-29 жовтня 2021 р., Харків: НТУ ХП, 2021. – С. 23–24

18. Марков О. Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Хващинський А.С. Моделювання процесу кування крупногабаритних пустотілих заготовок // Матеріали ХІХ міжнародної науково-технічної конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», 01-04 червня 2021 р., Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 96–97

19. Іванова Ю. О., Панов В. В., Хващинський А. С. Підвищення якості та зниження витрат металу при виробництві крупних поковок // Матеріали XXV міжнародної науково-практичної конференції «Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», 24-26 жовтня 2022 р., Краматорськ, ДДМА – 2022.

20. Іванова Ю.О., Марков О.Є., Панов В.В., Мусорін А.В., Ровенський С.Г. Розробка технологічного процесу кування крупних поковок з мінімальними припусками. 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.40-41.

21. Пат. 142502 Україна, МПК (2006) В 22 D 7/00. Спосіб спосіб сифонного розливання сталі у виливниці / Кальченко П.П., Марков О. Є., Панов В. В., Шевченко Н.Г., Коткова В.В., заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u201911704; заявл. 06.12.2019; опубл. 10.06.2020, бюл. № 11. – 4 с.

22. Пат. 145120 Україна, МПК (2006) В 21 J5/10. Спосіб прошивання ковальських заготовок / Кальченко А.О., Марков О. Є., Панов В. В., Житніков Р.Ю., Мусорін А.В., Хващинський А.С., Шевченко Н.Г. заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u202003105; заявл. 25.05.2020; опубл. 26.11.2020, бюл. № 22. – 4 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	19
1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ТА ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ РЕАКТОРІВ.....	23
1.1 Стан питання виробництва крупногабаритних втулок і кілець	27
1.2 Литті заготовки для кування великогабаритних втулок.....	27
1.3 Способи кування великогабаритних втулок та кілець.....	32
1.4 Деформуючий інструмент для кування втулок	34
1.5 Методи та методики дослідження процесів розкочування та кування крупних поковок відповідального призначення.....	43
1.6 Перспективи розвитку технологій і оснащення та розробка нової концепції для кування крупногабаритних поковок із ковальських злитків.....	49
Висновки за розділом 1	55
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ГАРЯЧОМУ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ	57
2.1 Обґрунтування напрямку дослідження розкочування конусних втулок зі ступінчастою поверхнею	57
2.2 Методика теоретичного дослідження процесу розкочування конусних втулок	62
2.3 Розробка скінчено-елементних 3D моделей напружено- деформованого стану заготовки в процесі розкочування конусних втулок	68
Висновки за розділом 2	71
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНУСНОЇ ВТУЛКИ В ПРОЦЕСІ РОЗКОЧУВАННЯ	73

3.1 Формозмінення заготовки у процесі одночасного розкочування уступу та виступу	73
3.2 Формоутворення конусної втулки при послідовному деформуванні виступу та уступу	76
3.3 Аналіз утворення конусності на поковці при варіюванні розмірами виступу	83
3.4 Дослідження розкочування з поступовим деформуванням виступу та уступу	87
3.5 Дослідження процесу розкочування конусних втулок без бурта ..	92
Висновки за розділом 3	96

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕСІ РОЗКОЧУВАННЯ КОНУСНИХ ВТУЛОК.....

98

4.1 Розробка методики проведення експериментальних досліджень формозмінення на свинцевих моделях	98
4.2 Планування процесу розкочування конусних втулок	103
4.3 Розкочування конусних втулок з товстою стінкою уступа	108
4.4 Розкочування конусних втулок з середньою стінкою уступа	116
4.5 Розкочування конусних втулок з тонкою стінкою уступа	121
4.6 Дослідження процесів кування конусних поковок без фланця	127
4.7 Розробка математичної моделі процесу розкочування конусних втулок	132
4.8 Дослідження змінення структури металу та розподілу механічних властивостей на сталевих зразках	135
Висновки за розділом 4	141

5 МЕТОДИКА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ ТЕХПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ КОНУСНИХ ВТУЛОК.....

143

5.1 Методика проектування техпроцесів кування конусних втулок з буртом	143
5.2 Складання виробничого техпроцесу кування конусних втулок ..	146

5.3 Дослідження властивостей конусної втулки, яка виготовлена за новою технологією.....	150
Висновки за розділом 5	163
ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	170
ДОДАТОК А – Дослідження формозмінення ступінчастої заготовки при розкочуванні конусних втулок	187
ДОДАТОК Б – Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	190

ВСТУП

Відмова від російського природного газу та зниження його закупівлі Україною та країнами Європейського союзу призвели до істотного збільшення споживання електроенергії підприємствами та населенням зазначених держав. Україна сьогодні почала істотно збільшувати продаж електроенергії у Європу. Це дозволяє не тільки заробити додаткові мільярди євро на рік, але й вистояти державі та допомогти втриматися Європейським країнам в умовах газового російського шантажу. Це в свою чергу вимагає збільшення виробництва електроенергії, що потребує збільшення потужностей та виготовлення нових атомних енергетичних установок, а також ремонт існуючих реакторів, в яких закінчується терміни експлуатації (Хмельницька та Рівненська АЕС). Більш того, в умовах війни та прикладах захоплень російськими агресорами АЕС (Чорнобильська та Запорізька) виникла актуальна потреба підвищення міцності корпусів атомних реакторів. На сьогодні у Світі, в умовах поширення тероризму та частих військових конфліктів, виникла потреба проектувати та виготовляти атомні реактори не тільки сейсмостійкими, але й вибухобезпечними. Заміна існуючих та виробництво нових атомних реакторів потребує розробки нових більш міцних сплавів та впровадження нових способів виготовлення деталей реакторів, що дозволить підвищити їх механічні властивості, і відповідно, надійність та безпеку, у тому числі у військовий час, коли бойові дії можуть проводитися біля атомних реакторів. У подальшому всі знов спроектовані та вже існуючі атомні реактори обов'язково повинні витримувати удари снарядів, авіабомб та ракет. Тому представлена робота є вкрай своєчасна та затребувана. За результатами роботи будуть запропоновані спеціальні сплави та нові способи виробництва деталей, які зменшать кількість зварних швів (які знижують ударну в'язкість конструкції) та підвищать міцності властивості корпусу атомного реактора.

Зменшення енергозалежності України вимагає збільшення потужностей атомних електростанцій, що потребує збільшення потужностей та кількості енергетичних установок, а також заміну існуючих реакторів, в яких закінчується терміни експлуатації. Більш того, є актуальна проблема підвищення безпеки реакторів АЕС які є дуже навантаженими та відповідальними елементами. Деталі реактора працюють при високих тисках, температурах та в умовах радіаційної корозії. Реакторний блок представляє собою конструкцію з кованих деталей (обичайки з фланцями), які зварюються між собою. Традиційні способи їх виготовлення: кування кілець та приварювання до них фланців, а також кування обичайки з гладкою зовнішньою поверхнею з подальшою механообробкою для отримання фланців. Перший спосіб призводить до збільшення кількості зварних швів, які інтенсивно кородують в умовах високої температури та радіації, що призводить до зниження ресурсу експлуатації та надійності реактора в цілому. Другий спосіб збільшує кількість металу, що йде у відходи. Крім того, виготовлення фланців механічною обробкою призводить до перерізання внутрішніх волокон, що знижує втомну міцність корпусу реактора. Тому, задача покращення якості деталей корпусу реактора, зниження їх собівартості, збільшення надійності та безпеки – це актуальна проблема енергетичного машинобудування.

В більшості випадків реакторний блок АЕС представляє собою конструкцію, яка складається з окремих деталей (днища, кришки, обичайки зони патрубків та обичайок активної зони реактора). З огляду на безпеку реактора та підвищення строку його експлуатації намагаються зменшити кількість зварних швів. Зварні шви є концентраторами напружень та корозії, що знижують термін роботи реактору. Тому у реакторних блоках доцільно поєднувати обичайки зони патрубків з обичайками активної зони. Через це збільшується попит на складні та великі за розміром обичайки, які поєднують в собі декілька деталей реакторного блоку (цільно ковані деталі реактору). Крім цього, необхідно також підвищувати механічні властивості деталей

реакторного блоку для підвищення його ресурсу роботи для виключення виникнення надзвичайних ситуацій.

Основні гіпотези науково-дослідної роботи полягають у зміні напружено-деформованого стану при куванні східчастих обичайок на основі використання способу розкочування та спеціального інструменту східчастої форми. В результаті досліджень планується отримати: підвищене проковування структури металу, забезпечене сприятливе розташування волокна, підвищені механічні характеристики деталі, знижені витрати металу і кількість зварних швів при виробництві реакторів.

Відомі у літературі рішення для підвищені надійності реакторів, полягають в основному у використанні спеціальних сталей та сплавів. Проблемам проектування нових техпроцесів кування цих деталей, які б сприяли підвищенню робочих характеристики, не приділялось достатньої уваги. На основі дослідницьких даних авторів проекту, розробка нових операцій розкочування східчастих обичайок реакторів є ефективним напрямком підвищення їх якості та безпеки роботи. Крім цього, собівартість виготовлення цих деталей за відомими технологіями є дуже високою, що пояснюється неефективністю використання окремих операцій та значними витратами високолегованої сталі. Тому розробка науково-обґрунтованого підходу щодо проектування техпроцесу виробництва цільно кованих деталей реактору, яка призводить до покращення якості, підвищення надійності та зниження витрат на їх виробництво є своєчасним завданням. Аналіз літератури з цієї проблематики дозволив встановити, що НДС обичайки при розкочуванні східчастої поковки східчастим інструментом є не вивченим, а їх визначення є актуальною науковою потребою тому, що НДС оцінює проковування литої структури, що дозволяє прогнозувати механічні характеристики деталі.

Після аналізу літератури з питання розкочування східчастих обичайок виявлено, що рекомендації з розробки техпроцесів зазначених поковок відсутні. Тому за результатами роботи буде вирішена актуальна технічна та

наукова проблема вдосконалення операції розкочування східчастих обичайок.

Обмежений ресурс роботи реакторів пояснюється наявністю значної кількості зварних швів між деталями корпусу. Ідея роботи полягає у поєднанні окремих елементів корпусу реактору в одну деталь, а відповідно й зменшені кількості зварних швів. Більш того, зміна НДС при розкочуванні східчастої заготовки східчастим інструментом буде сприяти підвищенню якості та зниженню витрат металу. На сьогодні відсутні технологічні режими та геометричні параметри інструменту для розкочування східчастих обичайок. Тому встановлення наукових основ проектування техпроцесів для розкочування східчастих обичайок є своєчасною та актуальною проблемою в енергетичному машинобудуванні. Вирішення цієї проблеми дозволить покращити механічні властивості та знизити витрати на виготовлення цих деталей. Спираючись на існуючі дослідження з цієї проблематики та попередніх ідей, можна зробити висновок, що проект є актуальним для науки і виробництва, а його результати будуть цінним внеском в економіку, промисловість, енергонезалежність і безпеку держави.

1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ТА ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ РЕАКТОРІВ

1.1 Стан питання при виробництві крупногабаритних втулок та кілець

Останнім часом об'єм виготовлення великогабаритних обичайок та пустотілих деталей найвідповідальнішого призначення збільшується. Це в, першу чергу, пояснюється зростанням кількості АЕС. Одним з видів продукції енергетичного машинобудування представляють крупногабаритні обичайки. З цих деталей виготовляються корпуси атомних реакторів та парогенератори. Ці деталі є найвідповідальнішим, тому к ним пред'являються надвисокі вимоги за механічними властивостями, надійності роботи, ціни. Форма та габаритні розміри таких деталей визначають спосіб їх виготовлення. Основним способом їх виробництва є кування злитків на гідравлічних пресах. Технологія їх виготовлення дуже складна та має основний перелік таких операцій: виготовлення злитка, його нагрівання, білетування, вирубка блока, осадження, прошивання протягування на оправці, розкочування та ін. Основною формоутворюючою операцією є розкочування для придання заданих розмірів поковки.

Збільшення кількості АЕС потребують удосконалення техпроцесів кування обичайок, з яких збираються реакторні блоки. Це в першу чергу пов'язано з тим що реакторний блок в наслідок своїх габаритних розмірів виготовляється з 10 деталей, які з'єднуються за допомогою зварювання (так звана зварно-кована конструкція реактора). Тому, задля підвищення роботоздатності реакторного блоку потрібно зменшувати кількість зварних швів. Це можна зробити за рахунок об'єднання двох-трьох деталей в одну (так званих цільнокованих). Це, в свою чергу, призводить до ускладнення

конфігурації заготовки та збільшені її розмірів, а відповідно і маси. Відносно обичайок, то вони починають мати східчастий профіль з конусними елементами та ін.

Кільця куванням виготовляються за рахунок розкочування осадженої і прошитої заготовки. Розкочування здійснюється плоским бойком, на циліндричному дорні (оправці), встановленому на двох опорах. Розкочування супроводжується малими обтисканнями і обертанням дорна для повороту заготовки. Інтенсифікація процесу розкочування є вельми актуальним завданням, якої займається значна кількість дослідників. Для підвищення ефективності процесів розкочування пропонується застосування безлічі рішень наведених в роботах [1]. Вихідною заготівкою для розкочування кілець є ковальський злиток різних конфігурацій. Часто використовується звичайний ковальський злиток [2], в цьому випадку технологія кування кільця включає в себе осадження і прошивку, що, безсумнівно, накладає на кінцевий продукт у вигляді кільця певне поле деформацій і впливає на напружено-деформований стан заготовки в процесі кування. Більш прийнятним є застосування безприбуткового ковальського злитка, використання якого істотно знижує металоємність одержуваних кілець при досягненні прийнятної якості. Технологія кування кілець з безприбуткового злитка також передбачає осадження і прошивання заготовки, крім того з боку прибуткової частини зливка в поковки робиться додатковий припуск на механічну обробку для видалення неякісного металу [3]. Відомі приклади використання порожніх злитків для отримання поковок типу кілець і труб [8, 9]. Використання таких злитків дозволяє істотно скоротити кількість технологічних переходів кування, так відпадає необхідність в осадженні і прошиванні, зменшується кількість нагрівань. Все це веде до істотного зниження собівартості виробів. Крім того, напружено-деформований стан такої заготовки в процесі розкочування буде істотно відрізнятися від напружено-деформованого стану заготовки, отриманої з безприбуткового

або звичайного ковальського злитка, тому що на неї не будуть накладені поля деформацій, одержувані в результаті осадження і прошивання.

Форма заготовки робить істотний вплив на напружено-деформований стан заготовки в процесі розкочування і впливає на формозміну. Якщо взяти звичайний ковальський інструмент (плоский бойок і гладкий дорн) та провести розкочування порожнистої ступінчастої заготовки, то в результаті вийде конічне кільце. Це станеться за рахунок того, що в першу чергу буде деформуватися ділянку поковки більшого діаметру, збільшення поперечних розмірів заготовки буде відбуватись тільки з одного боку, в той час як у поковки залишиться жорсткий недеформуємий кінець меншого діаметру. Дослідження даного процесу наведено в роботі [4]. Заготівля ж подібної ступінчастою форми може бути отримана різними способами: протяжкою на оправці або литтям [5].

В роботі [6] для отримання конічних кілець пропонується використовувати вихідну заготовку у вигляді кільця з конічною внутрішньою поверхнею, яка отримана протяжкою на конічній оправці. За рахунок різниці товщини стінки по довжині заготовки при розкочування плоским бойком досягається різна по довжині витяжка, що дозволяє отримувати конічне кільце. Поряд з формою інструменту і заготовки по впливу на напружено-деформований стан в процесі розкочування впливає і кінематичний фактор. Кінематика руху інструменту робить істотний вплив на продуктивність і якість одержуваного продукту в процесі розкочування. Приклади різної кінематики руху інструменту не численні через складність їх реалізації. У переважній більшості застосовується традиційна схема кування, яка полягає в лінійному переміщенні плоского бойка прикріпленого до повзуна преса для деформування заготовки і обертального руху дорна для повороту заготовки уздовж своєї осі. Дана схема має кілька варіантів реалізації, які залежать від габаритів одержуваної поковки і розмірів преса.

У разі великих габаритів поковки, яка не може бути розміщена під пресом, застосовують схему внепресового розкочування, як це показано

у роботах [7]. В даному випадку вертикальний рух повзуна преса може бути перетворено через систему важелів або клинову систему в горизонтальне або кутовий рух деформуючого інструменту. Такі прийоми значно розширюють можливості процесів розкочування. В роботі [8] автори, пропонують отримувати конічні кільця розкочуванням звичайній кільцевій заготовки, на гладкій оправці плоским бойком застосовуючи спеціальний кінематичний режим.

Для більш продуктивного отримання кілець використовують спеціальні розкатні машини [9]. В даному випадку деформування кільця відбувається за рахунок лінійного переміщення ролика, який одночасно обертається навколо своєї осі. Дослідженню механічного режиму розкочування присвячений ряд робіт. В роботі [10] автори для отримання конічних поковок пропонують в процесі розкочування на оправці виставляти оправку під кутом до робочої поверхні плоского бойка. За рахунок цього в процесі деформування стінка заготовки обтискається нерівномірно по довжині, що призводить до різниці витяжок в процесі розкочування і формується зовнішня і внутрішня конічна поверхні заготовки. У разі розкочування високого кільця, коли ширина бойка не дозволяє за один раз перекрити всю ширину стінки, автори роботи [11] пропонують виробляти розкочування по частинах з наступною правкою. В роботі [12] встановлюються раціональні параметри розкочування, такі як швидкість розкочування і величина обтиснення для отримання поковки необхідних розмірів і якості. Температурне поле в процесі розкочування заготовки постійно змінюється і хоча в літературі практично відсутня інформація по схемам кування кілець зі спеціально отриманим неоднорідним температурним полем, даний фактор може зробити істотний вплив, як на якість, так і на формозміна заготовки.

1.2 Литті заготовки для кування великогабаритних втулок

Якість поковок залежить не тільки від технологічного процесу кування, але й від якості злитка (вихідної литої заготовки). Підвищуються вимоги до механічних властивостей обичайок та якості злитків. Для виготовлення обичайок реакторних блоків виготовляються злитки вагою від 90 до 650 т. [13].

Виготовлення обичайок куванням може проводитися із суцільних злитків, коли отвір формується прошиванням, або із пустотілих злитків [14]. Використання операції осадження та прошивання суцільного злитка потребує підвищення витрат металу та енергії, що в результаті збільшує собівартість виробів. Вирішити цю проблему можливо за рахунок використання пустотілих злитків. Це дозволяє виключити саму енергоємну операцію осадження та металовитратну операцію прошивання [15].

Результати поздовжнього [16] та поперечного [17] розрізання та макродослідження суцільного злитка дозволили встановити, що в центральній частині литої заготовки розташовуються внутрішні несуцільності та порожнечі, що знижують якість вихідної заготовки. Мається на увазі, що ці дефекти повинні бути усунуті у процесі кування у гарячому стані за рахунок їх закриття та заварювання.

Основний дефект ковальського злитка – осьова рихлість. Цей дефект представляє собою порожнечі, які заповнені газами та неметалевими домішками, що підтверджується дослідженнями [18]. За результатами роботи злиток був розрізаний та виявлено розміри та розташування осьового дефекту. Ці данні були використанні при скінчено-елементному моделюванні процесу кристалізації ковальського злитку. Це моделювання дозволило встановити ефективні параметри процесу кристалізації злитка.

У дослідженнях [19] було визначено, що використання прибуткової частини виливниці з кристалізатором та зворотною конусністю призводить до збільшення глибини усадочної раковини. Змінення напрямку кристалізації

дозволило зменшити ліквідацію вуглецю за перерізом злитка. Цей спосіб виготовлення злитків придатний для виготовлення пустотілих поковок із обов'язковим використанням операції прошивання.

У статті [20] розглянуто спосіб виготовлення обичайки реакторного блоку зі ковальського суцільного злитка вагою близько 200 т з низьколегованої сталі. Техпроцес кування передбачав використання операцій осадження та прошивання отвору. Далі заготовка деформувалася на конічній оправці вузьким бойком. Досліджувана технологія передбачала два підігрівання заготовки, що призводить до збільшення витрат природного газу на кування. Більш того, в статті не представлені технологічні рекомендації зі ступеня обтискання.

При куванні ковальського злитка потрібно зконцентрувати внутрішні дефекти в центрі зливка [21]. Для цього злиток осаджується. Це збільшує проробку литої структури металу злитка. Задля видалення осьових дефектів ковальського злитка призначають операцію прошивання. На основі вдосконалення техпроцесу кування стало можливим виготовлення обичайки з фланцем із злитка вагою 400 т.

В дослідженні [22] було встановлено, що використання порожніх ковальських зливків для кування обичайок, призводить до покращення якості та зниження скорочення витрат сталі на 15-25%. Але в цьому випадку в середині стінки пустотілого злитка може локалізуватися рихлість, що призведе до зниження якості.

Базовою складової розвитку енергетичного машинобудування є розробка та впровадження ресурсозберезувальних техпроцесів кування, що призводять до економії матеріальних і енергетичних ресурсів [23]. Аналіз існуючих техпроцесів кування великогабаритних поковок дозволив визначити, що близько 85% усіх процесів кування призначають енергоємну операцію осадження. Удосконалення техпроцесів кування крупногабаритних поковок заключається у заміні малоефективних та енергоємних операцій [24]. Одним із шляхів виключення операцій осадження та прошивання –

використання пустотілих ковальських злитків. В результаті знижуються енерговитрати та час кування, що дозволяє зменшити витрати на кування.

За результатами дослідження [25] запропоновано покращити якість виробів найвідповідальнішого призначення при виготовленні нових енергоустановок підвищеної потужності (до 2000МВт) за рахунок впровадження методів для зниження ліквації легуючих елементів.

Відома компанія впровадила порожні злитки [26] для кування втулок. Однак рекомендацій по проектуванню техпроцесу кування не представлено.

Для встановлення раціональних рекомендацій при деформуванні крупногабаритних поковок фірмою Creusot було встановлено вплив наявності внутрішніх пустот на тріщиноутворення [27]. Для пустотілих поковок оптимальним рішенням є кування порожніх зливків. Однак в статті не представлено рекомендації для вибору параметрів процесу розкочування кілець. Важливими даними були б рекомендації зі співвідношення розмірів злитка, які знизять ліквацію і розміри осьової пористості.

У статті [28] дана оцінка техніко-економічних переваг кування кілець з порожніх ковальських злитків. Наведена технологія кування кілець корпусів реакторних блоків із порожніх заготовок. В таких заготовках менш характерна осьова рихлість через змінення умов кристалізації порожнього злитка.. Такі заготовки мають більш рівномірний хімічний склад по легуючим елементам, а також небажаним домішкам. Основним способом виробництва таких заготовок є відливання знизу. Отримання отвору в злитках стає можливим за умови використання внутрішньої труби з різними способами їх утеплення та охолодження. Однак у роботі не розкрито, умови кристалізації, задля забезпечення мінімальної ліквації легуючих елементів.

В роботі [29] з метою заощадження металу при куванні пустотілих поковок вдосконалено технологію відливання порожніх зливків. Моделювання процесу заливки і кристалізації такого злитка довело зменшення сегрегації і глибини усадочної раковини в порівнянні з ковальськими зливками. Однак в роботі [30] не встановлена хімічна

неоднорідність у отриманих злитків і відсутні дані з мехвластивостей отриманих поковок.

Дослідження [31] дозволило розробити нову технологію виготовлення пустотілого злитка вагою 180 т для виготовлення обичайок реакторних блоків. Виготовлена деталь мала високі механічні характеристики. Однак в роботі [32] не зазначено технологічний процес кування і як цей вплинув на фізико-механічні характеристики деталі.

В роботі [33] зазначено, що при огляді поковки, яка відкута зі суцільного злитка, в отворі обичайки зафіксовані поверхневі дефекти. Позбутися цих дефектів стало можливим після використання порожнього злитка. Такий зливok мав тепловий центр, який розташовувався з боку стінки, і після виготовлення деталь не мала дефектів на внутрішній поверхні. У результаті модернізації конструкції виливниці внутрішні несучільності розташовувалися в центрі стінки порожнистої заготовки, яке сприяло заковуванню процесі деформування. Однак в роботі не наведено результати мехвластивостей кованих кілець, що є важливим критерієм при виборі нового способу кування заготовок особливо відповідального призначення.

В статті [34] приведено технологічний процес виготовлення порожніх злитків методом відцентрової розливання низьковуглецевих легованих сталей. Наведено данні щодо хімічного складу та мехвластивостей виготовлених пустотілих литих заготовок. Встановлено, що ці заготовки мають низьку ліквацию, хіміко-фізичну рівномірність, високі мехвластивості і можуть бути використані для розкатаних деталей типу обичайок. Однак у дослідженні не встановлена придатність застосування цього способу для виготовлення крупнотонажних злитків з подальшим їх кування крупногабаритних обичайок конусної форми. Це, в свою чергу, вимагає проведення спеціальних досліджень для кування крупногабаритних поковок.

У роботах [35] представлені результати впровадження техпроцесу електрошлакового виготовлення пустотілих заготовок. За встановленими результатами показана ефективність використання порожніх злитків, які

виготовляються електро-шлаковим переплавом. Однак у дослідженні не вказана можливість використання запропонованої технології для виготовлення крупногабаритних обичайок із ступінчастим зовнішнім контуром.

Використання порожньої литої заготовки для виготовлення обичайок та кілець є раціональним рішенням, поряд з яким покращується поліпшення якості деталей відповідального призначення. Механічні властивості виробів стають більш рівномірними, а кількість лікваций нижче, ніж при застосуванні суцільного злитка [36]. Однак у статті не вказані результати металографічних досліджень для отриманих поковок.

Застосування порожніх заготовок на заміну суцільних злитків дозволяє підвищити продуктивність їх виготовлення:

- час кування зменшується у 2...3 рази за рахунок призначення меншого числа технологічних переходів при куванні у порівнянні з куванням суцільних злитків;
- збільшується використання металу через виключення операції прошивання та менших витрат на угар;
- зменшуються витрати природного газу, які пов'язані зі зменшенням кількості нагрівань [37].

1.3 Способи кування великогабаритних втулок та кілець

Значна кількість кілець, які мають прямокутний поперечний переріз виготовляються з використанням операції розкочування пустотілої заготовки вузьким бойком на дорні. Це дозволяє виготовляти куванням обичайки, що менші за розміри робочого простору гідравлічного кувального пресу. Останнім часом збільшується попит на виготовлення крупногабаритних

обичайок, які перевищують розміри робочого простору ковальського обладнання.

Удосконалити техпроцес виготовлення куванням крупногабаритних обичайок є використання бойків зі ступінчастим профілем. Деформування таким інструментом буде сприяти зміненню напружено-деформованого стану заготовки при розкочування з отриманням заданої внутрішньої волокнисту будови, коли контур поковки буде повторювати контур деталі. В результаті бу виключено перерізання внутрішньої волокнистої будови при механічній обробці. При цьому, буде зменшена кількість витраченого металу та час виробництва ступінчастої обичайки.

Потрібність виготовлення крупногабаритних обичайок викликана збільшенням потужностей АЕС [38]. Виготовлення обичайок збільшених розмірів призводить до зменшення кількості деталей корпусу реактора, а відповідно зменшення кількості зварних швів складових частин корпусу. Задля виготовлення крупногабаритних обичайок потрібно розробити спеціальне оснащення для розкочування за межами кувального гідравлічного пресу. Це оснащення повинно приводитися у дію за допомогою рухомої траверси гідравлічного пресу.

У роботі [39] запропоновано оснащення, яке дозволяє проводити розкочування за пресом. Сила від рухомої траверси передається через коромисло на обичайку, що розкочується. В результаті кується обичайка із потрібною товщиною стінки. Додатковими пластинами можна змінювати висоту стінки обичайки. Цей метод кування дозволяє виготовляти обичайки діаметром більше 7000 мм на гідравлічному ковальському пресі зусиллям 150 МН [40]. Однак у статті не наведені данні з розмірів за переходами та повний технологічний процес кування таких обичайок.

Відомий також спосіб виготовлення крупногабаритних обичайок за межами гідравлічного пресу з використанням спеціального додаткового розкочувального пристрою [41]. Траверса преса тисне на бойок цього механізму. В результаті збільшується довжина плеча між пресом та

деформуючим бойком. Однак спосіб потребує використання спеціального пристрою, більш того, у такому пристрої неможливо виготовляти ступінчасті обичайки. У розглянутій роботі не приводиться опис розкочування та відсутні рекомендації з вибору розмірів заготовки перед розкочуванням.

При розкочуванні обичайки, коли розміри відповідають розмірам робочого простору ковальського гідравлічного пресу, відомі різне оснащення. Наприклад у роботі [42] для розширення діапазону розмірів обичайок, які виготовляються розкочуванням запропоновано оснащення, в якому дорн поєднано із траверсою преса, а деформуючий боек розташований на столі пресу. Деформовану пустотілу заготовку укладають на вирізний боек. Далі в отвір пустотілої заготовки вставляють дорн. При ході рухомої траверси деформуюче зусилля передається на обичайку через внутрішню поверхню. Але запропонована конструкція ускладнює витягання готової поковки з запропонованого оснащення.

Зменшення припусків та допусків у процесах кування крупногабаритних обичайок є актуальною задачею. Для зниження припусків та допусків був запропоновано оснащення для проведення операції розкочування [43]. При обратному ході траверси обичайка спирається на додаткову оправку, яка розташована з ексцентриситетом від вертикальної осі гідравлічного пресу. На столі пресу розташовано нижній боек із радіусним вирізом. Обмеженням розробленого оснащення є його вартість. Крім цього, ця конструкція не вирішує проблему виготовлення обичайок, розміри яких перевищують висоту робочого простору пресу.

У роботі [44] задля зниження витрат металу та трудомісткості процесу кування, запропоновано використовувати бандаж для забезпечення заданого зовнішнього діаметра та ширини обичайки. Цей бандаж збирається з двох напівкілець. Внутрішній профіль бандажа повторює формою ступінчастого кільця. Однак використання цього процесу розкочування ускладнюється застосуванням значної кількості бандажів при розширенні типорозмірів розкочуваних кілець

При розкочуванні високих обичайок відбувається вигинання дорну від дії зусилля деформування. В результаті цього обичайка буде мати більшу товщину стінки в середній частині. Задля усунення цього обмеження у роботі [45] запропоновано використання оправки бандажем. Поверхня обертання оправки та бандажа має криволінійну форму. Діаметр опорної поверхні бандажа у вузькій частині відповідає діаметру оправки. Це дозволяє виготовляти обичайки з постійною товщиною стінки по довжині. Розроблене оснащення є складним та вимагає виготовлення спеціальних елементів. Більш раціональним вирішенням цієї проблеми було б використання оправки більшого діаметру для виключення її прогинання.

1.4 Деформуючий інструмент для кування втулок

Виробництво АЕС на сьогодні спрямовано на збільшення потужностей, підвищення надійності та працездатності реакторних блоків [46]. Корпусний блок реакторів АЕС представляють собою порожні крупногабаритні та крупнотонажні деталі, основним методами їх виробництва є кування злитків гідравлічними пресами із використанням операції розкочування.

При проектуванні креслення поковки майбутньої обичайки на розміри деталі додаються припуски, які пов'язані із механообробкою та допуски, які пов'язані з точністю кування. При аналізі технологічності поковки спрощують конфігурацію заготовки, що призводить до призначення технологічного напуску [47]. В результаті збільшуються витрати металу собівартість виробу в цілому. У зв'язку з цим спрощення конфігурації поковки проти креслення деталі не завжди є рентабельним. Біль того, при механообробці поковки волокниста будова деталі перерізається, що призводить до утворення мікроконцентраторів напружень на перерізаних

волокнах та зменшення механічних характеристик виробів. Тому для усунення зазначених недоліків необхідно проектувати нові поковки, які повторюють контури деталі та виготовляти спеціальні бойки для розкочування ступінчастих обичайок.

Кування крупногабаритних ступінчастих обичайок вимагає спеціальної форми деформуючого інструменту. Стосовно високих обичайок, збільшення довжини бойка для розкочування призводить до зниження міцності інструменту і відповідно його прогинання. Посилення висоти інструменту призводить до зменшення висоти робочого простору пресу, що не дозволить виготовляти обичайки заданого діаметру [48]. Посилити жорсткість деформуючого інструменту можливо за рахунок призначення ребр жорсткості, які виконані збоку від деформуючої ділянки бойка [49]. Для цього був проведений скінчено-елементний розрахунок напружень, що виникають в інструменті при максимальному зусиллі преса. Впровадження такого бойка дозволило встановити, що у процесі розкочування поковки кільця висотою близько 6,0 м та товщини стінки обичайки 325 мм пружня деформація складала менш 10 мм, що набагато менше допусків на поковку.

У роботі [50] запропоновано пристрій, який дозволяє усунути нерівномірність бічної поверхні. Цей пристрій складається з дону та спеціальних шайб. В якості бурту використовується втулка з внутрішнім буртом. Ця конструкція втулки дозволяє змінювати довжину обичайки, що розкочується. В результаті покращується точність ширини обичайки. Однак запропонована конструкція не виключає застрягання поковки між буртами, що ускладнить процес розкочування.

У роботі [51] запропоновано метод для усунення хвилястості на бічній поверхні обичайки. Ця бічна хвилястість призводить до підвищених витрат металу при механообробці. У роботі пропонується проводити обтиснення пустотілої заготовки до 0,75...0,85 від діаметра, після чого провести осадження торців з остаточним розкочуванням при середній температурі інтервалу кування. Запропонований метод сприяє підвищенню точності

крупногабаритних обичайок. Цей спосіб можна також використовувати при розкочування ступінчастих обичайок, однак авторами цих досліджень не було проведено.

У статті [52] були досліджені різні співвідношення розмірів при розкочуванні обичайок. Встановлені рекомендації були покладені в основу для контролю розмірів та форми при виготовленні обичайок на дорні. Запропоновані рекомендації дозволили підвищити використання матеріалу у порівнянні з базовим техпроцесом кування обичайок. У процесі розкочування на дорні дефекти, що розташовуються у середині стінки пустотілої заготовки, закриваються, що підвищує якість виготовлених виробів. Однак у дослідженні не представлена інформація щодо методики дослідження та геометричних параметрів виготовлених обичайок.

Зменшення витрат металу є основним напрямком удосконалення техпроцесів кування обичайок. Прогресивним методом зменшення металовитрат є виготовлення поковок по формі деталі, але це потребує виготовлення спеціального деформуючого інструменту. Це дозволить заощаджувати вартісну сталь за рахунок зменшення величини напусків та зменшити час механообробки.

У роботі [53] показано, що крупногабаритна обичайка для котлів парогенераторів реактора АЕС із водо-водяним принципом роботи є також важливим елементом та ці деталі потрібно виготовляти куванням на гідравлічних пресах. Складність конструкції парогенератора потребує його виготовлення з напусками та припусками. Це дозволяє виготовляти спрощені за геометрією заготовки, але обмеженням способу є збільшені металовитрат, які пов'язані з тим, що деталь має більш складну форму. Це обмеження можна усунути при використанні способу кування, коли разом з виготовленням обичайки парогенератора виготовляються штуцери та відводи. В результаті поковка буде мати ступінчастий профіль. Ступінчасті кільця використовуються при виготовленні штуцерних кілець для котлів підвищеного тиску. Технологія кування складається з таких операцій:

білетування злитку, рубка донної та прибуткової частини злитка, подальше осадження отриманого блоку, прошивка та розкочування на циліндричній оправці звичайним бойком. Після чого пустотілу заготовку кують деформуючим інструментом, зовнішня поверхня якого повторює зовнішній контур деталі. Обмеженням методу є низька стабільність утворення форми при розкочуванні ступінчастим інструментом. Крім цього, у роботі не досліджені геометричні параметри пустотілої заготовки перед обкочуванням при використанні нового деформуючого інструменту.

Корпорацією AREVA для реактора CAP1400, були розроблені та виготовлені дві обичайки зони патрубків атомного реактору, які виготовлені разом з фланцем для кріплення кришки реактора. Було викувано дві подібні обичайки. Особливостями методу було те, що обичайка із фланцевою ділянкою виготовлялися із використанням бойка зі ступінчастим профілем [54]. Однак, у дослідженнях не представлені рекомендації для визначення розмірів пустотілої заготовки перед розкочуванням, та геометрія деформуючого інструмента.

У роботі [55] розглянуто процес виготовлення куванням обичайки компанією Japan Steel Works зі злитка вагою близько 480 тон на гідравлічному пресі зусиллям 150 МН. Для кування була запропонована наступна технологія: рубка донної та прибуткової частини, осадження блоку, його пришивання, розкочування на дорні з виготовленням уступу на частині поковки між фланцем і зоною патрубків. Однак у роботі не встановлено напружено-деформований стан у процесі ступінчастого розкочування, що може призвести до утворення конусної форми заготовки.

Компенсувати утворення конусної форми поковки при розкочуванні ступінчастих обичайок можливе за рахунок використання методу розкочування заготовок, які попередньо мали форму усіченого конуса [56]. Після виготовлення пустотілої заготовки з конусною формою, цю заготовку одягають на дорн і проводять розкочування з боку меншого діаметру конуса. При формуванні уступу відбувається вирівнювання діаметрів і поковка

набуває циліндричної форми. Обмеженням запропонованого методу необхідність виготовлення додаткового інструменту конічної форми. Однак для різник ступінчастих обичайок буде потребуватися інструмент із різним кутом конуса.

Підвищити точність поковок з одночасним зменшенням металовитрат відомі різні методи виготовлення пустотілих заготовок із різною формою: конусної, усіченої сфери, ступінчасті обичайки із буртами на зовнішній та внутрішній поверхнях. У роботі [57] розглядається спосіб кування заготовок зі сферичною формою. Спосіб потребує використання інструменту зі сферичними поглибленнями для надання заготовці форми сфери. У запропонованому методі кування відсутня конструкція інструменту, що була б універсальною. Це обмежує тип та розміри поковок, що виготовляються, а також потребують збільшення кількості інструменту.

Для виготовлення сферичних заготовок у роботі [58] запропоновано спеціальний бойок із сферичним поглибленням та опуклу оправку. Запропонований метод розширює технологічні можливості кування заготовок, які наближаються за розмірами до деталей, що в результаті призводить до зниження металовитрат, а також часу потрібного для механічної обробки. Однак у представленій роботі не досліджено вплив нового способу на уширення заготовки при розкочуванні у порівнянні з базовим процесом розкочування.

Для зменшення металовитрат при куванні порожніх обичайок конусної форми із рівномірною стінкою у роботі [59] запропоновано використання конусного дорна для розкочування. В результаті різної площі контакту інструменту та заготовки утворюються при куванні конусна форма. Сталість товщини стінки обичайки гарантується тим, що поверхня бойка паралельна бічній поверхні оправки. Відкритим залишається питання щодо кута конусності оправки задля отримання потрібної конусності на обичайці. Більш того ускладнюється процес кантування оправки, яка розташовується під кутом до горизонту.

У роботі [60] запропоновано спосіб кування конусних обичайок на циліндричній оправці. Це стає можливим за рахунок розкочування пустотілої заготовки із внутрішньою конусною поверхнею, яка була попередньо сформована при протягуванні на конусній оправці. Після цього таку заготовку деформують на оправці, що має циліндричну форму.

Далі цю заготовку розкочують на циліндричному дорні. Конусна форма поковки утворюється за рахунок більшого ступеня деформації металу з боку де була більша товщина стінки пустотілої заготовки. Однак у роботі не встановлено зв'язок конусності оправки з кутом конусності отримуваної поковки для різних режимів деформування та різних товщин стінок вихідної заготовки.

У роботі [61] запропонований метод розкочування обичайок із конусною формою та сталою товщиною стінки за рахунок деформування пустотілої заготовки з уступами, які послідовно розташовані від одного краю до іншого. Спосіб кування дозволяє зменшити витрати металу при виробництві кілець із конусною формою. У процесі деформування заготовки деформуючий інструмент не зсувається уздовж осі оправки та деформує заготовку по усій довжині. Однак у роботі не представлені данні щодо попереднього виготовлення ступінчастої заготовки, а також висоти уступів для отримання заданої конусності поковки.

У статті [62] запропоновано спосіб кування конусної обичайки із циліндричним уступом, яка йде на виготовлення корпусу парогенератора реактора AP1000. Для виготовлення конічної пустотілої поковки із циліндричним уступом на пресі необхідно розробити спеціальний технологічний процес кування злитка. Складну форму обичайки пропонується виготовити в такий спосіб з використанням наступних операцій: білетування злитка, рубка донної та прибуткової частини злитка, осадження блоку, прошивка отвору, кування на конічній оправці з формування уступів на зовнішній поверхні, далі з використанням валка, циліндричній оправки і плоского деформуючого інструмента формується

отвір конусної форми. На завершальному етапі оформлюється циліндричний уступ із застосуванням спеціального оснащення. Однак спосіб потребує використання спеціального інструменту, який не є універсальним та буде придатний для виготовлення тільки заданої обичайки.

Для виготовлення крупногабаритного розтруба парогенератора, який має 2 циліндричні паски можна задіяти спеціальний деформуючий інструмент та спеціальну оправку [63]. Згідно запропонованого способу розтруб виготовляється таким чином: кування заготовки із циліндричною формою, осадження заготовки, прошивання отвору пустотілим прошивнем, кування на конусній оправці, формування циліндричних пасків на торцях заготовки.

У роботі [64] задля зниження металовитрат і підвищення продуктивності процесу кування конусних ступінчастих обичайок пропонується застосовувати ступінчастий деформуючий інструмент або ступінчастий дорн. Попереднє деформування проводять із двома фланцями на заготовці, а в крайньому нагріванні проводять остаточне розкочування фланця тільки з однієї сторони. В результаті такого способу кування діаметр заготовки збільшується тільки з одного краю, що призводить до утворення конусної форми пустотілої заготовки. У роботі дослідження проводилися на свинцевих моделях, при цьому відсутні данні щодо змінення форми заготовки та утворення конусності у процесі розкочування в залежності від величини обтискання.

При виготовлені обичайок із буртами на зовнішній та внутрішній поверхні у роботі [65] пропонується застосовувати пустотілу заготовку, якій довжина дорівнює ширині бурта обичайки. До деформування її розташовують на оправці вирівнюючи по бічних торцях. Деформування проводять у два етапи.

Перший етап – поковку обкочують на тавровий профіль з формуванням виступу на внутрішній поверхні обичайки. Далі її надсікають по зовнішній поверхні з двох боків на відстані, яка дорівнює висоті зовнішнього бурта

обичайки. Другий етап – остаточно оформлюють заданий контур обичайки. Обмеженням даного методу є потреба у частій зміні верхнього деформуючого інструменту у процесі кування, через що заготовка буде охолоджуватися це буде потребувати додаткового нагрівання та зайвих витрат енергоносіїв.

Для виготовлення обичайок із двотавровим перерізом, коли на бічних торцях формуються поглиблення, у роботі [66] запропоновано одночасно формування циліндричного поглиблення за допомогою додаткових шайб з буртом, які формують вищезгадані поглиблення. Обмеженням даного методу кування є складність конструкції оснащення та збільшення площі контакту заготовки з інструментом, що призведе до інтенсивного охолодження заготовки та частого її підігрівання.

У роботі [67] авторами запропоновано спосіб, який направлений на розширення типорозмірів поковок шляхом виробництва обичайок із внутрішнім буртом та відповідним цьому бурту поглибленням. При цьому вирішується проблема покращення якості поковок через застосування ступінчастого дорну. Зовнішні поглиблення виготовляють шляхом обтискання випуклого деформуючого інструмента. Попереднє деформування проводять за рахунок операції розкочування пустотілої заготовки до внутрішнього діаметра, який більше за діаметр оправки. Це пов'язано із можливістю одягнути пустотілу заготовку на оправку. Однак, у роботі не представлена інформація, щодо проблеми застрягання поковки на верхньому випуклому бойку.

Схожий на попередній, у роботі [68] запропоновано метод розкочування кільцевих заготовок з U-подібним перерізом, який полягає у деформуванні заготовки на дорні. На цій операції виготовляють проміжну заготовку з боковими фланцями та внутрішнім їм буртом та виїмкою в боку внутрішньої та зовнішньої поверхні. Наприкінці формування такої заготовки, фланці втягуються у порожнину дорну. Обмеженням методу кування є висока вірогідність застрягання U-подібної заготовки у виїмці дорну або на

виступі верхнього деформуючого інструменту. Зазначені недоліки будуть потребувати призначення зайвих ухилів у виїмці дорну та виступі верхнього бойка.

У роботах [69] запропоновано спосіб виробництва кілець зі спеціальною внутрішньою та зовнішньою поверхнями. Поставлена задача вирішується за рахунок застосування оправки та деформуючого верхнього інструменту зі складними профілями. При виготовленні внутрішнього складного профілю необхідно за одне нагрівання провести кування на складнопрофільованому дорні з остаточним деформуванням кільця на дорні. Але у розглянутих роботах не наведені певні данні зі форми та розмірів пустотілих заготовок, які потрібні для деформування в залежності від форми та розмірів кінцевих виробів.

Літературний огляд робіт з виробництва кілець та обичайок зі складним профілем дозволив визначити, що на сьогодні відомо багато методів формування пустотілих виробів, у тому числі зі складною геометрією, які захищені винаходами та авторськими свідоцтвами, однак майже усі ці патенти не використовуються в енергетичному машинобудуванні при виготовленні корпусних деталей атомних реакторів та парогенераторів.

На основі аналізу методів кування обичайок було визначено, що на теперішній час не відомі конкретні технологічні та конструкторські рекомендації з геометрії інструменту та заготовок для розкочування, що гарантували б виготовлення обичайок заданої форми та розмірів. Як результат, це потребує проведення спеціальних дослідів для визначення даних впливу співвідношення розмірів вихідної пустотілої заготовки на розміри кінцевого виробу.

1.5 Методи та методики дослідження процесів розкочування та кування крупних поковок відповідального призначення

Технологічні процеси кування крупногабаритних заготовок відповідального призначення – дуже складні з точки зору специфіки процесу та розмірів досліджуваних поковок. Це потребує розробки спеціальних методик моделювання експериментальними та теоретичними методами досліджень і тільки за результатами цих досліджень проводити апробацію та впровадження нових способів кування у промисловість [70].

На сьогодні в науковій літературі дуже мало даних з моделювання та дослідження процесів деформування крупногабаритних складнопрофільних обичайок. Дрібні деталі кілець зі складним профілем у серійному виробництві виготовляються на розкочувальних машинах [71]. Процеси виробництва конусних обичайок та обичайок з буртом чи фланцем є складними та можуть призводити до утворення дефектів форми [72]. Це свідчить про те, що виготовлення розкочуванням заготовок по типу складнопрофільних кілець, коли форма поковки повторює контури деталі є своєчасною задачею в енергетичному машинобудуванні.

Для промисловості України на сьогодні є актуальними задачі, які стосуються удосконалення існуючих та розробка нових техпроцесів виготовлення деталей відповідального призначення, розробка енерго- та матеріалозберігаючих процесів технологій. Повторення форми поковки до контуру деталі, забезпечить знизити металовтрати, витрати часу на механообробку, зменшить використання дороговартісного інструменту [73]. Це потребує використовувати при куванні операції профілювання контуру поковки. Таке профілювання вимагає розробки спеціального оснащення та деформуючого інструменту із заданою формою. Розробка та удосконалення технологічних процесів кування стане можливим за умови визначення напружено-деформованого стану металу заготовки у процесі кування та

профілювання інструментом спеціальної форми. Кування крупних поковок вимагає проведення експериментальних досліджень на модельних зразках, які виготовлені з використанням закону подібності. Крім цього, для теоретичних методів досліджень слід використовувати такі методи, що дозволяють враховувати специфічні процеси, які виникають у металі при деформації при високих температурах.

При дослідженні процесів кування слід проводити числове та експериментальне моделювання. Експериментальне дослідження характеризується тим, що фізичні процеси, які будуть протікати у модельному зразку та натурному зразку повинні бути однаковими [74]. При теоретичному дослідженні фізичні властивості можуть відрізнятися, але математичні співвідношення повинні бути ідентичними. Для експериментальних та теоретичних методів досліджень притаманні свої обмеження. Для отримання більш достовірних результатів слід комбінувати використання цих методів вивчення реальних процесів [75].

Підприємства важкого та енергетичного машинобудування частіш за все відносяться до одиничного або дрібносерійного виробництва, тому що виготовлення крупногабаритних деталей є одиничними. Розробка або удосконалення техпроцесів кування крупногабаритних поковок потребує розробки спеціального інструменту для деформування. Технологічні та конструкторські відділи підприємств важкого машинобудування перевантажені значною кількістю замовлень і терміни їх виконання лімітуються розробкою технологічної документації для реалізації процесів кування злитків. В результаті число факторів, які впливають на техпроцес кування слід звести до оптимального значення, щоб не перевантажити дослідження з одного боку та отримати якісні результати з іншого боку. Ефективним напрямком прискорення розробки технологічної документації є використання таких методів та методик дослідження, які дозволять оцінити якість отримуваних деталей після кування. Це стає можливим за умови використання сучасної обчислювальної техніки та спеціалізованого

програмного забезпечення. Такі підходи до розробки нових технологічних процесів дозволяють спростити процес проектування [76].

На сьогодні найпоширеним методом моделювання задач ОМТ є МСЕ [95 – 98], який дозволяє моделювати складні фізичні процеси та встановлювати напружено-деформований стан у процесі кування злитків у гарячому стані. Результати МСЕ з високим ступенем достовірності підтверджується експериментом.

З використанням МСЕ проектуються нові та удосконалюються існуючі техпроцеси кування заготовок найвідповідальнішого призначення [77]. На сьогодні відома значна кількість САМ, САД, САЕ систем для моделювання процесів обробки тиском, в даному випадку процесів кування злитків.

У статтях [78] досліджуються основні параметри, що чинять вплив на дефектоутворення при кристалізації крупнотонажних зливків. За результатами досліджень було встановлено, що на форму та розміри усадкової раковини, а також утворення підприбуткових дефектів основний вплив чинять: висота зливка, його форма та використання теплоізоляції. Однак, у роботі не доведено, як хімічний склад може чинити вплив на розташування внутрішніх дефектів, неметалевих потраплянь. Ця інформація важлива тим, що це в першу чергу впливає на вірогідність утворення внутрішніх розривів в процесі деформації литого металу.

У статті [79] представлено використання методу скінчених елементів для встановлення значних деформацій при суттєвих обтисканнях при куванні. Пошук ефективних способів кування крупногабаритних деталей ґрунтується на всебічному аналізі напружено-деформованого стану на основі даних методу скінчених елементів.

У статтях [80] з використанням методу скінчених елементів проводилось моделювання заковування дефектів злитків при проведенні операцій кування у гарячому стані. За результатами моделювання були визначені режими реалізації операцій білетування та осадження циліндричних заготовок. Однак у роботах не наведена інформація щодо

подальшої поведінки внутрішніх несучильностей при проведенні операцій прошивання та обкочування на оправці.

У дослідженні [81] з використанням методу скінчених елементів проведено аналіз процесів кування плоским та комбінованим деформуючим інструментом. За результатами досліджень було встановлено, що при куванні верхнім плоским та нижнім вирізним бойками максимальні деформації локалізуються в осевій зоні злитка.

У статтях [82] з використанням методу скінчених елементів встановлювалась ймовірність операції розкочування на циліндричній оправці крупногабаритних кілець. Були встановлено напружений стан в заготовці та інструменті під час деформації. Однак отримані результати притаманні тільки простих операцій на циліндричних заготовках.

У дослідженнях [83] моделюються операції кування поковок конічної форми на базі методу скінчених елементів. Були виявлені початкові розміри заготовок для виготовлення заданих розмірів поковки. Отримані рекомендації з процесу кування були реалізовані на підприємстві. Але у зазначених дослідженнях не встановлювались рекомендації для кування ступінчастих пустотілих заготовок.

З використанням методу скінчених елементів були досліджені параметри операції обкочування спеціальних кілець за допомогою розкочувальних машин [50]. Моделювання проводилось із урахуванням сил тертя та теплофізичних характеристик сталі. Враховано кутова швидкість обертання деформуючих роликів.

Методом скінчених елементів досліджувався техпроцесу деформування різних типів заготовок, які використовуються при виготовленні деталей реакторних блоків АЕС. В статті [84] проаналізовано існуючий досвід та перспективи розвитку енергетичного машинобудування для модернізації АЕС на базі підприємства Doosan. Виконано скінченно-елементне моделювання,, проведено експериментальне дослідження на

свинцевих моделях з натурального матеріалу, що дозволило розробити новий техпроцес кування заготовок для АЕС.

На основі аналізу літературного огляду було визначено, що метод скінчених елементів дуже розповсюджений при дослідженні процесів кування крупногабаритних поковок. Цей метод використовується для досліджень процесів затвердіння та утворення внутрішніх дефектів при виготовленні ковальських злитків, процесів пластичної деформації гарячих злитків та метод моделювання операцій термообробки крупногабаритних виробів. Необхідно зазначити, що метод скінчених елементів дозволяє дослідити формозмінення заготовки при куванні та утворення поверхневих та внутрішніх дефектів, а також встановлення енергосилових параметрів процесів деформування. Тому для дослідження процесів кування крупногабаритних складнопрофільних обичайок слід використовувати саме цей метод.

Аналіз напрацювань за тематикою проекту дозволив встановити, що останнім часом потреба у масивних деталях найвідповідальнішого призначення для енергетичного машинобудування збільшується [85]. Зміна геометрії деформуючого інструменту є основним напрямком забезпечення утворення макропотоків металу для утворення сприятливої анізотропії механічних властивостей [86]. На теперішній час відсутні рекомендації з форми бойків та розмірів заготовки перед розкочуванням, що сприяли б підвищенню проробки структури металу та отриманню заданих розмірів деталей [87].

В роботах [88] досліджено процес кування двох крупногабаритних обичайок для реакторного блоку CAP1400, розробленого компанією AREVA. Було відкрито обичайку зони патрубків. Запропоновані технологічні процеси передбачали закриття напусками фланців обичайок. Крім цього, у роботах відсутні рекомендації щодо співвідношень розмірів заготовки до проведення операції розкочування.

У роботі [89] запропонований та досліджений спосіб виготовлення обичайок, який передбачає попереднє формоутворення конусної порожнистої заготовки та її остаточне деформування розкочуванням на

оправці з формуванням ступеня меншого діаметра. Розкочування проводили до формування циліндричної зовнішньої поверхні. Запропонована технологія не забезпечує появу макропотоків металу, що сприяло б утворенню волокнистої структури з формуванням сприятливої анізотропії механічних властивостей, а також не придатна для виготовлення циліндричної обичайки з фланцем.

Авторами робіт [90] досліджувався спосіб кування конусної обичайки з двома циліндричними ділянками. Для цього пропонувалось використовувати спеціальний бойок сідлоподібної форми і оправку з відповідним профілем. Отримана за даною технологією заготовка для обичайки реакторного блоку передбачає виготовлення фланцевої ділянки деталі за допомогою механічної обробки, що призведе до перерізу волокон структури та зниження втомної міцності у місті переходу з уступу на фланець, а також збільшення витрат металу.

Аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених за тематикою проекту дозволив встановити, що існуючі способи виготовлення обичайок реакторів складної форми не гарантують отримання поковок по контуру деталей, що призводить до підвищених витрат металу та зниження механічних властивостей зазначених виробів (внаслідок збільшення кількості зварних швів та перерізання внутрішнього волокна металу). Ці аспекти потребують проведення додаткових досліджень для визначення впливу форми інструменту та заготовки на її формозмінення та базові показники якості готового виробу.

1.6 Перспективи розвитку технологій і оснащення та розробка нової концепції для кування крупногабаритних поковок із ковальських злитків

За результатами проведеного огляду, встановлена необхідність подальшого розвитку наукових основ проектування й розробки нових ресурсозберігаючих технологічних процесів кування крупногабаритних поковок відповідального призначення, що вимагає проведення додаткових комплексних досліджень. Розв'язок поставленого завдання може бути забезпечений за рахунок розвитку відповідних методів автоматизованого розрахунків, моделювання й проектування технологічних процесів кування. Існуючі технологічні процеси кування не рентабельні через високу собівартість і неконкурентоспроможні через низьку якість одержуваної продукції.

Обсяги виробництва важкого машинобудування зростають. Це викликане збільшенням обсягів виробництва крупногабаритних поковок зі злитків, і така тенденція буде зберігатися в найближчі роки (табл. 1.1). Для виконання зростаючої потреби енергії у світі потрібне збільшення потужностей енергетичних установок, деталі яких виготовляються з крупногабаритних поковок.

У цьому зв'язку побудовані унікальні гідравлічні преси: Китай (180 МН), Корея (170 МН), Україна (150 МН) і ін. Важки злитків, які будуть куватися на цих пресах: Південна Корея і Японія (650т), Китай і Україна (450 т). Тільки для виробників крупногабаритних поковок Німеччини з 2005 по 2006 рр. загальне виробництво поковок збільшилося на 14 %, а обіг коштів із 765 млн € в 2002 р. до 1 273 млн € в 2006 р. Крім збільшення обсягів виробництва й виробничих потужностей, основними напрямками розвитку ковальського переділу є підвищення якості, зниження собівартості й

розширення сортаменту крупногабаритних поковок і злитків для їх виробництва.

Досягнення зазначеного рівня виробництва може бути забезпечене за рахунок проведення заходів (технологічних і конструкторських), пов'язаних зі зміною концепції розробки технологічних процесів кування й виробництва якісних ковальських заготовок. До заходів технологічного плану слід віднести раціональне призначення енергоємних ковальських операцій або заміну їх більш ефективними з погляду усунення металургійних дефектів злитків, оптимізацію технологічних режимів нагрівання й деформування, а також підвищення ступені їх автоматизованого розрахунків.

Питанням удосконалювання технологічних процесів кування присвячене цілий ряд робіт, що відрізняються підходами до розв'язку проблеми, критеріями їх оцінки, методами й методиками досліджень. У якості основних підходів удосконалювання процесів використовують: різні форми заготовок, послідовності операцій, застосовуваний інструмент і оптимізацію термомеханічних режимів деформування. Критеріями оцінки оптимальності є умови: заварювання внутрішніх дефектів заготовки (за результатами УЗК) і одержання заданого рівня механічних властивостей; забезпечення мінімуму нагрівів і змін інструмента, праце- і енергоємності; досягнення високої точності розмірів поковок і ін.

Останнім часом у якості методу аналізу процесів кування злитків серед вітчизняних і закордонних дослідників одержав широке поширення МСЕ.

До заходів конструкторського плану слід віднести: оптимізацію форми ковальського інструмента з метою максимального й рівномірного пророблення литої структури металу заготовки; зниження зусиль деформування й забезпечення в тілі злитка напруженого стану нерівномірного всебічного стискання для заварювання внутрішніх порожнеч злитка; удосконалювання й розробку нових конструкцій виливниць для одержання злитків високої якості.

Таблиця 1.1 – Виробничі потужності машинобудівних підприємств

Фірма	Країна	Маса злитка, т		Прес, тис. т		Штат, тис. чіл.	Обсяг виробн ицтва, тис. т	Обіг, млн євро
		2009	2013	2009	2013			
JSW	Японія	600	650	14	14	4	-/80	170
Kobe Steel	Японія	520		13	13	0,8	150/86	270
JCFC	Японія	510	600	10,5	13	0,48	105/54	146
Sheffield FM	Англія	340	500	10	15	0,6	120/70	118
Saarschmiede	Німеччина	200		8,67	8,67		68/40	85
Areva	Франція	250		11,3	11,3	0,68	180/30	355
Doosan	Пів. Корея	540	650	13	17		200/100	
Pilsen Steel	Чехія	220		10	10	1,2	80/30	65
CFHI	Китай	350	580	12,5	15	11	180/75	260
CSHI	Китай	400		14	18	14	190/72	260
SHMP	Китай	143		15,6	15,6	2,7	80/20	190
Harbin Boiler	Китай			8				
Shangai (SEC)	Китай		600	15	15			
Erzhong Dogfang	Китай		600	12,7	12,7			
L&T	Індію		600		15			
Bharat Forge	Індію				14			
OM3-CC	Росія	350		13	13			
BM3 ДО	Росія	140		13	13			
EMCC	Україна	130	450	15	15	2,9	102/58	147
HKMЗ	Україна	170	170	10	10	14	107/38	

Таким чином, резерви по вдосконалюванню й розробці нових заготовок і технологічних процесів кування вичерпане не повністю. Проаналізувавши

тенденції в удосконалюванні технологічних процесів кування, можна зробити висновок, що розробка нових методів кування є однією з важливих актуальних завдань у важкому й енергетичному машинобудуванні. Можна виділити наступні шляхи вдосконалювання технологій кування крупногабаритних поковок:

- виключення операції осадження з технологічного процесу, що дозволяє знизити енерго- і працезатрати, виключити розкриття внутрішніх дефектів;
- використання більш якісних заготовок спеціальної геометрії, яка дозволяє виключити операцію осадження;
- використання операцій і інструмента, що сприяють проробленню литої структури й заварюванню дефектів осової зони злитка;
- оптимізація кількості нагрівань заготовок;
- використання для оцінки якості кування не коефіцієнта укову, а величину накопиченої інтенсивності деформації в тілі заготовки як більш об'єктивний фактор пророблення литої структури.

Раціональною технологією одержання крупногабаритних поковок є використання нових злитків. Виключення енергоємної операції осадження призведе до зменшення кількості нагрівів і можливості використання для кування менш потужного встаткування.

На сьогодні АЕС є стратегічними об'єктами для держави та дають значний відсоток виробленої енергії. Кожна країна прагне мати в своїй енергетичній структурі АЕС для покриття своїх потреб в енергетиці та продажу електроенергії своїм партнерам. Багато країн вже мають АЕС, а зріст потреби в електроенергії лише збільшує попит на них. При цьому, вже існуючі АЕС потребують модернізації, з урахуванням сучасних технологій виробництва, навантажених елементів реакторних блоків. В результаті, в Україні та світі з'являється необхідність у реконструкції існуючих та побудові нових більш потужних АЕС.

Основною найбільш відповідальною ланкою АЕС є атомний реактор. Тому, проблема підвищення строку експлуатації на сьогодні залишається

актуальною. У зв'язку з цим, виникає потреба, щодо виготовлення деталей атомних реакторів для підвищення їх міцності, надійності та безпечності і таким чином підвищенню строку його експлуатації. Це ставить важливе завдання перед енергетичним машинобудуванням усього світу. Слід зазначити, що Україна входить у десятку країн, які мають промислові потужності для виготовлення деталей АЕС. Це такі підприємства як: ПАТ «Енергомашспецсталь», ПАТ «Турбоатом», ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» та ін. Науково-технічний потенціал енергетичного машинобудування України достатній для того, щоб розробляти сучасні технологічні процеси виготовлення елементів корпусів реакторних блоків, які будуть використовуватися на внутрішньому ринку, а також для продажу їх на міжнародних ринках.

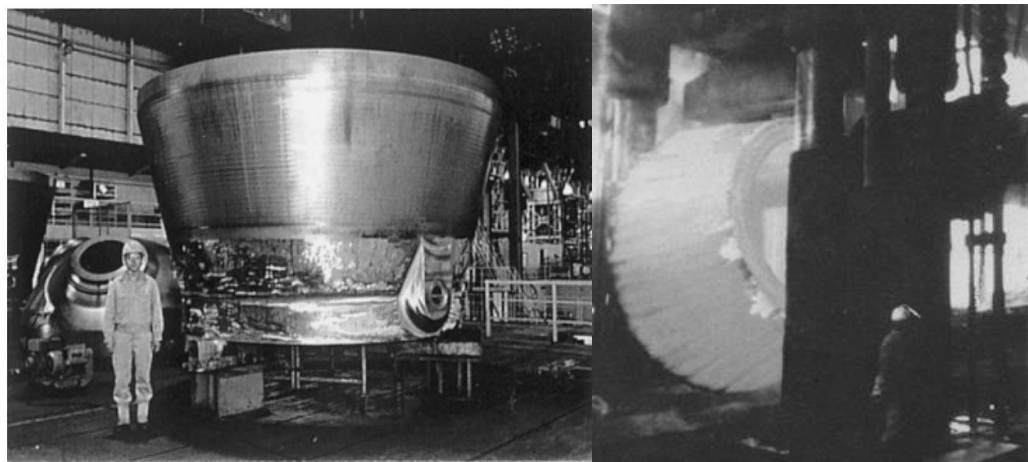
В більшості випадків корпус реакторного блоку АЕС представляє собою конструкцію, яка складається з окремих елементів складної форми. З огляду на безпеку реактора та підвищення строку його експлуатації, під час виготовлення корпусу реакторного блоку намагаються зменшити кількість зварних швів. Зварні шви є концентраторами напружень та радіації, що знижує термін роботи блоку. Тому у реакторних блоках доцільно поєднувати обичайки зони патрубків з обичайками активної зони. Через це збільшується попит на складні та великі за розміром обичайки, які поєднують в собі декілька складових реакторного блоку (суцільно ковані елементи реакторних блоків). Крім цього, необхідно також підвищувати механічні властивості деталей реакторного блоку, для підвищення його ресурсу та на випадок виникнення надзвичайних ситуацій.

Відомі у літературі рішення для підвищені надійності елементів реакторних блоків, полягають в основному у використанні спеціальних сталей та сплавів та поліпшені технології лиття, очищення та кристалізації злитків. Проблемам розробки нових технологічних процесів виготовлення цих деталей, які б дозволили підвищити їх експлуатаційні характеристики, не приділялось достатньої уваги. Розробка нових способів та підходів

виготовлення елементів корпусів реакторних блоків є важливим та дієвим напрямком підвищення їх якості та надійності. Крім цього, собівартість виготовлення цих деталей є дуже високою, що пояснюється неефективністю використання окремих операцій та значними витратами металу.

Розвиток наукових основ підвищення якості та зниження собівартості крупних поковок і, таким чином, підвищення конкурентоспроможності виробництва деталей відповідального призначення вимагає проведення спеціальних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розробку нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів кування, ковальського оснащення та заготовок. Це вимагає застосування інтегрованого підходу, який враховує складний ланцюг всієї технологічної послідовності від виготовлення злитків до подальшого їх кування та механообробки. Розробка нових ресурсозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок з одночасним підвищенням їх якості вимагає розробки нових схем деформування, виготовлення та застосування нового ковальського оснащення та інструменту. Ефективним методом дослідження, в цьому випадку, є використання сучасних методів моделювання напружено деформованого стану (НДС), які характеризуються високою точністю одержуваних результатів.

Аналіз літературних джерел вказує на те, що конусні та східчасті втулки застосовуються у атомній енергетиці та є перспектива подальшого розвитку та застосування подібних деталей. На рисунку 1.1 наведено приклади деталей та поковок, які отримувалися раніше. Для їх отримання були застосовані різноманітні схеми виготовлення. Усіх їх поєднувала одна мета – скоротити витрати матеріалу та підвищити якість та довговічність виробу. Тому дослідження отримання східчастих обичайок є актуальною проблемою як у світі, так і в Україні.



а)

б)

Рисунок 1.1 – Приклади конусних втулок : а – поковка зі злитка 370 т для корпусу реактора потужністю 1300 МВт (JSW, LTd); б – поковка зі злитка 300 т для корпусу реактора потужністю 1600 МВт (JSW, LTd);

Для дослідження процесу розкочування конусної поковки зі східчастою зовнішньою поверхнею була обрана деталь реактора РІТМ-200. Проаналізувавши деталь були призначені напуски для спрощення форми деталі та були призначені припуски та допуски.

Висновки за розділом 1

1. В усьому світі спостерігається ріст потужностей виробництва крупногабаритних поковок. Найбільш крупнотонажні злитки й поковки найближчим часом будуть робити Японія, Південна Корея, Великобританія, Україна, Росія й ін. Відмічуваний ріст споживання поковок, у тому числі в енергетичній галузі, свідчить про розвиток важкого машинобудування. Має місце значне інвестування індустрії виробництва крупногабаритних поковок, при цьому акцент роблять на збільшення маси злитків, підвищення коефіцієнта використання металу й підвищення якості поковок і заготовок для їхнього виробництва.

2. Традиційні технологічні процеси кування крупногабаритних

поковок не відповідають вимогам по УЗК і макроконтролю. Додаткові операції, спрямовані на підвищення якості малоефективні й приводять до збільшення енерго- і працездат, що підвищує собівартість поковок. Це робить технологію неконкурентоспроможною на ринку поковок. Необхідно виключати небажані, з погляду підвищення якості, проміжні енергоємні операції. Перспективним є розробка таких способів кування, які б у комплексі поліпшували технологію. Остаточно науково не обґрунтований вплив операції розкочування на якість крупногабаритних поковок і заковування внутрішніх дефектів.

3. Подальший розвиток важкого машинобудування нерозривно пов'язаний з розширенням номенклатури продукції, підвищенням якості й зниженням собівартості крупногабаритних поковок, здійснюваних на основі вдосконалювання діючих, а також створення й промислового освоєння нових високоефективних технологій. Впровадження цих заходів вимагає додаткових фінансових витрат і підвищення ступеня наукової обґрунтованості технологічних і конструкторських рішень. Основними напрямками по вдосконалюванню технологій ковальсько-пресового виробництва є: раціональний вибір послідовності ковальських операцій, застосування нових ефективних технологічних рішень, оптимізація термомеханічних режимів деформування, а також підвищення ступені автоматизації розрахунків технологічних параметрів. Усунути несприятливий напружено-деформований стан при куванні, яке приводить до нерівномірних механічних властивостей і утвору внутрішніх розривів можна, застосовуючи кування бойками спеціальної форми. Застосування нових технологічних схем кування вимагає даних про розподіл деформацій і усунення осьових дефектів злитка. Однак у літературі немає даних про вплив такого способу деформування на закриття внутрішніх дефектів і напружено-деформованого стану заготовки в процесі кування.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ГАРЯЧОМУ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

2.1 Обґрунтування напрямку дослідження розкочування конусних втулок зі ступінчастою поверхнею

Розробка науково-практичних основ підвищення механічних властивостей та зменшення метало- та енерговитрат при куванні крупногабаритних поковок відповідального призначення дозволить підвищити конкурентоздатність виробництва, потребує реалізації комплексних математичних і натурних досліджень, які дозволять розробити нові або модернізувати існуючі техпроцесів кування, деформуючого інструменту та конструкцій злитків. Це потребує використання комплексного підходу, що буде суміщати увесь технологічний цикл виробництва заготовок відповідального призначення від відливання зливків, їх деформування та механічної обробки. Удосконалення ресурсозберігаючих техпроцесів виготовлення куванням крупногабаритних заготовок для деталей реакторів при одночасному покращенні механічних властивостей потребує проектування спеціальних способів деформації, виробництва та використання нового деформуючого інструменту. Раціональним способом моделювання для цього є застосування потужних теоретичних методів, які дозволяють встановлювати ТНДС металу заготовки та мають високу достовірність отримуваних результатів.

Основним актуальним напрямком росту виробництва України є впровадження метало- та енергозберігаючих техпроцесів кування заготовок для деталей найвідповідального призначення, які використовуються в енергетичного секторі економіки. Це потребує впровадження сучасних наукоємних техпроцесів, що будуть підвищувати механічні властивості виробів за рахунок застосування спеціальних схем кування з макрозсувними

деформаціями в об'ємі литої заготовки. На теперішній час у енергетичному машинобудуванні не достатньо даних та науково-практичних розв'язків для проектування ресурсозберігаючих техпроцесів кування крупнотонажних злитків, що використовуються при виробництві заготовок для деталей найвідповідальнішого застосування [91]. В результаті виробники енергетичного обладнання вимушені виробляти продукцію тільки для потреб держави.

Аналіз літературних даних дозволив встановити, що на європейському ринку перші позиції виробників парогенераторів та реакторів АЕС займають такі фірми: AREVA S.A. Зазначені фірми останнім часом модернізували конструкції і технології виготовлення деталей реакторів та парогенераторів АЕС. Ці виробники намагаються заповнити попит на крупні та дрібні АЕС [92].

Реакторні установки потребують відповідати надійності та працездатності в любых техногенних умовах. Перше завдання для конструкторів та технологів – підвищення механічних властивостей теплостійких сталей та елементів реакторів АЕС. У зв'язку з цим проектуються нові та удосконалюються існуючі техпроцеси деформаційної, зварювальної та термічної обробок. При цьому потрібно зменшувати витрати на виробництво реакторних блоків [93]. Відповідно це вимагає проведення спеціальних досліджень, розробки та апробації.

Важливе значення мають деталі конструкції реакторних блоків, які мають крупногабаритні розміри та складну конфігурацію. Перш за все, це обичайки, які суміщають дві деталі в одну (фланець кришки реактора та верхня обичайка зони патрубків). Ці деталі присутні у різних типах конструкцій реакторів: ACP-100, CNP-300, HTR-PM, CAP1400RPV (China), System Integrated Modular Advanced Reactor (South Korea), BBEP 1300, ABV-6M, RITM-200, VBER-300 (Росія), mPower, GT-MHR, EM2 (USA), AHWR-300-LEU (India) [94].

Виробничий процес виготовлення цих елементів є дуже тривалим і складним. В цей процес входить: виплавка сталі, виготовлення злитків, їх неодноразове нагрівання та кування, термо- та механо- обробки. На теперішній час відомі матеріали, які використовуються при виготовленні корпусів реакторів, однак відбуваються спроби у пошуку нових марок сталей

[95]. Однак технологічні процеси кування цих деталей, що потребує застосування спеціального деформуючого інструменту, ще вимагає додаткового дослідження, апробацію та впровадження у виробництво. Це робиться для зниження собівартості деталей що виготовляються задля підвищення конкурентоспроможності на жорсткому світовому ринку виробництва реакторів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є наближення форми кованої заготовки до контурів деталі, що дозволить зменшити витрати металу та зменшення часу механічної обробки на спеціальних верстатах та використовувального ріжучого інструменту.

На теперішній час основна кількість елементів корпусу реактора виготовляється шляхом поєднання зварюванням окремих деталей, що знижує експлуатаційні характеристики конструкції в цілому. Більш того, процес зварювання елементів реакторного корпусу й дуже складним, тривали у часі та потребує додаткових термообробок зварних швів. Окрім цього, кожний шов проходить ретельну перевірку ультразвуком, рентгеном та іншими способами. Це ускладнює процес виготовлення та затягує в часі виготовлення корпусу реактора. Виготовлення корпусу реактора з перевітками його якості займає близько 3 років.

На прикладі ядерних водо-водяних енергетичних реакторів (ВВЕР), які використовуються на території України на Рівненській, Хмельницькій, Запорізькій та Южноукраїнської АЕС, конструкція реактору складається з корпусу та верхньої кришки. Корпус реактора складається із 7 основних елементів (днище, 3 обичайки активної зони реактора, 2 обичайки зони патрубків та 1 фланець кріплення верхньої кришки реактора). Для відомих конструкцій корпусу реактора необхідно 7 деталей з'єднати в одну за допомогою 6 зварних швів. Однак зварні шви є слабкими місцями, тому що в цих зонах відбувається радіаційне окрихчування та корозія шва та навколошовної зони під дією нейтронного випромінювання, високих температур (більш 300°C) та високого тиску (більше 15 МПа). В результаті ці

зони втрачають міцність, що знижує ресурс роботи реактору та може призвести до катастрофічних наслідків.

На сьогодні відомі конструкції реакторів, в яких робляться спроби для поєднання простих деталей в одну більш складну для зменшення кількості зварювальних швів. Наприклад намагаються об'єднати три обичайки робочої зони реактора в одну високу або верхню обичайку зони патрубків із фланцем кріплення верхньої кришки реактора. В результаті кількість зварних швів зменшується з 6 до 3, що підвищує надійність реактору в цілому. Однак, об'єднання верхньої обичайки зони патрубків із фланцевою обичайкою ускладнює форму деталі.

Тому основною тенденцією на сьогоднішній день у виробництві корпусів реакторів є зменшення кількості їх елементів. Це потребує виготовлення цих елементів крупногабаритними та зі складним профілем. Стосовно обичайок, то їх необхідно виготовляти зі ступінчастим профілем. Ці деталі мають широке застосування в атомно-енергетичній, нафтопереробній та важкомашинобудівній галузях.

Об'єднання декількох простих деталей в одну більш складну потребує змінювати креслення поковки та технологічний процес її виготовлення. На сьогодні, не дивлячись на те, що більшість міжнародних виробників корпусів реакторів намагається об'єднати обичайку зони патрубків із фланцевою обичайкою кріплення верхньої кришки, вітчизняні виробники (ПАТ «Енергомашспецсталь») продовжує виготовляти ці деталі окремо, а далі їх зварювати.

Таке об'єднання двох пустотілих деталей із різними зовнішніми розмірами призводить до ускладнення форми поковки. В результаті об'єднання форма пустотілої поковки стає ступінчастою по зовнішньому контуру.

Зарубіжні виробники при поєднанні цих двох деталей в одну використовують два способи кування цих заготовок. Перший спосіб передбачає закривання технологічним напуском уступа конусної обичайки, а другий спосіб передбачає кування обичайки з уступом. Для першого випадку

характерно збільшення витрат металу, які пов'язані з напуском, а також перерізання структури волокна при механічній обробці уступа конусної обичайки, що призводить до зниження міцності в цій зоні. Крім витрат металу збільшується час виготовлення. Як результат підвищується собівартість виготовлення обичайок, що мають конусний ступінчастий профіль. Для другого випадку необхідно змінювати технологічний процес кування та виготовити спеціальне оснащення для можливості формування ступінчастого профіля.

Аналіз наявних підходів щодо удосконалення концепції виготовлення обичайок корпусів реакторів, дозволив встановити, що доцільним напрямком досліджень у проекті є виготовлення крупногабаритних конусних обичайок зі ступінчасто зовнішньою поверхнею. Виготовляти такі поковки можливо тільки за умови деформування пустотілої заготовки ступінчастим бойком. При проведенні теоретичного дослідження потрібно встановити ТНДС пустотілої заготовки при розкочуванні ступінчастим інструментом. Крім цього, треба визначити закономірності формозмінення операції розкочування ступінчастої заготовки. Енергосилові параметри при розкочуванні не являються принциповими, тому що вони набагато менші за зусилля енергоємкої операції осадження. При проведенні експериментального дослідження необхідно визначити базові показники якості обичайок, які виготовлені за новим способом. За результатами досліджень потрібно розробити методику проектування техпроцесу розкочування конусної ступінчастої обичайки, дати рекомендації з форми та розмірів заготовки до розкочування та проектування деформуючого інструменту.

2.2 Методика теоретичного дослідження процесу розкочування конусних втулок

Мета теоретичного дослідження – визначення впливу розмірів та форми пустотілої конусної ступінчастої заготовки на змінення форми та розподіл деформацій у тілі заготовки при розкочуванні новим способом.

Усі теоретичні методи дослідження мають свої обмеження. Ці обмеження відносяться до повноти врахування реологічних характеристик металу що деформується, умов зовнішнього тертя, врахування дійсного розподілу температури у тілі заготовки, використання основних законів обробки тиском – сталість об'єму та найменшого опору та ін. Основна частина існуючих методів моделювання не враховує релаксацію напружень, що призводить до розміцнення металу та дуже сильно впливає на силові параметри процесу та розподіл деформацій у тілі заготовки в результаті багатопрохідного процесу. Більшість відомих методів ґрунтуються на умові ідеальної пластичності або жорстко-пластичному підходу. Доцільним методом моделювання треба використовувати той, що дає прийнятні результати із заздалегідь прийнятою похибкою та не порушує фізику процесу. Тому теоретичне моделювання операції розкочування конусних ступінчастих обичайок доцільно проводити МСЕ, який дозволяє визначити значний обсяг інформації щодо досліджуваного процесу кування у порівнянні з іншими теоретичними методами [96]. У концептуальній основі МСЕ схожий із проекційними методами (Гальоркіна або Рітца), однак в цьому випадку в якості координатних функцій застосовуються функції з скінченим значенням ступенів вільності [97]. МСЕ знайшов використання при моделюванні задач гарячого деформування для встановлення напружено-деформованого стану, розподілу температури у тілі заготовки та формозмінення заготовки [98].

Цей метод є потужним та універсальним із всіх відомих методів моделювання процесів обробки тиском. Метод працює таким чином: заготовка дискретизується на скінчені за розмірами та об'ємом елементи, частіш за все тетраедри. Кожний вузол має визначені ступені вільності, а сам скінчений елемент має відповідні термомеханічні характеристики металу. В результаті стає можливим встановлення діаметрів ступінчастої заготовки та визначити на скільки зміню довжину заготовки що розкочується. Базові рівняння МСЕ, при моделюванні процесів ОМТ, побудовані на теорії течії або деформаційній теорії пластичності. Для кожного скінченного елемента визначається функціонал з урахуванням вихідних параметрів глобальної системи рівнянь простими функціями координат.

Перевагою методу є можливість встановлення переміщень у вузлах сітки та їх швидкостей, епюру деформацій і напружень в тілі заготовки, поле температур в кожному елементі та сил або тиску, що діють у вузлах скінченного елемента та системи в цілому [99, 100]. Всю цю потужну інформацію можна встановити у будь-якій точці заготовки, з урахуванням реальної її температури, попередньо накопиченим ступенем деформації, в будь-який час деформування, що дозволить врахувати зміцнення і релаксацію напружень, змінення теплофізичних характеристик металу на базі попередньо встановленого розподілу. МСЕ не виключає можливість врахувати різні властивості металу в різних зонах заготовки, що дозволить врахувати хімічну неоднорідність вихідного матеріалу. Більш того при моделюванні можна врахувати форму, розміри та розташування пустот та внутрішні дефекти литої заготовки. Розраховані результати є можливість продемонструвати у наглядному виді наприклад епюр деформацій, напружень, швидкостей деформацій та ін. Врахування цих даних дозволить комплексно оцінити новий спосіб кування.

У проєкті для моделювання процесу розкочування крупногабаритних ступінчастих обичайок МСЕ було застосовано програмний продукт «Deform 3D». Використання цього програмного комплексу обґрунтовано

його широким використанням при симуляції процесів деформування у гарячому стані та високою достовірністю. Заготовка приймається, як пружно-пластичне середовище, яке не стискається при деформації. Формульні співвідношення вихідних рівнянь, які використовуються у програмі [101].

Рішення зазначених рівнянь проходить на основі принципу мінімих швидкостей і робіт. Невідомими у цих рішеннях є значення у вузлах швидкостей деформацій і компонент тензора напружень [102].

На рисунку 2.1 зображено заготовку та поковку з умовними позначеннями розмірів, які будуть надалі використовуватися. Було виділено дві умовні частини: виступ – з більшим зовнішнім діаметром та уступ – з меншим.

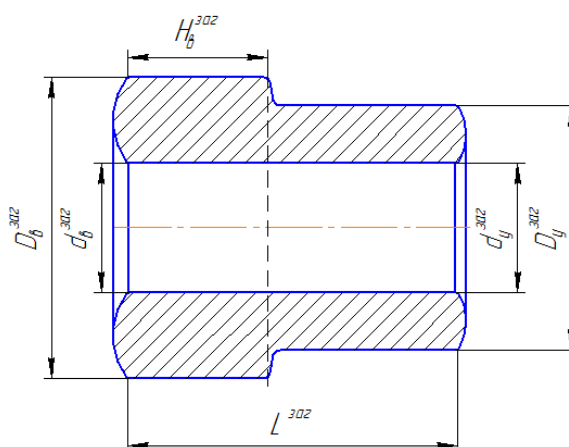


Рисунок 1.2 – Ескіз заготовки для кування конусних втулок з умовними позначеннями

Криві зміцнення дають залежність величини напружень, що діють в пластично-деформованому тілі при лінійному напруженому стані, від величини деформації. Напруження, що викликають пластичну деформацію, залежать від багатьох факторів, у тому числі від температуро-швидкісних умов деформування. З цього приводу криві зміцнення для кожного металу й

сплаву варто встановлювати стосовно до конкретних температурно-швидкісних умов деформування.

Коефіцієнт Пуассона характеризує пружні властивості матеріалу. При додаванні до тіла розтягуючого зусилля його довжина починає збільшуватися, а поперечний переріз зменшується. Коефіцієнт Пуассона показує, у скільки разів змінюється поперечний переріз деформованого тіла при його розтяганні або стисканні. Для абсолютно пластичного матеріалу коефіцієнт Пуассона дорівнює 0, для абсолютно пружного – 0,5. Для більшості сталей цей коефіцієнт знаходиться у районі 0,3. Вимірюється у відносних одиницях, мм/мм.

Щільність – скалярна фізична величина, обумовлена для однорідної речовини масою його одиничного обсягу. Для неоднорідної речовини щільність у певній точці обчислюється як співвідношення маси тіла до його обсягу, коли обсяг стягується до цієї точки.

Межа текучості – механічні напруження далі якої пружна деформація тіла, що зникає після зняття напружень, переходить у пластичну, коли геометрія тіла не відновлюється після зняття деформуючої напруги.

Якість металовиробів будується з 2 складових: відповідність геометричним параметрам деталі та рівень механічних характеристик металу. Ці складові потребують відповідати вимогам мирових стандартів, які враховують рівень механічних характеристик, результати ультразвукового контролю, рентгеноскопії і точність геометричних параметрів деталі. Точність розмірів поковки і деталі оговорюються стандартами на нормами підприємств-виробників у вигляді таблиць із допускаємими відхиленнями розмірів, припусків (для врахування погіршення якості поверхневого шару при нагріванні і куванні), які будуть видалені при механообробці [103].

Основною ідеєю роботи є утворення конусності при розкочуванні конусних ступінчастих заготовок східчастим бойком за рахунок нерівномірного обтискання уступу та виступу заготовки. Тому важливий технологічний критерій, який потрібний для встановлення технологічних

рекомендацій щодо нового процесу розкочування є конусність поковки, яка утворюється. Кут конусності по внутрішній поверхні, яка залишається прямолінійною у процесі розкочування на гладкому дорні можна визначити так [104]

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{|(d_y - d_b)|}{2L_n}\right)$$

де d_b – внутрішній діаметр поковки з боку виступу;

d_y – внутрішній діаметр поковки з боку уступу;

L_n – довжина обичайки.

При моделюванні процесу розкочування конусність встановлювалась як різниця координат уздовж осі X. У програмному комплексі DEFORM 3D на торцях пустотілої заготовки з боку уступу та виступу в меридіональній площині обиралися дві пари точок. У процесі розкочування відслідковувалися координата X кожної точки з урахуванням переміщення у процесі деформування. Різниця координат X за кожний прохід (коло обертання заготовки) складала відповідний діаметр отвору поковки.

Крім цього було прийнято, що основними вихідними параметрами заготовки перед розкочуванням конусних ступінчастих обичайок були відносні діаметри: виступу пустотілої заготовки D_b/d_0 , уступу пустотілої заготовки D_y/d_0 , а також та величина обтискання ϵ .

2.3 Розробка скінчено-елементних 3D моделей напружено-деформованого стану заготовки в процесі розкочування конусних втулок

На теперішній час в Україні існує високий попит та мається потужний виробничий потенціал для виробництва елементів корпусів атомного реактора. Такі підприємства важкого та енергетичного машинобудування як ПрАТ «НКМЗ» та ПАТ «Енергомашспецсталь» можуть виробляти корпуси реакторів АЕС. Дослідження, апробація та впровадження сучасних енерго- та ресурсозберезувальних технологічних процесів кування заготовок корпусів реакторів є важливим завданням для гарантії стійкої роботи зазначених підприємств в умовах економічної кризи. Можливість виготовлення якісних корпусів реакторів з прийнятною ціною дасть можливість закріпитися на міжнародному ринку виробництва енергетичних ядерних установок.

Літературний огляд дозволив встановити, що на сьогодні гостро стоїть проблема виробництва крупногабаритних конусних ступінчастих обичайок. Тому на сьогодні у важкому машинобудуванні застосовуються спеціальні схеми та режими розкочування обичайок, що потребують використання спеціального складнопрофільного ковальського інструменту, що дозволить виготовляти покови заданої форми, з малими припусками, високою проробкою литої структури та потрібним розташуванням внутрішнього волокна металу.

Але впровадження удосконаленого техпроцесу кування крупногабаритних конусних обичайок найвідповідальшого призначення без дослідження закономірностей формоутворення, розподілу температур, деформацій та напружень в тілі заготовки у процесі кування може призвести до негативного результату із значними капітальними витратами. Для цього необхідно дати науково-обґрунтовану оцінку нового процесу розкочування інструментом нової геометрії. Задля моделювання процесу розкочування конусних ступінчастих обичайок ступінчастим бойком

використовувався програмний комплекс DEFORM–3D, що розроблений на основі MСE.

Форма та розміри пустотілої ступінчастої заготовки та інструменту для моделювання проектувались у САD системі Компас 3D (ліцензія ДДМА). Варіювання форми пустотілих ступінчастих заготовок відбувалось шляхом використання заготовок з різним співвідношенням діаметрів з боку уступу та виступу. Побудовані тривимірні моделі експортувалися у формат «.stl». За допомогою препроцесора програмного комплексу DEFORM 3D збиралися елементи заготовки та деформуючих інструментів (дорн та ступінчастий бойок), задавалися граничні умови розкочування. Граничні умови для моделювання задавалися як відомі швидкості деформування, температура інструмента та заготовки, фактор тертя та ін. Фактор тертя між заготовкою й інструментом враховувався коефіцієнтом тертя по Зібелю, що при розрахунку враховує напруження на контактній поверхні [105]. Визначення послідовності рішення представлено у роботі [106]. За результатами моделювання встановлювалися розподіл напружено-деформованого стану пустотілої заготовки і формозмінення у процесі розкочування. Вихідні параметри моделювання мали такі значення: початкова температура заготовки – 1200°C; кількість елементів сітки – 70000 шт; швидкість переміщення інструменту – 40мм/с; температура інструментів – 100°C; фактор тертя по Зібелю – 0,7 [107]. У якості нижнього інструменту був обраний дорн діаметром Ø1240 мм. Ескіз східчастих бойків представлений на рисунку 2.2. Матеріал заготовки – конструкційна сталь 34CrMo4 (вибиралася з бази програми Deform 3D). Ступінь деформації за натискання складала 5% від товщини стінки заготовки. Кут кантування заготовки 20°. Заготовка обтискалась з постійним ступенем деформації по всій довжині кола (прохід). Процес розкочування реалізовувався за 7 проходів із загальним ступенем деформації 35 %. Позиціювання пустотілої заготовки проводилося вручну шляхом пересування поковки та інструменту на задану відстань.

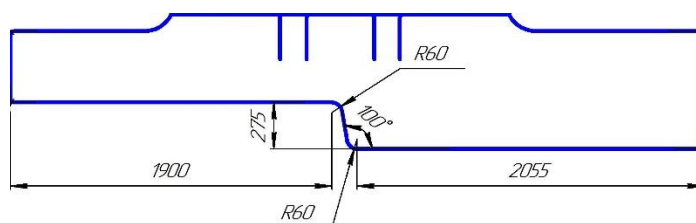


Рисунок 2.2 – Ескіз ступенчастого бойка

Моделювання відбувалось за 2 способами деформування (розкочування): перший спосіб полягав у одночасному розкочуванні фланця та уступу ступінчастої заготовки (рис. 2.3, а); другий спосіб полягав у розкочуванні на початковому етапі тільки фланця заготовки із подальшим обкочуванням уступу і фланці одночасно (рис. 2.3, б).

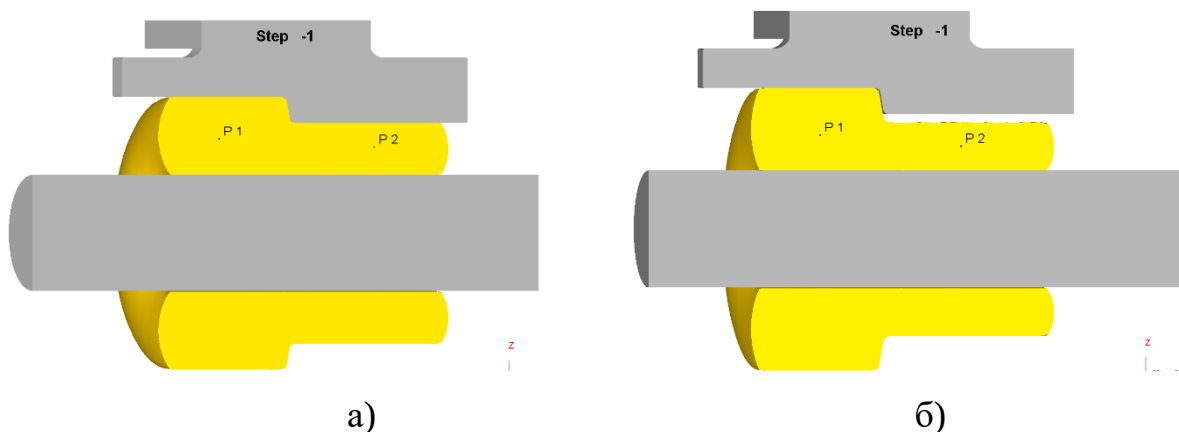


Рисунок 2.3 – Способи розкочування:

- а) – з одночасним обтисканням фланця та уступу;
- б) з початковим обтисканням фланця

За 1 прохід по всій довжині кола заготовки абсолютне обтискання становило 60 мм. На завершальному проході розкочування обтискання проводилося до заданої відстані між бойком та дорном, яка відповідає товщині стінки готової поковки. Після кожного обтискання верхнім деформуючим інструментом, пустотіла заготовка оберталась (кантувалась) і проводилось подальше деформування. Така послідовність деформування проводилась до отримання бажаної товщини стінки поковки.

В результаті скінчено-елементного моделювання необхідно встановити найбільш значущі розміри поковки для аналізу формоутворення. Основні вихідні параметри процесу деформування східчастих заготовок: діаметр виступу заготовки D_b/d_0 , діаметр уступу заготовки D_y/d_0 і ступінь деформування ε .

Висновки за розділом 2

1. З погляду перспектив розвитку ковальсько-пресового виробництва, слід указати на доцільність науково й економічно обґрунтованого використання ряду нових технологічних рішень. Актуальною в цьому випадку є постановка завдання по мінімізації питомих капітальних витрат і зниження експлуатаційних витрат, розв'язок яких, у свою чергу, може бути забезпечене за рахунок розвитку відповідних методів розрахунків, моделювання й проектування. Інтенсивний розвиток обчислювальної техніки вимагає вдосконалювання відомих методик для дослідження формоутворення, напружено-деформованого стану. У цьому зв'язку необхідна розробка програмних продуктів на основі сучасних методів розрахунків.

2. Визначено, що існуючі методи кування пустотілих поковок, таких як ступінчасті обичайки, передбачають використання великої механобробки або складання двох деталей з різними зовнішніми діаметрами з використанням операції зварювання під флюсом, що призводить до збільшення металовитрат та зниження якості металу.

3. Пропонується виготовляти заготовку з зовнішньою ступінчастою поверхнею, що повторює контури деталі, за рахунок використання спеціального деформуючого інструменту зі ступінчастою поверхнею.

4. Визначено, що на сьогодні відома значна кількість методів розкочування порожніх заготовок спеціальними бойками, що призводить до ефективного використання сталі та підвищення внутрішньої будови деталі.

Однак ці методи розкочування недостатньо досліджені, у роботах не представлені технологічні режими розкочування та рекомендації стосовно обрання геометричних розмірів пустотілої заготовки перед куванням. Літературний огляд дозволив визначити, що у відомих роботах не представлені конструкторські рекомендації з геометричних розмірів бойків для розкочування.

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

З ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНУСНОЇ ВТУЛКИ В ПРОЦЕСІ РОЗКОЧУВАННЯ

3.1 Формозмінення заготовки у процесі одночасного розкочування уступу та виступу

На першому етапі дослідження формозмінення пустотілої ступінчастої заготовки проводилось ступінчастим бойком, конструкція якого дозволяє одночасно деформувати уступ та виступ заготовки. У цьому разі геометрія деформуючого інструменту повторює форму ступінчастої заготовки [108]. Основний показник в цьому разі – висота уступу бойка (рис. 3.1).

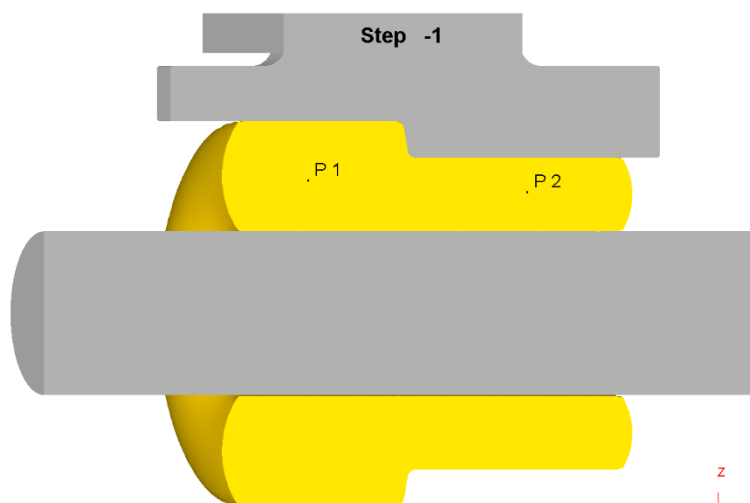


Рисунок 3.1 – Ескіз заготовки для моделювання процесу розкочування при одночасному деформуванні виступу й уступу

Для зручності та універсальності отриманих результатів у подальшому використовується показник – відносний діаметр виступу та уступу, який становив 2,4 та 1,8 відповідно. Конусністю внутрішньої поверхні заготовки будемо нехтувати.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що у процесі одночасного деформування виступу й уступу заготовки утворюється конусність з більшим діаметром з боку уступу заготовки (рис. 3.2). Це може бути пояснено тим, що відносний ступінь деформації в уступі більший ніж у виступі (розрахунок ведеться через відношення товщин стінок до і після деформації) (рис. 3.2). При одночасному натисканні на уступ та виступ, тонша стінка (уступ) деформується більше, ніж виступ.

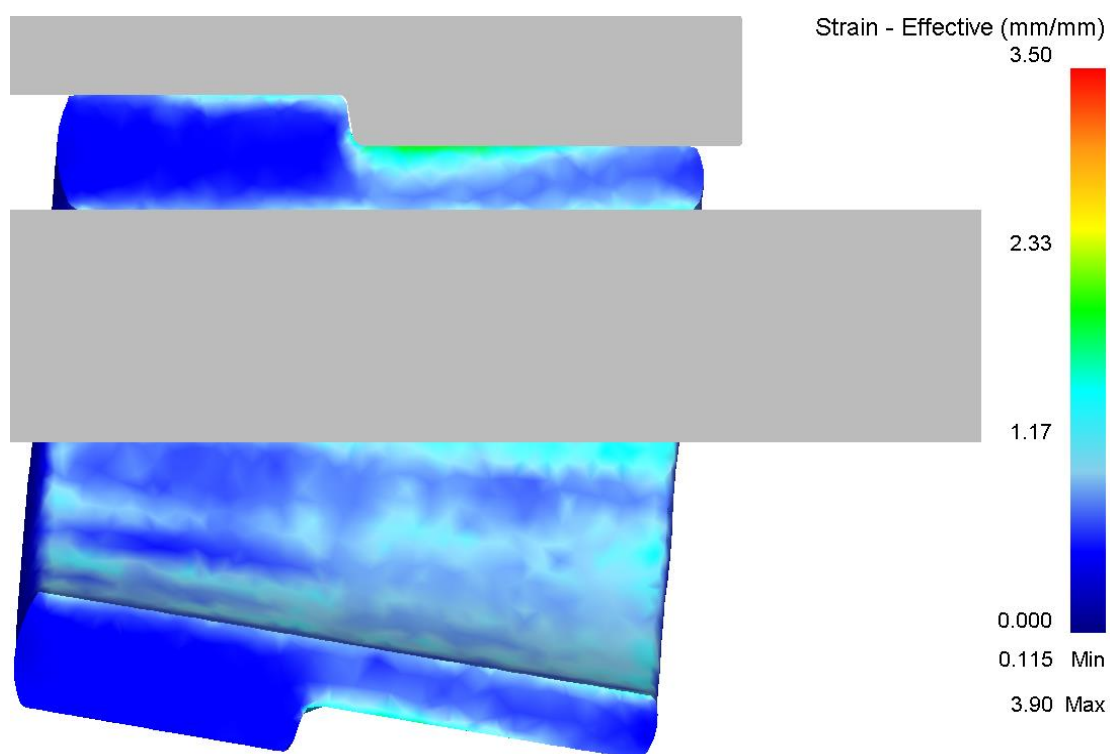


Рисунок 3.2 – Розподіл деформацій у тілі поковки після деформування

В уступі рівень накопичених логарифмічних деформацій також вище на відміну від виступу поковки. Це може привести до меншого пророблення литої структури заготовки, але слід враховувати, що розкочування це остаточна операція, а максимальне пророблення структури було проведено на попередніх операціях. Максимальні деформації в уступі розташовуються в поверхневих шарах поковки [109].

Після розкочування за такою схемою на ступінь деформації 38 % поковка буде мати кут конусності 16° , яка розрахована за формулою,

приведеною у п. 2.2. Цей кут збільшується упродовж всього процесу розкочування (рис. 3.3). Це пояснюється нерівномірною деформацією уступу та виступу. При цьому інтенсивне конусоутворення відбувається після обтискання стінки на 20 %.

Довжина заготовки у процесі розкочування майже не змінюється, тому цей параметр можна прийняти сталим. Основний вплив на конусність чинять діаметри поковки з уступу та виступу. Тому у дослідженні слід встановити вплив обтискання на змінення цих діаметрів.

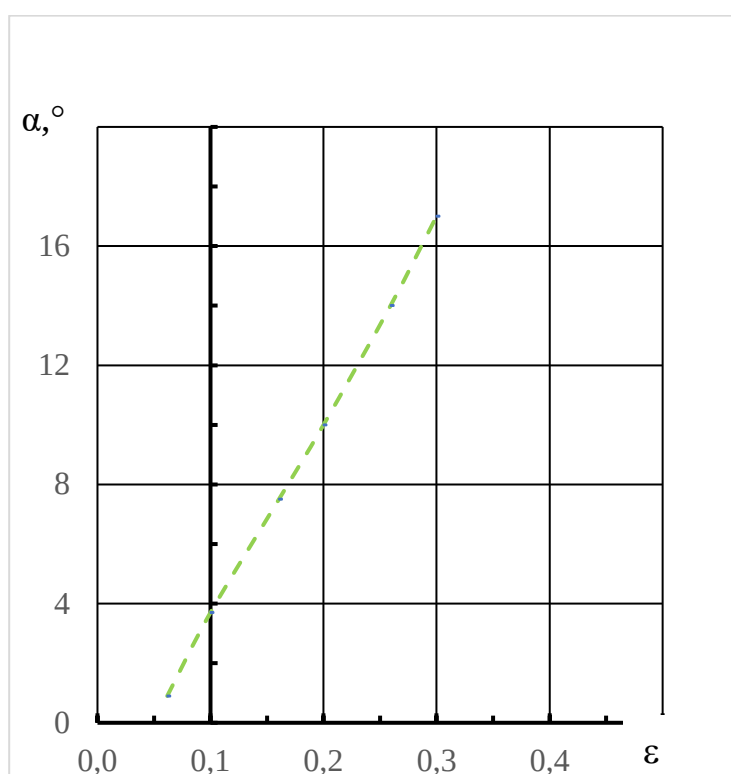


Рисунок 3.3 – Конусність поковки (α) від ступеня деформування виступа (ϵ_v)

Аналіз результатів дозволив визначити, що діаметри уступу та виступу збільшуються прямо пропорційно. В результаті такого розкочування зі збільшенням ступеня обтискання збільшується конусність поковки. Це можна пояснити результатами нерівномірного розподілу деформацій в уступі та виступі [110].

Використовуючи скінчено-елементний програмний продукт DEFORM-3D був встановлений деформований стан в уступі та виступі при різних ступенях обтискання. Отримані данні дозволяють зробити висновок, що при одночасному обтисканні уступу та виступу уступ отримує більшу деформацію, що призводить до збільшення діаметра уступу. В результаті утворюється конусність поковки, яка тим більша, чим більша ступінь обтискання заготовки. Тому схема розкочування ступінчастої заготовки ступінчастим інструментом з одночасним деформуванням уступу та виступу не гарантує отримання поковок ступінчастих кілець з циліндричною бічною поверхнею [111].

3.2 Формоутворення конусної втулки при послідовному деформуванні виступу та уступу

Проведені попередні результати моделювання дозволили встановити, що одночасне обтискання виступу та уступу ступінчастої заготовки приводить до утворення конусності на поковці. Одним з прогресивних варіантів вирішення даної проблеми є спосіб послідовного обтискання виступу та уступу (рис.3.4) Це дозволить компенсувати інтенсивність утворення конусності, яка утворюється за рахунок накопичення деформації в уступі. Послідовне обтискання виступу, а далі уступу дозволить накопичити однакову ступінь деформації в цих ділянках. Такі умови можуть забезпечити рівномірне розкочування без утворення конусності. В цьому разі вихідна ступінчата заготовка до розкочування відрізняється від тієї, що була досліджена раніше. Різниця полягає в тім, що зовнішній діаметр уступу буде менше, а зовнішній діаметр виступу буде більше від досліджуваних раніше. На початковій стадії деформування між ступінчастим бойком та уступом буде утворюватися зазор, який

виникає через більшу різницю між діаметрами виступу та уступу при сталій висоті сходу бойка. Ця різниця становить 0,58 на відміну від попередніх схем 0,43 [112].

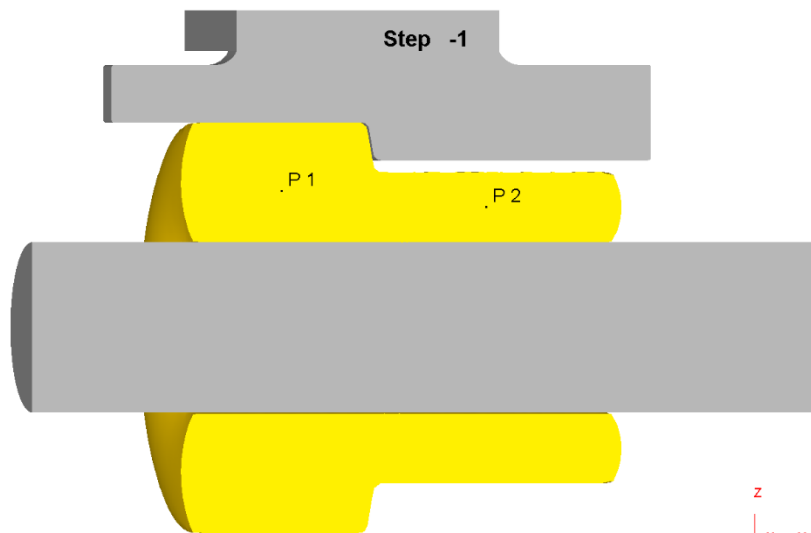


Рисунок 3.4 – Схема дослідження процесу послідовного деформування виступу та уступу

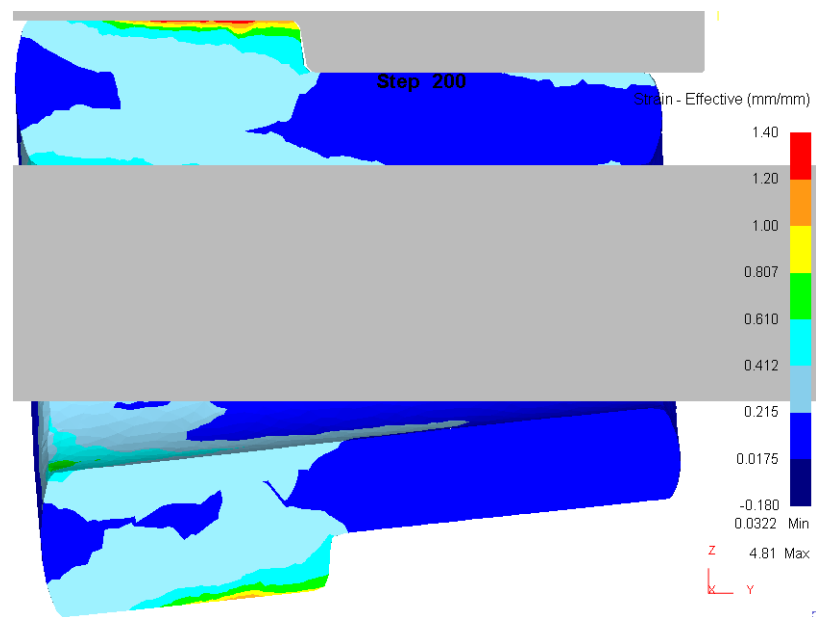
Такі геометричні розміри призведуть до того, що на початку обтискання в перу чергу буде деформуватися виступ заготовки. Після того, як виступ заготовки буде продеформований, почне деформуватися виступ та уступ заготовки одночасно. Це дозволить спочатку створити конусність на поковці з боку виступу, а далі буде інтенсивно формуватися конусність з боку уступу, що дозволить компенсувати нерівномірність утворення конусності з боку уступу та виступу.

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволив встановити, що на початку процесу розкочування, коли обтискається тільки виступ, утворюється конусність з боку виступу заготовки (рис. 3.5). Це пояснюється тим, що уступ не деформується, тому відбувається утворення конусності з боку виступу. Утворення цієї конусності повинно бути компенсовано

інтенсивним конусоутворенням при подальшому обтисканні уступу заготовки [158].



a)



б)

Рисунок 3.5 – Формозмінення та розподіл деформацій заготовки при деформуванні виступу після 1-го проходу (а) та після другого (б)

Коли висота сходинок заготовки стане дорівнювати висоті сходинок бойка почне також обтискатися уступ і конусність поковки починає зменшуватися (рис. 3.6). При цьому відбувається збільшення довжини виступу. Було визначено, що при такій схемі розкочування логарифмічні деформації у виступі вище, ніж в уступі. Ці деформації виникають переважно на периферійній поверхні виступу.

Таке співвідношення розмірів призвело до того, що в уступі виникають менші деформації ніж в виступі. Це пов'язано тим, що уступ починається деформуватися набагато пізніше. В результаті утворюється зворотня конусність на поковці. Кінцева форма заготовки конусна (рис. 3.6). Конусність становить 5° . На відміну від початкової схеми деформування (виступ та уступ деформуються одночасно) поковка має збільшення внутрішнього діаметра з боку виступу. При цьому максимальні деформації локалізуються на поверхні в місті переходу уступ у виступ. При цьому деформації за перерізом розподіляються більш рівномірно.

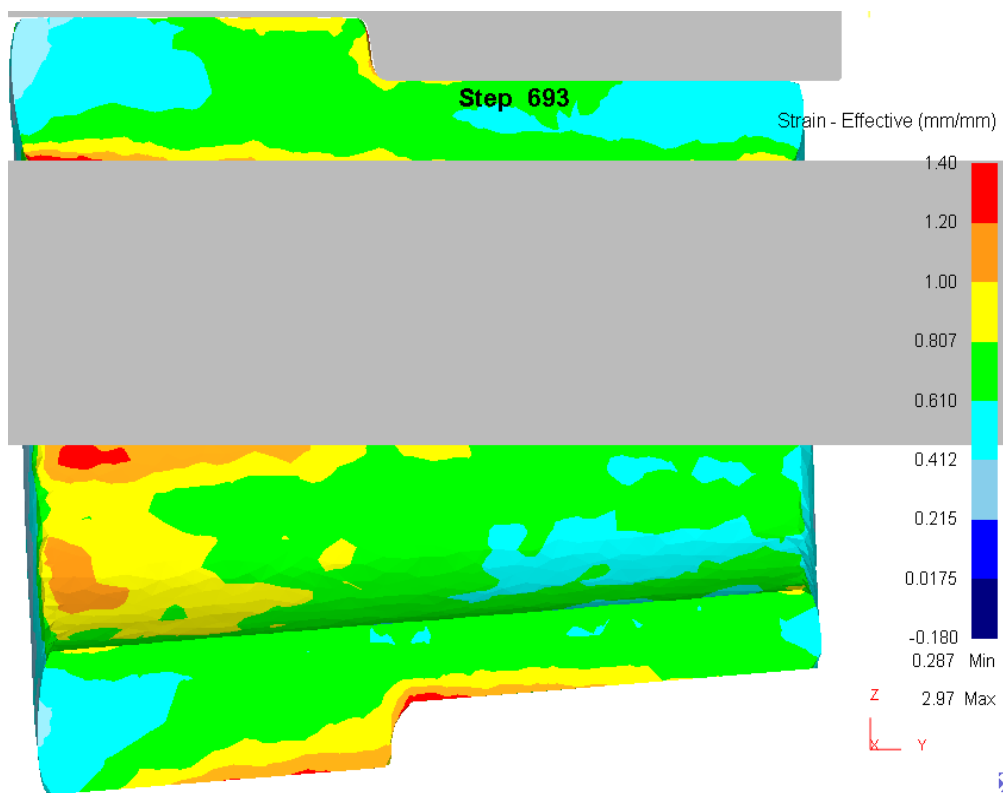


Рисунок 3.6 – Розподіл деформацій поковки після розкочування

Задля кількісної оцінки утворення конусності в залежності від ступеня обтискання виступу був побудований графік (рис. 3.7). Аналіз отриманих результатів утворення конусності у процесі деформування дозволив встановити наступне – на початку розкочування конусність прямо пропорційно збільшується при збільшенні обтискання. Після ступеня обтискання 0,15 починає деформуватися уступ і це призводить до зниження конусності за рахунок більш інтенсивної деформації уступу, у якого тонша стінка. Однак повного усунення конусності не відбувається, тому що метал поковки з боку виступу та уступу отримує різний ступінь деформації. Це пояснюється тим, що при розкочуванні тонкої стінки уступу більше відбувається радіальна течія металу ніж при обтисканні товстої стінки виступу. Однак за рахунок того, що виступ заготовки обтискався весь процес розкочування, а уступ тільки вкінці, то повністю конусність не вдалося виправити [113].

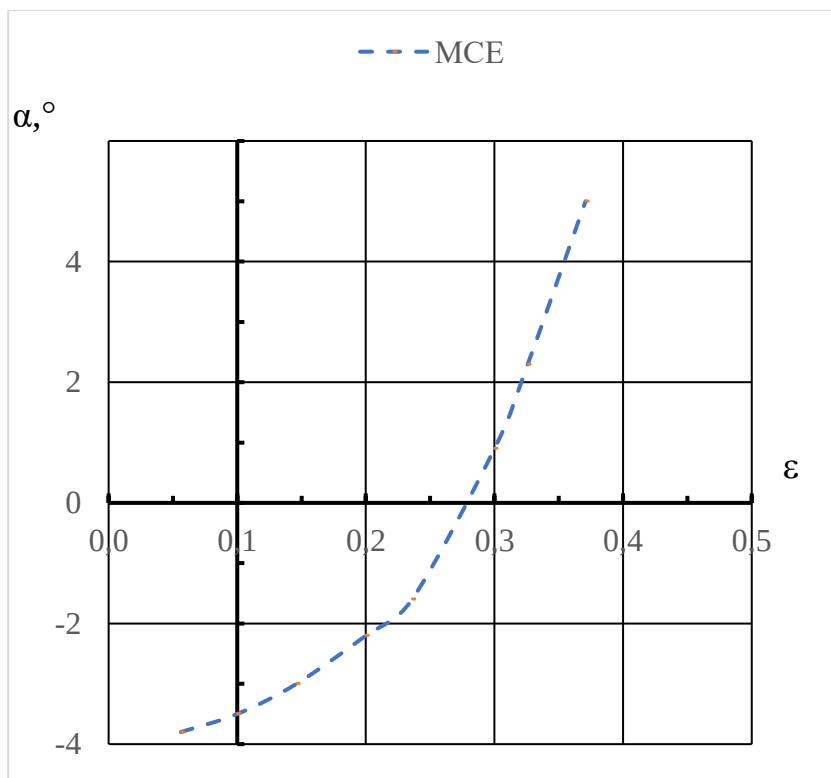


Рисунок 3.7 – Змінення конусності α від ступеня обтискання виступу ε

Для більш точного встановлення механізму формозмінення заготовки у процесі розкочування слід проаналізувати данні щодо змінення внутрішніх

діаметрів поковки. Для цього були встановлені закономірності змінення діаметрів отвору поковки в залежності від ступеня обтискання для виступу та уступу. Аналіз отриманих результатів дозволив визначити, що на початковій стадії розкочування до ступеня деформації 0,1, діаметр отвору з боку виступу збільшується прямо пропорційно від ступеня обтискання. А з боку уступу діаметр отвору не змінюється це на графіку показується горизонтальною лінією. Така закономірність прослідковується до деформації 0,15. При цій деформації починає обтискатися уступ заготовки, що призводить до збільшення його діаметра.

Збільшення діаметру з боку уступу також відбувається майже лінійно. Це свідчить про те, що інтенсивність розкочування для виступу та уступу однакова, різниця між деформаціями виступу та уступу однакова. Однак, після ступеня деформації 0,2 інтенсивність збільшення діаметра отвору з боку уступу збільшується. На кінцевій стадії розкочування зростання діаметра з боку уступа більше, ніж з боку виступа,. Це може бути пояснено тим, що при зменшенні товщини стінки уступу збільшується інтенсивність течії металу в радіальному напрямку.

За результатами моделювання було визначено, що для виготовлення поковки з незначним збільшенням довжини та конусністю треба зменшити довжину виступу на 3,0 %, а мінімальний діаметр уступу підвищити на 75 мм (3,0 %). Більш того, слід враховувати конусність отвору, яка утворюється після кування на конусній оправці. Виступ розташовувався з боку бурта конусної оправки. За результатами дослідження було встановлено, що у процесі розкочування до товщини стінки поковки 345 мм виготовлена поковка буде мати конусність меншу у порівнянні зі всіма досліджуваними схемами. При цьому довжина виступу була знижена також на 3,0 %, а уступу на 5,0 %. Рівень деформації в уступі більш високий, що можна пояснити збільшеною товщиною стінки уступу до деформації за рахунок технологічного напуску. Знов таки, максимальні деформації локалізовані у поверхневих шарах з боку виступу.

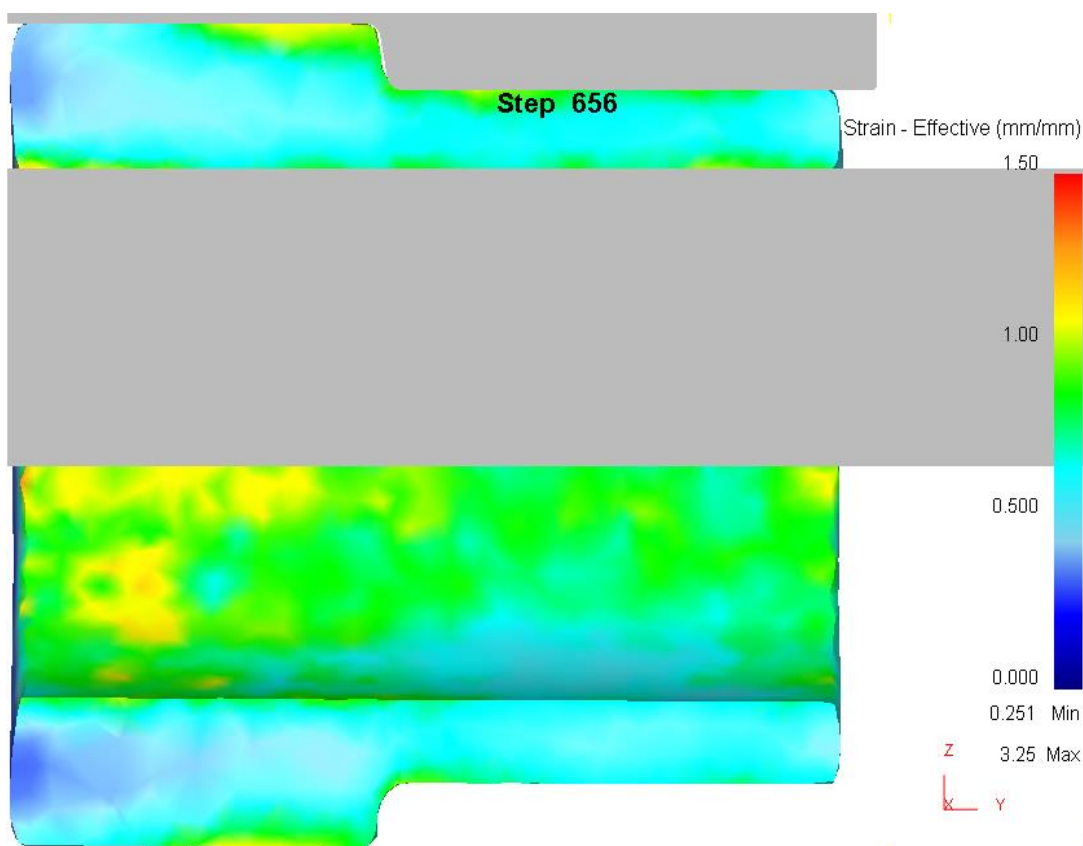


Рисунок 3.8 – Ескізи поковки з розподілом логарифмічних деформацій

Не дивлячись на те що спосіб дозволяє отримати ступінчасте кільце з мінімальною конусністю, яка знаходиться у діапазоні припуску та допуску, розглянутий метод має обмеження. Це обмеження полягає в тім, що складно буде сформувати ступінчастий уступ з невеликими висотами сходинок. Тому цей варіант не може бути рекомендований до впровадження. У зв'язку з цим, подальші дослідження будуть проводитись для ступінчастих поковок з гладким уступом [114].

3.3 Аналіз утворення конусності на поковці при варіюванні розмірами виступу

3.3.1 Вплив зменшення довжини виступу на утворення конусності поковки

В даному моделюванні довжина виступу була зменшена до $0,15H_0$, при цьому загальна довжина заготовки є сталою, тобто довжина уступу була збільшена. Аналіз результатів змінення конусності в процесі деформування дозволив визначити, що на початку розкочування, коли обтискається тільки виступ заготовки конусність незначно збільшується.

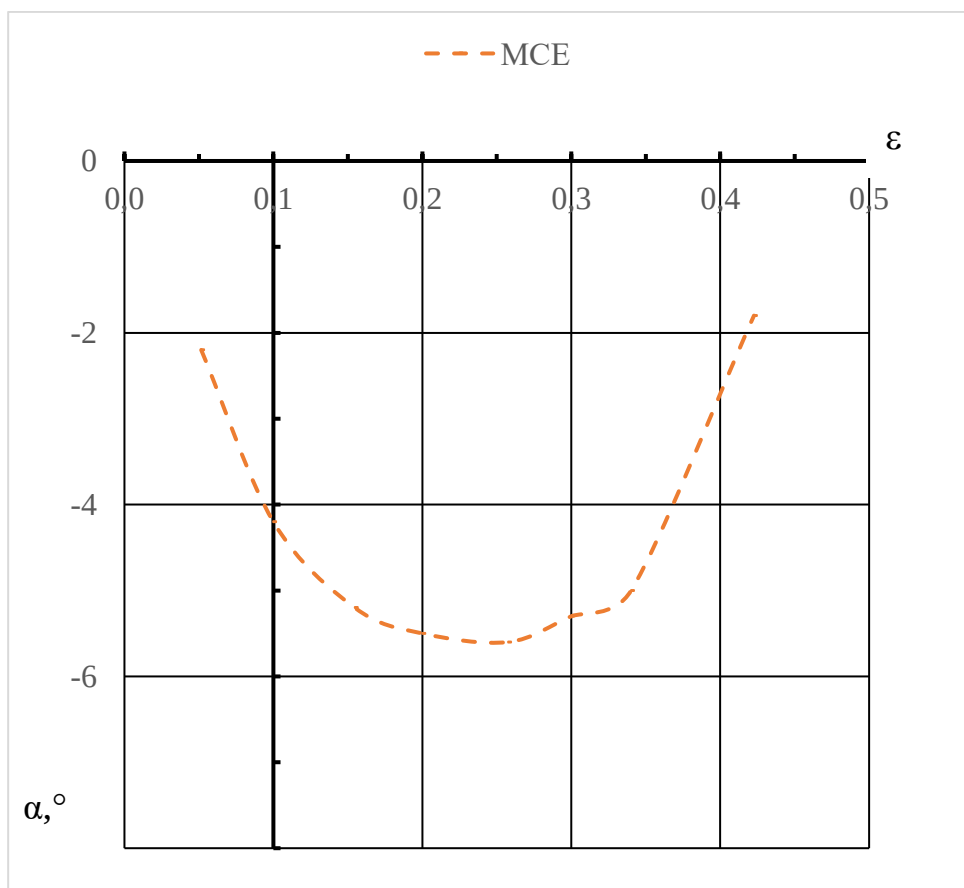


Рисунок 3.9 – Змінення конусності (α) в залежності від ступеня деформації

Після початку деформування уступу (відносна деформація 0,07) конусність починає зменшуватися майже до нуля (форма заготовки стає

майже циліндричною). Мінімальне значення конусності відбувається при ступені деформування виступу 0,2, що відповідає 4 проходу розкочування, під час якого уступ та виступ обтискаються з однаковою абсолютною деформацією. Після компенсування конусності, яка утворилась під час деформування виступу, конусність починає зростати у зв'язку з інтенсивним збільшенням діаметра з боку уступу. Ця конусність продовжує збільшуватися з підвищенням ступеня обтиснення стінки уступу. Причина такого нерівномірного збільшення діаметрів з боку виступу та уступу пояснюється схожим протіканням процесу деформування, як і в попередніх випадках [115].

3.3.2 Вплив збільшення діаметра виступу на утворення конусності поковки

Розглянуті вище схеми розкочування ступінчастих заготовок дозволили встановити, що конусність майже завжди утворюється за рахунок збільшення діаметра отвору з боку уступу, і цьому процесу вище було надано переконливе пояснення. Тому напрошується пропозиція – забезпечити більш інтенсивне збільшення діаметру отвору з боку виступу, щоб це компенсувало збільшення діаметра з боку уступу. Це можливо зробити також за рахунок збільшення вихідного діаметра виступу задля того, щоб цей елемент отримав високий ступінь деформування, що забезпечить значний радіальний плин металу та відповідно зменшити конусність. Тому було прийняте рішення дослідити формозмінення заготовки при збільшенні відносного зовнішнього діаметра виступу з 2,4 до 2,55. Після розрахунку величини конусності від ступеня обтискання були встановлені результати, що представлені на рисунку 3.10.

Аналіз отриманих результатів дослідження дозволили визначити, що збільшення діаметра виступу заготовки з призводить до підвищення

зворотньої конусності на початковому етапі деформування, чого і слід було очікувати [115]. Подальше обтискання, коли вже починає деформуватися уступ, як було встановлено раніше, конусність починає знижуватися. Це зниження відбувається майже до нуля при ступені обтискання 0,25 (рис. 3.10). Однак, так як ще не отримана задана товщина стінки поковки відбувається подальше деформування, яке призводить знов до збільшення конусності, але вже з іншого боку.

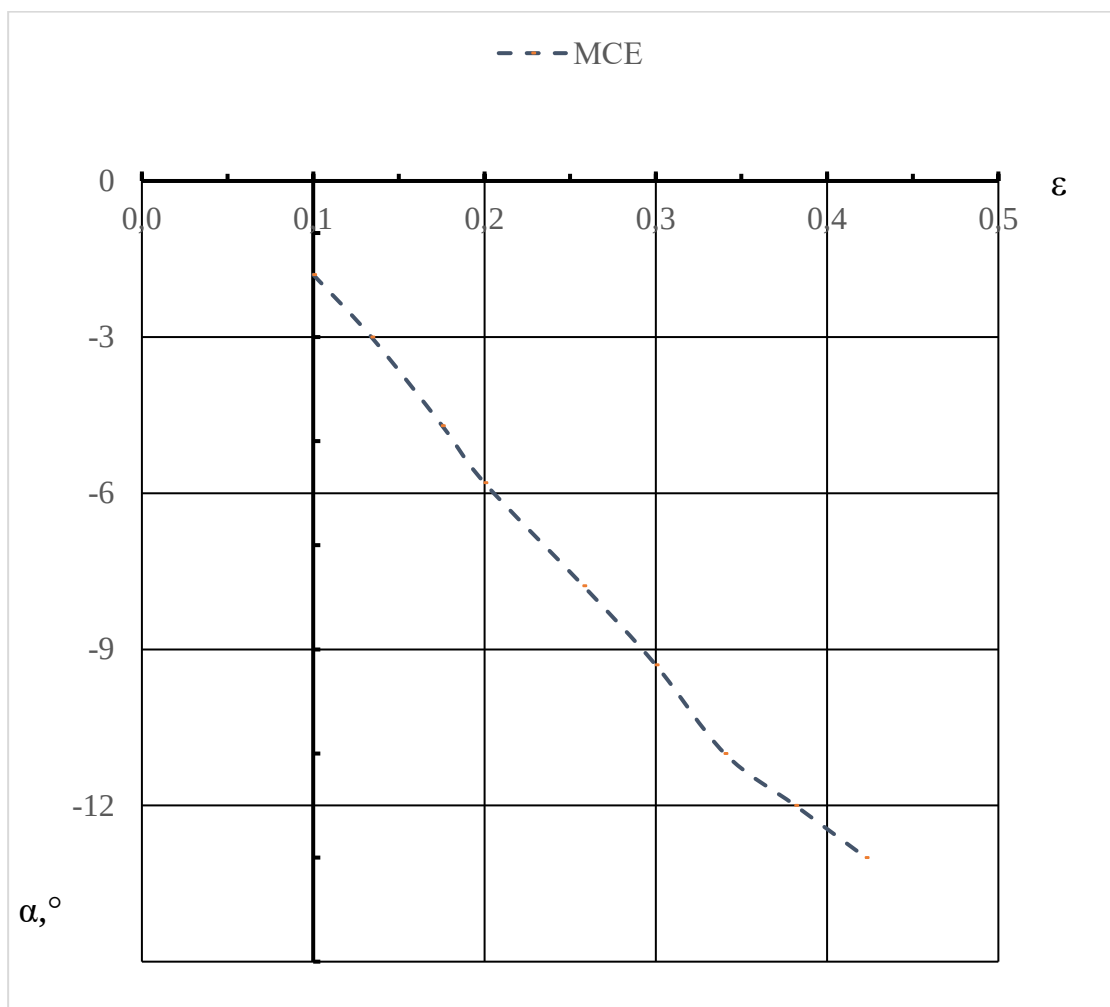


Рисунок 3.10 – Змінення конусності (α) в залежності від ступеня деформації

У процесі моделювання було встановлено розподіл деформацій в тілі заготовки. Аналіз отриманих результатів розподілу деформацій при розкочуванні дозволив встановити, що ступінь деформації у фланці більш

інтенсивно збільшується, в той час поки уступ не обтискається. Це призводить до збільшення конусності поковки. На всьому процесі розкочування ступінь обтискання виступу більша чим в уступі. В результаті конусність формується за рахунок збільшення діаметра зі сторони виступу. Подальше розкочування призводить до вирівнювання ступеня деформації в виступі та уступі. Це приводить до того, що конусність знижується майже до нуля. Додаткове деформування призведе до збільшення конусності.

Можна зробити такий проміжний висновок – короткі по довжині виступи призводять до формування конусності на ступінчастій заготовці зі збільшеним внутрішнім діаметром з боку уступу. Такі заготовки можна використовувати при виготовленні деталей конусної форми. При збільшенні зовнішнього діаметра виступу відбувається зниження конусності та заготовка за формою близька до циліндричної [116].

Проведений всебічний аналіз операцій розкочування ступінчастих заготовок дозволяє зробити такий висновок. Задля отримання поковки з конусністю треба щоб конусність, яка утвориться при розкочуванні уступу була не компенсувалась конусністю, яка буде утворюватися при розкочуванні виступу. Інакше кажучи, технологічний розрахунок повинен бути таким. Виходячи з того, який внутрішній діаметр повинен бути в поковці в залежності від вихідного діаметра отвору заготовки, через ступінь деформації визначають зовнішній вихідний діаметр уступу заготовки (або можна сказати вихідну товщину стінки уступу). Відповідно такий же ступінь деформації повинен бути у виступі поковки. За умови однаковості ступенів деформування уступу та виступу визначаємо вихідний діаметр виступу заготовки (або вихідну товщину стінки виступу). Для зменшення кількості розрахунків та спрощення використаної формули ці співвідношення слід виводити через площини поперечного перерізу уступу та виступу, прийнявши умову, що розширення при розкочуванні майже не відбувається. Це дозволить спростити викладки не порушуючи закон сталості об'ємів при пластичній деформації [116].

3.4 Дослідження розкочування з поступовим деформуванням виступу та уступу

Об'єм уступу буде збільшений за рахунок введення технологічного напуску на уступі заготовки під кутом 2° на відстані приблизно 830 мм від виступу. Таким чином сумарна деформація з боку уступу збільшиться, що призведе до інтенсивнішого збільшення діаметру отвору з боку уступу.

Аналіз результатів моделювання (табл. 3.1, стовпчик 1) дозволяє встановити, що додавання такого напуску збільшує діаметри з обох боків та зменшує довжину виступу та уступу поковки, що вказує на більшу тангенціальну течію металу ніж продольну.

В результаті розкочування заготовки з напуском була отримана поковка, виступ якої практично співпадає з розмірами розрахованої поковки, при цьому уступ має менші внутрішній та зовнішній діаметри. З результатів моделювання можна зробити висновок, що сумарна деформація виступу більша, що особливо помітно на поверхні отвору.

У таблиці 3.1, стовпчик 2 зображено заготовку з напуском, у якої діаметр уступу було збільшено на 45 мм. Аналіз результатів моделювання дозволяє встановити, що завдяки збільшенню діаметру уступу було отримане більш рівномірне розкочування. Про це свідчить різниця між внутрішніми діаметрами з обох торців, яка дорівнює 55 мм та розподілення деформацій на поверхні отвору. Також встановлено, що зовнішній діаметр виступу значно збільшився у діаметрі в порівнянні з попереднім зразком (табл. 3.1, стовпчик 1) на 110 мм. Це є ознакою того, що метал більше потік у радіальному напрямку ніж у продольному. При цьому порівняння результатів моделювання з розрахованою поковкою дає кращий результат. Конусність у даному випадку дорівнює 0,016.

Таким чином можна сказати, що другий зразок є оптимальним для отримання необхідної поковки.

Таблиця 3.1 – Результати розкочування заготовок з напуском під кутом 2° на зовнішній поверхні

	Розкочування базової заготовки з напуском	Розкочування заготовки зі збільшеним діаметром уступу
	1	2
Заготовка		
Поковка		
Сумарна деформація		

Але заготовка для розкочування буде отримуватися шляхом протягування на оправці. А це означає що внутрішній діаметр не може бути циліндричним, тому що оправка має конічну поверхню для легшого зняття заготовки. З цього приводу для подальшого дослідження у другому (вдосконаленому) зразку буде зроблений отвір з конусністю 1:100. Буде проведено моделювання нової заготовки та запропонований варіант для його покращення [117].

У таблиці 3.2, стовпчик 1 зображено поковку, що має конічну внутрішню поверхню. Конусність дорівнює 1:200. Виступ розташовується з боку меншого діаметра оправки, уступ з боку більшого. Таким чином, під час протягування уступу від середини до торця заковування оправки буде відсутнє. Однак таке розташування конічної поверхні збільшило об'єм виступу та зменшило об'єм уступу. В результаті було виявлено, що уступ не набирає необхідних діаметральних розмірів. Деформований стан поковки вказує на те, що більше сумарної деформації отримує виступ. Про це свідчить розподілення сумарної деформації, як на поперечному розрізі, так і на поверхні отвору. Встановлено, що величина сумарної деформації більша з боку виступу.

Для того, щоб спрямувати більшу кількість металу у радіальному напрямі вирішено збільшити зовнішній діаметр уступу (таблиці 3.2, стовпчик 2). Діаметр уступу збільшено на 30 мм до 2360мм. Напуск під кутом 2° , так як і в попередніх зразках, проведено на відстані приблизно 830 мм від лінії розмежування. Аналіз даних моделювання дозволяє встановити, що збільшення зовнішнього діаметру уступу дає кращій результат. Метал тече більше у радіальному напрямі ніж у продольному. Про що свідчить збільшення внутрішнього діаметру з обох боків. Крім того, можна також помітити, що є невелика різниця у діаметрах, яка дорівнює 70 мм. Тобто поковка розкатана практично рівномірно.

	Базова заготовка з напуском	Заготовка зі збільшеним діаметром уступу
Заготовка		
Поковка		
Сумарна деформація	Strain - Effective (mm/mm) 0.000 Min 0.310 Max	Strain - Effective (mm/mm) 0.000 Min 0.235 Max

Поперечний переріз дозволяє встановити, що уступ отримує більше сумарної деформації ніж виступ, а деформований стан поверхні отвору вказує на більш рівномірний деформований стан. Отже задані параметри відповідають нашим вимогам. Але кінчну зовнішню поверхню протягуванням отримати складно, тому пропонується її замінити на ступінчасту.

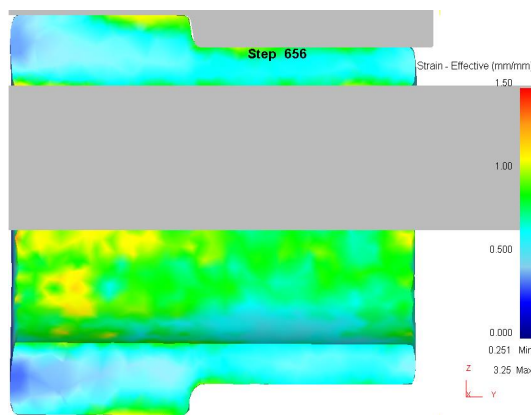
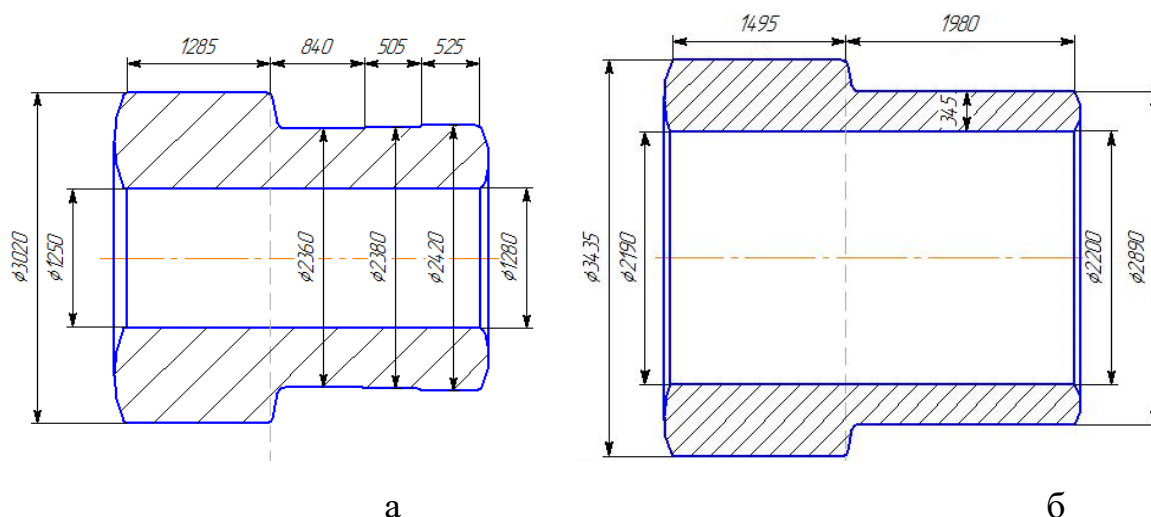


Рисунок 3.11 – Ескіз заготовки (а), ескіз поковки (б) та деформований стан поковки (в) отриманої після розкочування

Подальше моделювання буде полягати у розкочуванні поковки зі ступінчастим напуском, який замінить конусний. Як в попередньому випадку буде проаналізований деформований стан та, якщо необхідно, запропоновано вдосконалення заготовки [118].

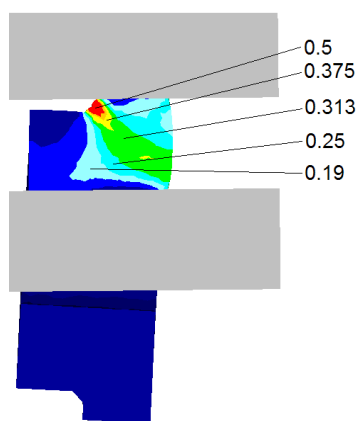
На рисунку 3.11 зображено заготовку (а), яка враховує напуск у вигляді ступінчатих переходів та поковку (б), отриману після розкочування. Зовнішній діаметр збільшений на 5 мм, а довжина зменшена на 5 мм. Результати моделювання дозволяють встановити, що отримана поковка має найменшу, в порівнянні зі всіма зразками, конусність, яка дорівнює 0,002.

Не дивлячись на те, що довжина виступу була зменшена на 5 мм, вона збільшилась на 15 мм більше ніж у попередньому випадку. Також, в порівнянні з попереднім зразком збільшилась і довжина уступу. Аналіз деформованого стану вказує на високу рівномірність розподілу та величини сумарної деформації на поверхні отвору. Однак поперечний переріз вказує на те, що уступ все одно більше продеформований ніж виступ.

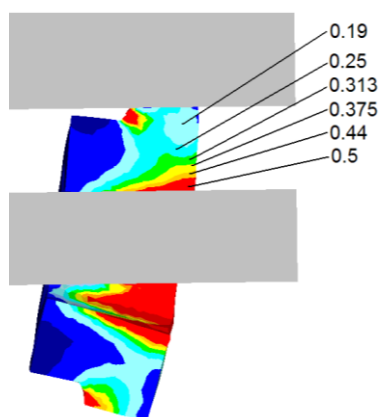
3.5 Дослідження процесу розкочування конусних втулок без бурта

Для аналізу розподілу деформацій стану заготовки після розкочування використовувався метод скінчених елементів. Моделювався процес розкочування порожнистої заготовки зі ступінчастою зовнішньою поверхнею. Розміри заготовки були такими: $D_2 = 1500$ мм, $D_0 = 1250$ мм, $D_{np} = 500$ мм $H_1 = 300$, $H_1 = 690$ мм, мм. За матеріал заготовки була взята сталь 40, нагрівалася до 1100°C , деформація проходила з постійною лінійною швидкістю, що дорівнює 20 мм/с.

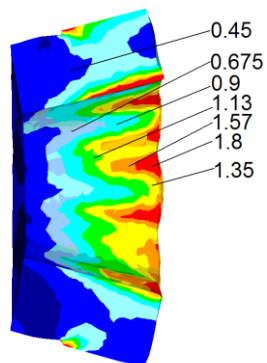
На рисунку 3.12 показані поля деформацій по поперечному перерізу заготовки в процесі прокатки. Аналіз полів деформацій по ділянці заготовки дозволяє зробити наступні висновки. На початку розкочування ступінчастої заготовки з верхнім бойком деформується його частина з виступом. Найбільші деформації зосереджені у бурті заготовки, тут їх величина досягає 0,5.



а)



б)



в)

Рисунок 3.12 – Поля деформацій у поперечному перерізі заготовки після розкочування конусної втулки

На рисунку 3.12, б показана заготовка після дев'ятого натискання. Кожен тиск виконувався з ходом в 100 мм. Це пов'язано з тим, що при обтисканні основні деформації концентруються в області заготовки біля бурта. Така деформація викликає інтенсивне збільшення діаметра втулки з

одного боку.

У разі розкочування заготовки зі ступінчастим зовнішнім контуром без радіуса скруглення може утворитися поверхневий притиск, що підтверджено дослідженням. Встановлено, що для розглянутого випадку, починаючи з 10-го тиску, при розкочуванні на поверхні кільця починає утворюватися затиск [119].

Утворення притиску при розкочуванні ступінчастої частини кільця є небажаним дефектом.

Розміри заготовки вибиралися такі ж, як і при вивченні деформованого стану заготовки. Результати моделювання наведені на рисунку 3.13, з якого видно, що при деформації бурта заготовки без плавного переходу (рис. 3.13 а) плоским бойком на перших етапах стиснення утворюється затиск. Формування затиску починається вже при ході в 10 мм з урахуванням того, щоб весь хід становив 100 мм. У разі, коли кут переходу від бурта становив 25 градусів (рис. 3.13 в), притиск в процесі стиснення не утворюються. У разі використання заготовки з радіусним переходом утворення затиску припиняється при деформації заготовки з радіусом, рівним 0,8... 1 від висоти бурта.

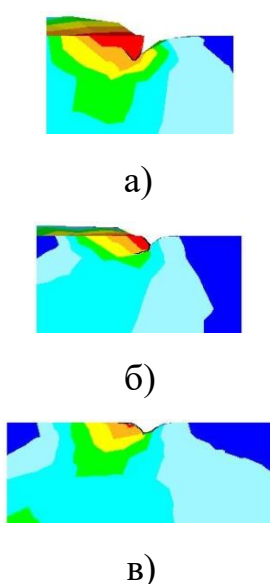


Рисунок 3.13 – Поля розподілу інтенсивності логарифмічної деформації в процесі стиснення ступінчастої заготовки плоским бойком в

перехідній зоні (α – кут нахилу кроку 0° ; β – 10° ; γ – 25°)

На підставі отриманих рекомендацій була підібрана відповідна заготовка і проведений розрахунок розкочування конусного кільця. Розміри оброблюваної деталі: $D = 1120$ мм, $D_1 = 1020$ мм, $D_0 = 520$, мм, $H = 550$ мм. $H_1 = 300$ мм. За матеріал заготовки - сталь 35, яка нагрівалася до температури 1200°C , деформація проводилася з постійною швидкістю, що дорівнює 10 мм/с.

На рисунку 3.14 показані поля деформацій у поперечному перерізі заготовки після розкочування, з яких видно, що поверхня втулки не має дефектів.

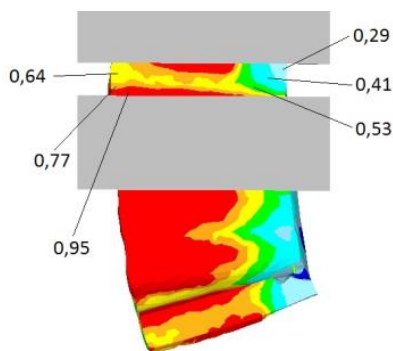


Рисунок 3.14 – Поля розподілу інтенсивності деформацій після розкочування

Висновки за розділом 3

1. Визначено, що при розташуванні виступу заготовки з боку більшого діаметра отвору уступ буде мати діаметр менший ніж розкочування без внутрішньої конусності та більшу довжину. Виступ майже не збільшується по довжині та зменшується у діаметрі. Конусність склала 10° .

2. Встановлено, щоб збільшувати конусність залишати додатковий напуск металу, який би стримував у процесі деформування з одного боку. Або призначити додатковий уступ з боку виступу (додатковий технологічний напуск), що спряло би підвищенню інтенсивності розкочування з боку виступу. При призначенні додаткового напуску з боку виступу конусність поковки після обтискання на 25% зменшується та становить 0,05. Цей спосіб має обмеження, яке полягає в підвищенні зайвих витрат металу в наслідок додаткового технологічного напуску.

3. Було встановлено, що при розкочуванні заготовки з напуском з боку уступу, діаметр з боку уступу зменшився в порівнянні зі схемою без напуску. Конусність поковки становила 0,04, що менше, ніж при розкочуванні поковки з напуском з боку виступу. За результатами моделювання можна зробити висновок, що при одночасному деформуванні виступу та уступу заготовки поковка буде мати значну конусність (0,16) в наслідок того, що виступ під час розкочування буде зазнавати менший ступінь деформації, ніж уступ. Додатковий напуск збільшеного діаметра з боку уступу призводить до збільшення витрат металу. Додатковий напуск з боку виступу сприяє радіальній течії металу і є дієвим методом для регулювання конусності, за рахунок забезпечення симетричності схеми деформування. Що у кінцевому рахунку зменшує конусність.

4. За результатами дослідження було встановлено, що у процесі розкочування до товщини стінки поковки 345 мм виготовлена поковка буде мати конусність меншу 0,003 у порівнянні зі всіма досліджуваними схемами.

При цьому довжина виступу була знижена також на 3,0 %, а уступу на 5,0 %. Рівень деформації в уступі більш високий, що можна пояснити збільшеною товщиною стінки уступу до деформації за рахунок технологічного напуску. Знов таки, максимальні деформації локалізовані у поверхневих шарах з боку виступу.

5. Збільшення висоти сходинки між виступом та уступом за рахунок збільшення діаметра виступу, призводить до утворення зворотної конусності зі збільшенням діаметру з боку виступу. Це пояснюється тим, що в такому випадку ступінь деформування виступу буде більшою, ніж уступу. Така закономірність спостерігається протягом усього процесу розкочування. Короткі по довжині виступи призводять до формування конусності на ступінчастій заготовці зі збільшеним внутрішнім діаметром з боку уступу. Такі заготовки можна використовувати при виготовленні деталей конусної форми. При збільшенні зовнішнього діаметра виступу відбувається зниження конусності та заготовка за формою близька до циліндричної.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ КОНУСНИХ ВТУЛОК

4.1 Розробка методики проведення експериментальних досліджень формозмінення на свинцевих моделях

Метою проведення експериментальних досліджень є верифікація результатів теоретичного дослідження процесу розкочування ступінчастих заготовок МСЕ, а також встановлення закономірностей формозмінення заготовки при деформуванні. Крім цього, метою є перевірка можливості впровадження та ефективності розроблених схем деформування, які встановлені на базі моделювання МСЕ. Більш того, результати експерименту з використанням та узагальненням виробничого досвіду, будуть задіяні в оцінці оптимальності запропонованих технологічних рішень з метою розробки заводських рекомендацій. Експериментальне дослідження процесу розкочування східчастих заготовок були проведені на базі лабораторій кафедри «Обробки металів тиском» ДДМА [120].

Основними факторами, які впливають на формозмінення заготовки будуть висоти сходинки між виступом та уступом в залежності від відносного ступеня обтискання.

Проведені теоретичні дослідження дозволили встановити напрямок для проведення експериментів. Це дозволило скоротити матеріальні витрати. Результати моделювання МСЕ не можуть бути остаточними. Це пов'язано з тим, що при скінчено-елементному моделюванні була необхідність нехтувати такими показниками як неточність врахування сил тертя та анізотропію механічних властивостей вихідних заготовок. Реальні

експерименти потребують виготовлення заготовок та оснащення для деформування [165].

Для забезпечення ефективності та результативності експериментальних досліджень слід обрати відповідні методи [166].

Особливістю дослідження процесів гарячого деформування є наступне:

- ступінь складності проведення експериментальних досліджень;
- можливість проведення експерименту у промислових умовах;
- потреба виготовлення складного оснащення та задіяння унікального обладнання;
- можливість деформування у гарячому стані;
- точність;
- можливість встановлення розподілу деформацій в тілі заготовки без її руйнування [13].

Ефективним шляхом проведення досліджень процесів кування крупних поковок є їх моделювання на зменшених зразках (моделях). Це дозволить значно зменшити витрати та трудомісткість експериментальних досліджень. Моделювання процесів повинно проводитися з використанням законів подоби розмірів та матеріалу натури. При використанні теорії подібності відомі методи, які дозволяють встановлювати безрозмірні величин параметрів подібності. Проведення експериментальних досліджень на базі теорії подібності полегшується за рахунок того, що встановлюється функціональна закономірність між комплексами значень, та у ряді рішень не потребують встановлювати вплив кожного параметру окремо. Процеси гарячого пластичного деформування великогабаритних поковок характеризуються значною кількістю факторів які впливають, а також специфічністю фізичних процесів, які виникають в тілі заготовки. Всі ці процеси залежать від хімічного складу матеріалу, розмірів заготовки та деформувального інструменту, термошвидкісних умов деформування та температури навколишнього повітря. Для отримання прийнятних результатів слід враховувати умови закону подібності [121].

Для зберігання тих процесів, які відбуваються у натурному зразку, необхідно в моделі забезпечити базові умови законів подоби (геометричного, температурного, реологічного та швидкісного).

Розкочування великогабаритних поковок у гарячому стані визначається великою кількістю величин, які чинять вплив на цей процес. Якщо процес не досліджений, то є висока вірогідність того, що можна не врахувати якийсь важливий параметр. Задля цього треба встановити систему рівнянь і точно вказати граничні умови. В цьому буде полягати розробка математичної моделі досліджуваного процесу. У результаті можна встановити обґрунтовану кількість критеріїв подоби. Якщо явище не досліджено і не існує приблизного його рішення, то слід проводити частковий аналіз, що дозволяє використовувати певну інформацію для розв'язання поставленої задачі. У результаті такий обмежений перелік показників дозволяє встановити тільки наближену математичну модель. Така модель дозволяє створювати умови для визначення точної моделі. Тому треба зберегти реологічну подобу фізичних та механічних властивостей моделі та натури. В ідеальному випадку слід виробляти модель з того ж матеріалу що і натура. Така умова не є обов'язковою. В обробці металів тиском достатньо, щоб збігалися механічні та реологічні властивості матеріалу. Це дозволяє для моделювання процесів обробки тиском використовувати матеріал модельної заготовки, який відрізняється від матеріалу натурної деталі.

Установочні та попередні дослідження на сталених зразках проводити недоцільно. Для визначення формозміни заготовки у процесі деформування достатньо використовувати свинець. Особливістю цього матеріалу є те, що в нього низька температура плавлення, а відповідно температура рекристалізації. Відомо, що формозмінення заготовки залежить від деформованого стану, а останній залежить від розподілу напружень в тілі заготовки. Особливістю гарячих процесів є те, що разом зі зміцненням матеріалу у процесі деформування відбувається розміцнення

в наслідок релаксації напружень. Таким чином, поведінка свинця при кімнатних температурах співпадає з реологією сталі у гарячому стані. Тому моделювання на свинці не суперечить теорії подоби. Додавання у сплав свинця сурми або вісмуту дозволяє змінювати фізичні та механічні властивості сплаву.

Масштаб дослідження був 1:40. Заготовки для деформування виготовлялися литтям у металеву форму. Довжина уступу 50 мм. До цієї висоти заготовки додавався припуск, який видалявся механічно, для можливості видалення усадочної раковини з тіла заготовки. Форма для виготовлення заготовок складалася з плити 5, на якому розміщувалось кільце 4 для забезпечення уступу та центральний стрижень 3 для формування отвору, далі зверху встановлювався корпус 2 (рис. 4.1, а). Перед заливанням розплаву свинця у форму, вона попередньо підігрівалась до температури 190°C. Це виключало різке переохолодження розплаву у формі, що могло би призвести до розшарування металу у внутрішніх шарах. Кристалізація злитків відбувалась у формі на повітрі. Охолодження заготовок відбувалося разом з виливницею на повітрі. Задані розміри заготовки отримували після механічної обробки (рис. 4.1, в). Кількість заготовок визначалась планом проведення експерименту [19].

За розробленою схемою деформування був спроектовано ступінчастий бойок (рис. 4.1, в). Довжина бойка складала 150 мм, висота уступу 7 мм, а довжина ділянки, що буде формувати виступ 50 мм. Циліндрична оправка мала діаметр 30 мм. Для забезпечення постійних ступенів деформацій на кожному проході розкочування для різних заготовок використовували набір ходо обмежуючих пластин товщиною 1 мм. Оправка укладалась на дві стойки 5. Експериментальне оснащення у показано на рисунку 4.1, г. На двох стойках розташовувалась циліндрична оправка 4.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.1 – Форма для виготовлення заготовок (а); отримана ступінчаста заготовка (б); східчастий бойок (в); схема процесу розкочування (г)

Над оправкою укладалися пластини 6, а з протилежного боку ходообмежуюче кільце 3. Східчастий бойок 2 кріпився до повзуна гідравлічного преса 1 за допомогою цапфи, що встановлювався в отвір повзуна преса, після чого затискався болтом. Моделювання процесу розкочування на свинцевих зразках проводили на гідравлічному пресі МС-50

з номінальним зусиллям деформування до 50 кН [119]. Швидкість деформування на цьому пресі становить 150 мм / хв).

Для встановлення базових механічних властивостей та проведення мікро- та макроструктурних досліджень, слід провести експеримент на сталевих за відомою та запропонованою технологією, слід провести розкочування у гарячому стані сталевих зразків. В цьому разі обрана сталь 45. Для цього були виготовлені 2 заготовки з такими розмірами: $\varnothing 70 \times \varnothing 30 \times 45$ та $\varnothing 75 \times \varnothing 30 \times 45$. Для розкочування виготовлявся східчастий бойок та циліндрична оправка (рис. 4.2) [120].

Базові механічні властивості виробів після гарячого деформування визначалися за результатами вимірювання твердості. На сьогодні відомо багато варіантів вимірювання твердості. Ефективним у нашому випадку буде вимірювання твердості по Роквеллу. Це в першу чергу визначається розмірами заготовок та орієнтовною величиною твердості. Твердість вимірювалась після кування, повільного охолодження у печі, щоб не відбулося загартування сталі та не впливала на результати твердості загартованої сталі.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Деформуючий інструмент для проведення дослідження на сталевих зразках: східчастий бойок (а), циліндрична оправка (б)

Іншим показником якості металу після деформування за новою схемою була внутрішня будова заготовки та її макроструктура. Для цього вирізані з готової поковки зразки шліфувалися на наждачному папері з розміром зерна Р60 та Р100. Далі заготовки протравлювалися у 15 % розчині азотної кислоти протягом 20 хв. Отримані таким чином макроструктури фотографувалися.

Після фотографування ці ж темплети полірувалися та травилися для вивчення мікроструктури. Після полірування темплети були знежирені ацетоном. Далі темплети були знежирені та протравлені 10% розчином азотної кислоти у етиловому спирті. Після травлення мікрошліф був промитий та висушений.

Розрахунок бала зерна проводився за стандартною методикою на базі підрахунку кількості зерен на 1 мм^2 та розрахунку середньозваженого діаметру зерна. Встановлення бала зерна відбувалось за такою методикою [173]:

4.2 Планування процесу розкочування конусних втулок

Планування експерименту дозволяє при мінімальних витратах на дослідження отримати статистично обґрунтовані результати. Це дозволяє зменшити матеріальні витрати та витрати часу на їх проведення. Більш того, розробка плану експерименту не тільки дозволяє провести статичну обробку отриманих даних, але й встановити математичну модель змінення розмірів ступінчастої заготовки поковки при куванні конусних втулок для різних ступенів обтискання.

Методика цього дослідження полягала в тім, що після кожного проходу розкочування на висоту 1,0 мм, вимірювалися розміри ступінчастої заготовки, а саме діаметри заготовки (зовнішні уступу та виступу, внутрішній діаметр та висота заготовки) [121].

Процес розкочування – це складний процес, на який чинять вплив багато факторів. Однак, треба обрати тільки ті чинники, якими неможна нехтувати та їх вплив є значущим. Для кожного фактору треба обрати базовий рівень та інтервали варіювання. Базовий рівень фактору X_1 (діаметр виступу віднесений до діаметру отвору) дорівнює 2,5. Інтервал його варіювання становить 0,1. Для другого фактору (відносний діаметру уступу) X_2 базовий рівень складає 1,8, а інтервал варіювання 0,2.

Для третього фактору (ступень обтискання заготовки) базовий рівень становить 0,2, а інтервал варіювання – 0,1. Такі діапазони варіювання зазначених факторів дозволять охопити основний діапазон конусних втулок, які виготовляються на виробництві. Швидкість руху повзуна преса та коефіцієнт тертя варіюватися не будуть та будуть прийматися сталими. Таким чином, визначені три основних фактора, які впливають на процес деформування кілець з фланцем.

Ці фактори краще задавати у відносному вигляді для можливості перенесення отриманих результатів на різні розміри заготовок, а саме: діаметр виступу D_B/d_0 , діаметр уступу D_y/d_0 та відносний ступінь деформації ε (табл. 4.1). Також у таблиці наведені інтервали їх варіювання. В якості параметрів оптимізації є: угол конусності поковки α , відносний діаметр отвору з боку виступу d_B/d_0 [122].

Відносний ступінь обтискання заготовки на i -тому колі обертання (ε_i) для операції розкочування пустотілої заготовки визначався через початкову та поточну товщину стінки

$$\varepsilon_i = \frac{(D_{B\ i-1} - d_{i-1}) - (D_{B\ i} - d_i)}{(D_{B\ i-1} - d_{i-1})}.$$

Таблиця 4.1 – Фактори та інтервали їх варіювання при проведенні дослідження за планом типу ПФЕ 3^3

Фактори та інтервали їх варіювання	X_1	X_2	X_3
	D_B/d_0	D_Y/d_0	ε
Інтервал варіювання Δx_i	0,1	0,2	0,1
Нижній рівень $x_i = -1$	2,6	2,0	0,1
Середній рівень $x_i = 0$	2,5	1,8	0,2
Верхній рівень $x_i = +1$	2,4	1,6	0,3

Перерахунок умовних показників факторів до натуральних здійснюється за формулами [150]:

$$X_1 = \frac{D_B/d_0 - 2,5}{0,1}, \quad X_2 = \frac{D_Y/d_0 - 1,8}{0,2}, \quad X_3 = \frac{\varepsilon - 0,2}{0,1}. \quad (4.1)$$

Очікуванні результати не будуть мати лінійні залежності, тому для дослідження слід використовувати плани другого порядку. Для цього буде використовуватися план повного факторного експерименту (ПФЕ) по типу 3^n . В нашому конкретному випадку число факторів $n = 3$ (табл. 4.1). Це дасть змогу отримати достатню адекватність отриманої регресійної моделі при плануванні [123]. Для реалізації цього плану слід провести $3^3 = 27$ дослідів. План-матриця проведення експерименту представлена у таблиці 4.2.

Загальне рівняння регресії для плану ПФЕ 3^3

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^8 b_i \times x_i + \sum_{i=1}^8 b_{ij} \times x_i \times x_j + \sum_{i=1}^8 b_i \times x_i^2. \quad (4.2)$$

Коефіцієнти рівняння регресії [27]

$$B_i = (X_i^t \times X_i)^{-1} \times (X_i^t \times \bar{Y}_i),$$

де X_i – план-матриця у закодованому вигляді;

X_i^t – матриця X_i після транспонування;

$\bar{Y}_i$ – значення параметра оптимізації.

Таблиця 4.2 – План-матриця експерименту з розкочування ступінчастих кілець

№	Закодована позначка			Натуральна величина		
	X_1	X_2	X_3	D_B/d_0	D_Y/d_0	ε
1	-1	-1	-1	2,6	2,0	0,1
2	0	-1	-1	2,5	2,0	0,1
3	+1	-1	-1	2,4	2,0	0,1
4	-1	0	-1	2,6	1,8	0,1
5	0	0	-1	2,5	1,8	0,1
6	+1	0	-1	2,4	1,8	0,1
7	-1	+1	-1	2,6	1,6	0,1
8	0	+1	-1	2,5	1,6	0,1
9	+1	+1	-1	2,4	1,6	0,1
10	-1	-1	0	2,6	2,0	0,2
11	0	-1	0	2,5	2,0	0,2
12	+1	-1	0	2,3	2,0	0,2
13	-1	0	0	2,6	1,8	0,2
14	0	0	0	2,5	1,8	0,2
15	+1	0	0	2,4	1,8	0,2
16	-1	+1	0	2,6	1,6	0,2
17	0	+1	0	2,5	1,6	0,2
18	+1	+1	0	2,4	1,6	0,2
19	-1	-1	+1	2,6	2,0	0,3
20	0	-1	+1	2,5	2,0	0,3
21	+1	-1	+1	2,4	2,0	0,3
22	-1	0	+1	2,6	1,8	0,3
23	0	0	+1	2,5	1,8	0,3
24	+1	0	+1	2,4	1,8	0,3
25	-1	+1	+1	2,6	1,6	0,3
26	0	+1	+1	2,5	1,6	0,3
27	+1	+1	+1	2,4	1,6	0,3

Після підстановки коефіцієнтів регресії в загальне рівняння, отримуємо три математичні моделі для різних параметрів оптимізації, та визначають вплив різних діаметрів заготовки та ступеня обтискання на діаметри поковки.

Таким чином, при експериментальному дослідженні проведені досліді на свинцевих зразках. За результатами цих досліджень отримана регресійна модель, на основі якій встановлені залежності змінення відносних розмірів заготовки у процесі розкочування східчастим бойком.

Крім цього, виконано експеримент на сталевих зразках, для порівняння розробленого методу кування східчастих обичайок з традиційним способом їх виготовлення.

Розроблений план дослідження був представлений у вигляді схем форм та розмірів досліджуваних заготовок (рис. 4.3) та схем деформування (рис. 4.4) [124].

4.3 Розкочування конусних втулок з товстою стінкою уступу

Експерименти були поділені на групи для різних відносних діаметрів уступу вихідної заготовки D_y/d_0 . В роботі були визначені рівняння регресії відносних діаметрів виступу поковки, уступу поковки та торцевих діаметрів отвору при різних ступенях обтискання ε та вихідних розмірів східчастої заготовки.

При розкочуванні конусних втулок відбувається нерівномірне обтискання уступу та виступу, як було показано у теоретичному моделюванні. Це чинить вплив на утворення конусності у бік уступу або виступу.

За результатами експериментального моделювання буде встановлений механізми формозмінення при розкочуванні ступінчастої заготовки східчастим бойком [124].

При розкочені ступінчастих заготовок з товстою стінкою (діаметр уступу $D_y/d_0 = 2$) буде утворюватися конусність (рис. 4.5) зі збільшеним діаметром з боку уступу. Для досліджуваного співвідношення діаметрів заготовок були розглянуті 2 схеми деформування: 1 – коли на початковому етапі розкочування обтискається виступ (рис. 4.6, а); 2 – коли на початковому етапі розкочування обтискається уступ (рис. 4.6, б).

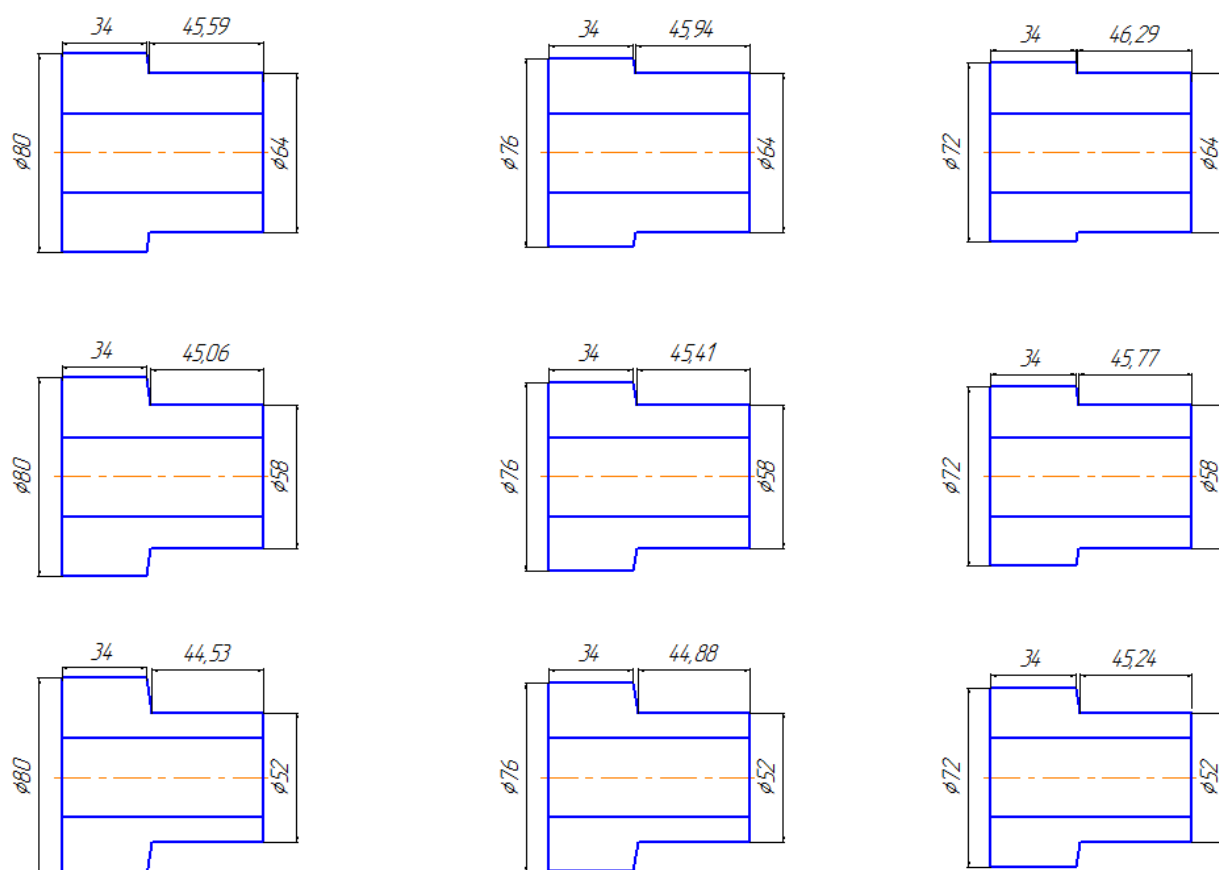


Рисунок 4.3 – Форми та розміри досліджуваних заготовок

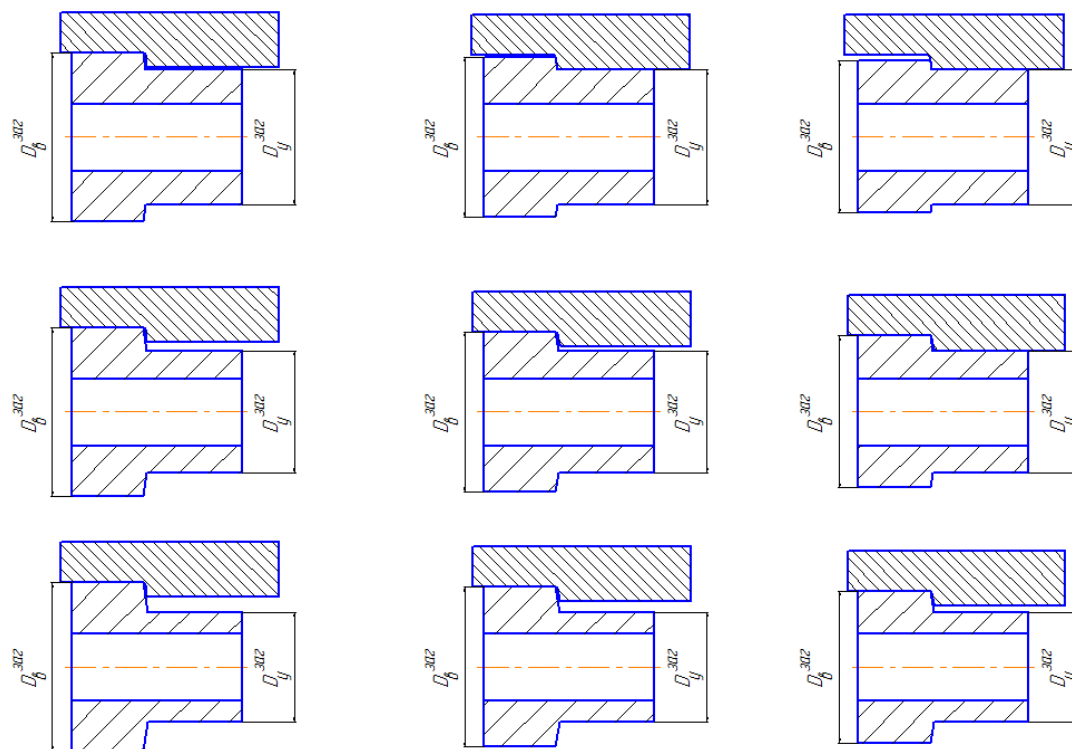


Рисунок 4.4 – Схеми деформування досліджуваних заготовок



а)

б)

в)



г)

д)

е)

Рисунок 4.5 – Заготовки до розкочування з відносними діаметрами виступів D_B/d_0 : а – 2,6; б – 2,5; в – 2,4) та після розкочування (г–е) з відносним діаметром уступу 2,0 :

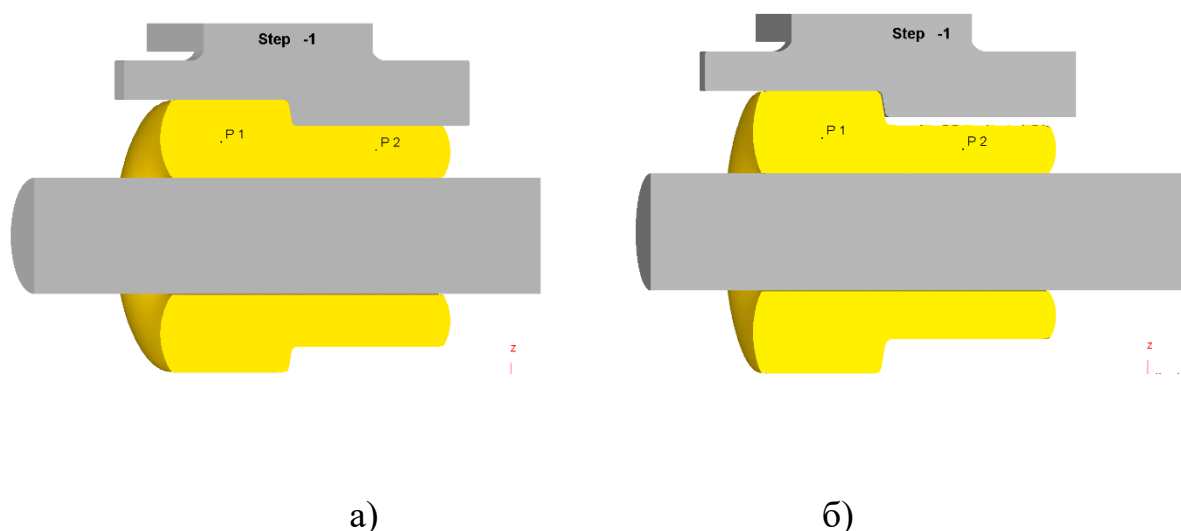


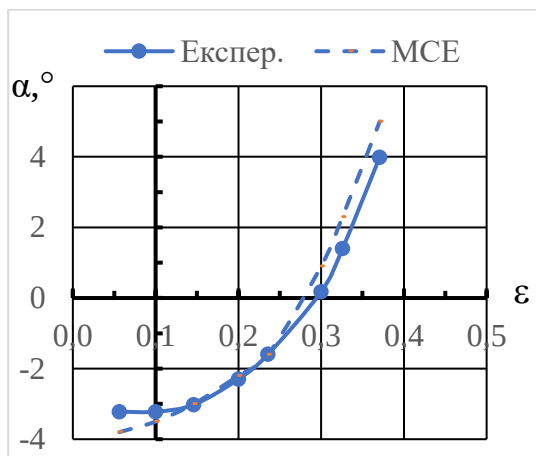
Рисунок 4.6 – Варіанти розкочування східчастих заготовок з діаметром уступу D_y/d_0 : спочатку обтискається виступ (а) та уступ (б)

Аналіз отриманих результатів ступеня обтискання виступу та уступу при розкочуванні дозволив встановити, що з кожним натисканням заготовки ступінь деформації в уступі більший, ніж у виступі. При цьому діаметр уступу збільшується більш інтенсивно (рис. 4.7). Визначено, що при зменшенні діаметра виступу відбувається збільшення різниці відносних ступенів обтискань. Отримані результати можна пояснити тим, що у процесі одночасного деформування уступу та виступу на сталу величину обтискання, відбувається більш швидке зростання діаметра з боку тонкої стінки – з боку уступу. В цьому разі окружна деформація уступу буде вище, ніж у виступі, що і приводить до збільшення діаметра. Нерівномірність розподілу деформацій визначає значну інтенсивність збільшення діаметра отвору зі сторони уступу. Таким чином нерівномірне змінення діаметрів отворів є причиною утворення конусності (α) на готовій поковці. Конусність заготовки залежить від таких факторів: діаметрів отвору з боку уступу d_y та виступу d_b , а також висоти поковки H_{Π} (рис. 4.7). У процесі розкочування висота заготовки майже не змінюється, тому на утворення конусності заготовки чинять вплив діаметри отворів з боку уступу та виступу. Тому у дослідженні встановлено взаємозв'язок цих 2 факторів [125].

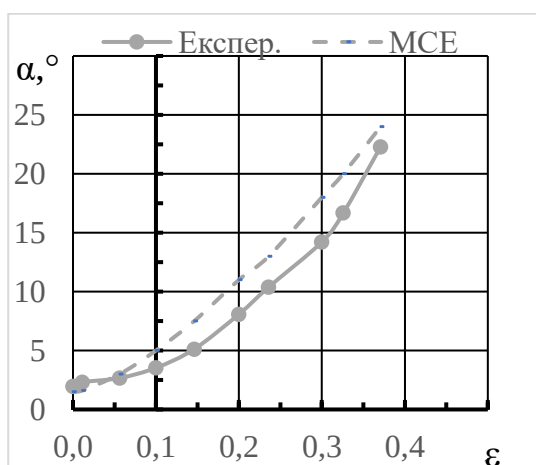
Розкочування ступінчастої пустотілої заготовки зі співвідношення відносного діаметра уступа $D_y/d_0 = 2$ приводить до утворення конусної внутрішньої та зовнішньої поверхні. В результаті таким способом можна отримувати конусні втулки з фланцем (див. рис. 4.5, г-е). Причому для різних відносних діаметрах виступів (D_b/d_0) спостерігається степенева закономірність змінення кута конусності раструба. При зменшенні висоти виступа закономірність переходить у лінійну (рис. 4.7, в). Це пояснюється тим, що при зменшенні висоти виступа одтискання уступа починається раніше, тому спостерігається інтенсивне збільшення діаметра уступа, а виступ у цей час стримує збільшення діаметра. Для високих вихідних виступів на заготовці до ступеня обтискання 20% відбувається утворення зворотної конусності.

Це пояснюється тим, що при високих виступах спочатку обтискається він, і тільки після деформації 0,2 починає обтискатися уступ, який починає кардинально змінювати характер формозмінення.

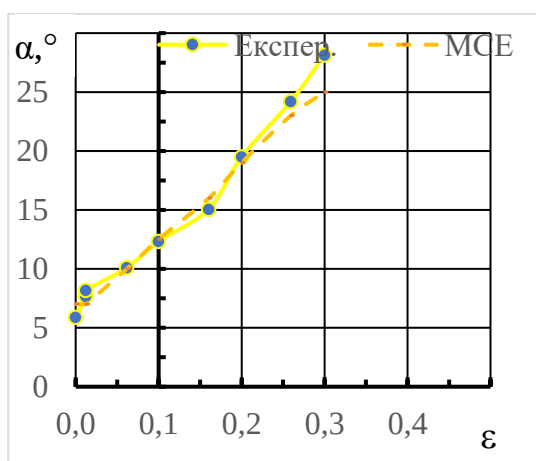
Аналіз даних змінення діаметрів отвору з боку уступу та виступу дозволяє стверджувати, що діаметр отвору уступу так же, як і ступінь обтискання, зростають більш стрімко, ніж зі сторони виступу. Одержані данні співпадають з тими, що були отримані при скінчено-елементному моделюванні. Зменшення діаметра виступу D_b/d_0 призводить до зниження діаметра отвору з боку виступу. Згідно отриманих даних закономірність, що характеризує співвідношення $D_b/d_0 = 2,6$, розташовується нижче, а при $D_b/d_0 = 2,4$ – вище. Більш того, при низьких значеннях D_b/d_0 зростають діаметри отворів з боку уступу. Максимум кута конусності, що характеризує співвідношення $D_b/d_0 = 2,4$, розташовується вище, а при збільшенні цього співвідношення ($D_b/d_0 = 2,6$) – нижче. Таким чином можна зробити проміжний висновок, що для співвідношення $D_y/d_0 = 2,0$ при зменшенні діаметра виступу (D_b/d_0) кут конусності збільшується. Це притаманно не тільки по отвору, але і по зовнішнім діаметрам (рис. 4.8).



а)



б)



в)

Рисунок 4.7 – Змінення кута конусності раструба від ступенів деформації ε при обтисканні для заготовок з різними відносними діаметрами виступів

$D_{\text{в}}/d_0$: а – 2,6; б – 2,5; в – 2,4

При розкочуванні заготовки з різними відносними діаметрами виступів (D_B/d_0) 2,5 та 2,4, лінії не перетинаються, а йдуть майже рівновіддалено друг від друга. Це свідчить, для цього відносного діаметра уступа ($D_y/d_0 = 2$) залежності аналогічні і процес збільшення конусності проходить однаково. Причому ця конусність збільшується на всьому етапі деформування [106].

При збільшенні діаметра виступу ступінчастої заготовки $D_B/d_0 = 2,6$, відбувається така закономірність – на початку операції розкочування діаметр отвору з боку виступу більше, ніж з боку уступу. Це свідчить про обтискання тільки виступу. Після обтискання виступу на 25 %, діаметри отвору уступу та виступу вирівнюються. Далі при розкочуванні з'являється біль швидше збільшення діаметра з боку уступу.

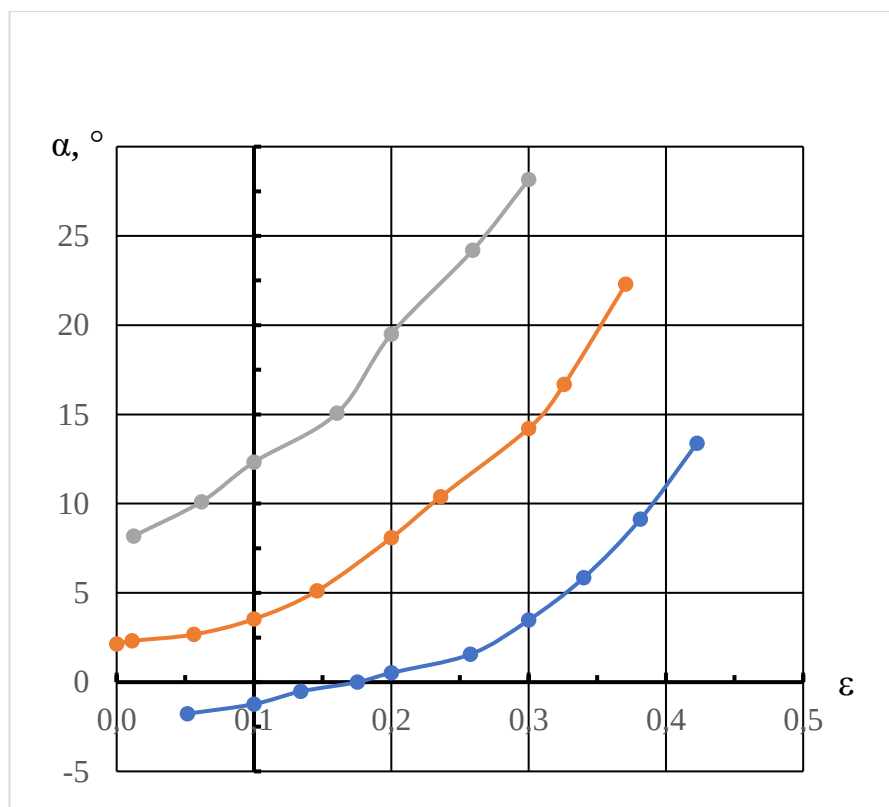


Рисунок 4.8 – Змінення кута конусності втулки від ступенів деформації ε для заготовок з різними відносними діаметрами виступів D_B/d_0 : 1 – 2,6; 2 – 2,5; 3 – 2,4

При зменшенні діаметра виступу (D_b/d_0) до 2,5 та 2,4 також відбувається утворення конусності. Це викликано тим, що при таких співвідношеннях уступ починає деформуватися з самого початку та до кінця процесу. У таблиці 4.5, представлено по стадійне змінення форми та розмірів заготовок для ступенів обтискання уступів 8 %, 26 % та 51 %. З перелічених схем розкочування виділяється схема з $D_b/d_0 = 2,6$. Для таких співвідношень розмірів на початковому етапі утворюється зворотна конусність зі збільшенням діаметром з боку виступу. Після обтискання на 26 % ($\varepsilon_y = 0,26$) форма заготовки стала близька до циліндричної. Це підтверджується перетином кривої з віссю абсцис при $D_b/d_0 = 2,6$ (рис. 4.8). Подальше обтискання стінки заготовки деформування в уступі відбувається більш інтенсивно, що призводить до збільшення діаметру уступу та утворення конусності поковки. Інші схеми розкочування характеризуються тим, що конусність для них підвищується на всьому етапі деформування [118].

Загальною характеристикою для усіх досліджуваних схем розкочування є те, що конусність збільшується при збільшенні ступеня обтискання ступінчастої заготовки. Максимальну конусність можна отримати при низьких значеннях товщини виступу ($D_b/d_0 = 2,4$) на графіку це крива 3. Мінімальну конусність можна отримати при розкочування ступінчастих заготовок з високим фланцем ($D_b/d_0 = 2,6$). В даному випадку помітна конусність починає з'являтися, коли висота сходинки заготовки дорівнює висоті сходинки на бойку. Це відбувається після обтискання на 26 %. Коли починає обтискатися уступ заготовки, то відбувається стрімке збільшення діаметра з боку уступу та конусності відповідно.

Важливий інтерес представляють закономірності зміни діаметрів отвору з боку уступу та виступу при ступінчастому розкочуванні. Ці данні дозволяють кількісно визначити швидкість збільшення діаметрів на торцях ступінчастої при майже сталій висоті заготовки.

4.4 Розкочування конусної втулки з середньою стінкою уступу

Для середньої товщини стінки уступу ($D_y/d_0 = 1,8$) та варіюванні діаметрів виступів D_b/d_0 у діапазоні 2,3; 2,5 та 2,6 будемо мати два варіанта розкочування: коли починає на першому етапі розкочуватися виступ та коли одночасно починає деформуватися виступ та уступ. Ці два варіанта будуть призводити до різного формозмінення заготовки.

Після деформування ступінчастих заготовок з діаметром уступу $D_y/d_0 = 1,8$ мінімальна конусність була отримана для поковки, що була продеформована $D_b/d_0 = 2,6$. Максимальна конусність була отримана при співвідношенні $D_b/d_0 = 2,4$ (рис. 4.9).

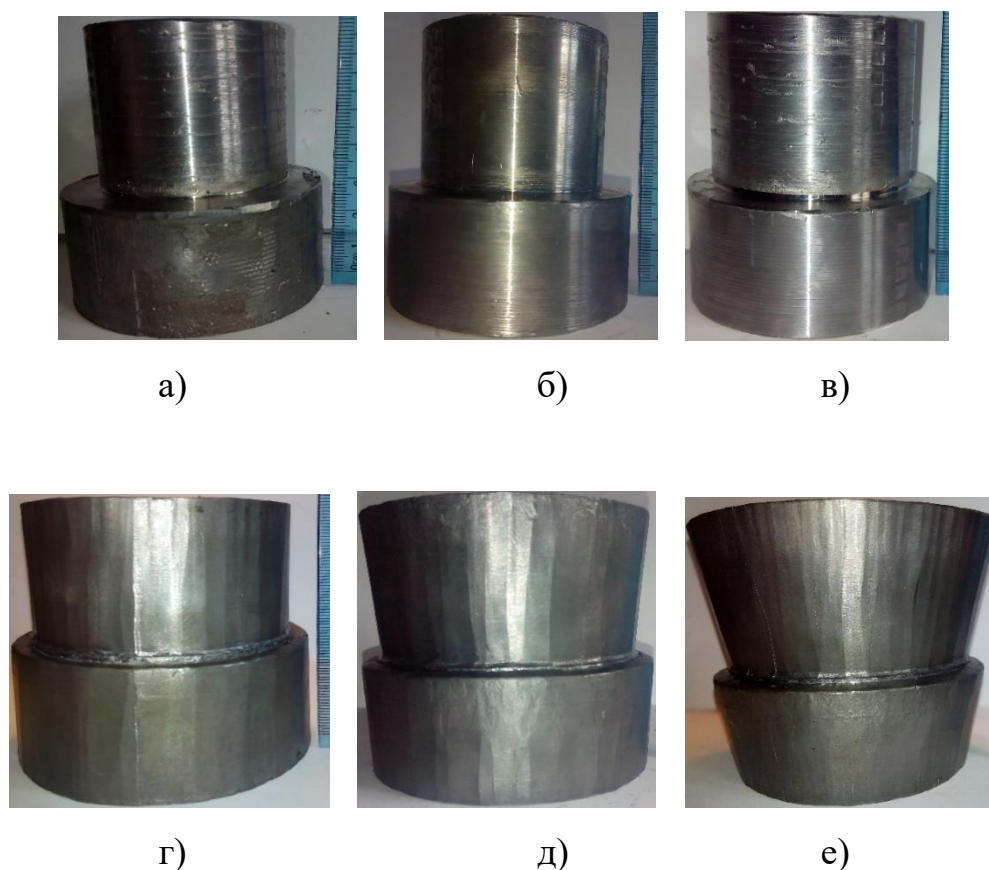


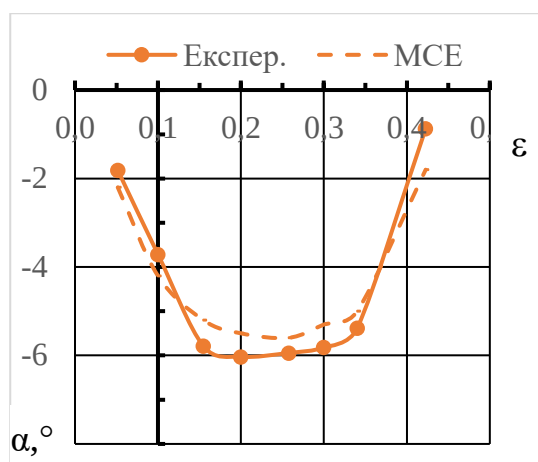
Рисунок 4.9 – Заготовки до розкочування (а – $D_b/d_0 = 2,6$; б – $D_b/d_0 = 2,5$; в – $D_b/d_0 = 2,4$) та після (г–е) з діаметром уступу $D_y/d_0 = 1,8$

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що зменшення діаметра виступу призводить до зниження ступеня його деформації. Це пояснюється тим, що відбувається зменшення вихідної товщини виступу. В результаті зменшується кількість натискань (проходів по колу).

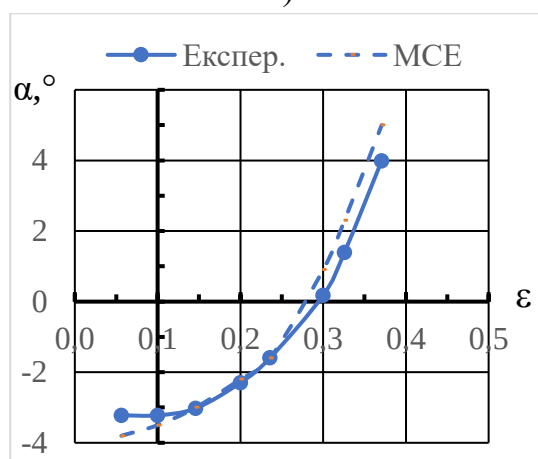
Для заготовок з високим виступом ($D_v/d_0 = 2,6$) (рис. 4.10, а) ступінь деформування виступу більший, ніж в уступі на початковому етапі деформування. Це пояснюється тим, що висота сходинок бойка менша за висоту виступу. В результаті уступ на початковому етапі не обтискається. У той момент, коли виступ буде обтиснений до висоти, яка співпадає з висотою сходинок, починає обтискатися уступ заготовки. Це призведе до збільшення деформації металу в місті уступу, причому завдяки меншій його стінці, деформації в ньому будуть проходити більш інтенсивно. Аналіз графіка (рис. 4.10, а) дозволив встановити, що для отримання малого кута конусності на поковці необхідно, щоб різниця деформації у виступі та уступі на початку процесу розкочування дорівнювала різниці деформацій між уступом та виступом наприкінці процесу розкочування.

Для заготовок з середньою висотою виступу ($D_v/d_0 = 2,5$) (рис. 4.10, б) на початковому етапі розкочування також ступінь деформації у виступі більший ніж в уступі. Однак, після другого проходу (обтискання) деформації в уступі починають перевищувати ті що накопичились у виступі (рис. 4.10, б). Подальше розкочування тільки посилює цю різницю. Це пояснює утворення конусності на поковці, яка характерна для цієї схеми деформування.

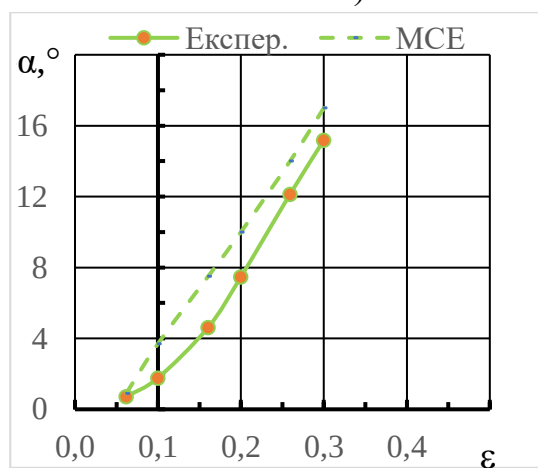
При розкочуванні заготовок з низьким виступом ($D_v/d_0 = 2,4$) (рис. 4.10, в) відбувається одночасне деформування виступу та уступу. У результаті деформація металу виникає одночасно в виступі та уступі, однак в уступі вони мають більшу величину.



а)



б)



в)

Рисунок 4.10 – Змінення кута конусності конусної втулки від ступенів деформації ε при обтисканні для заготовок з різними відносними діаметрами виступів $D_{\text{в}}/d_0$: а – 2,6; б – 2,5; в – 2,4

Така закономірність характерна на всьому етапі розкочування. Ці залежності мають лінійну закономірність, яка прямо пропорційна ступеню обтискання.

Додатково були досліджені та проаналізовані закономірності змінення діаметра отвору в залежності від ступеня обтискання. Було визначено, що при збільшенні обтискання діаметр отвору збільшується, причому ці залежності майже прямо пропорційні [119].

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що при підвищенні ступеня обтискання ε конусність зі сторони уступу збільшуються швидше, чим зі сторони виступу. Для відносних діаметрів виступу D_v/d_0 , які дорівнюють 2,6 та 2,5, при ступені обтискання менше 0,15 та 0,1 відповідно, різниця між діаметрами уступу й виступу збільшується. При цьому збільшується конусність зі сторони виступу. Це пояснюється тим, що на цьому етапі відбувається тільки деформування виступу. При відносному діаметрі виступу $D_v/d_0 = 2,6$ діаметри отворів заготовки з двох боків співпадають після $\varepsilon=0,4$ (поковка получається майже циліндричною і для виготовлення раструбів не підходить). Для діаметра виступу $D_v/d_0 = 2,5$, після обтискання на 30% відбувається змінення напрямку утворення конусності. Це свідчить про те, що в цьому разі діаметри отвору зі сторони уступу й виступу однакові (рис. 4.11) [120].

При розкочуванні заготовок з $D_v/d_0 = 2,4$ діаметр отвору з боку уступу на початковому етапі деформування збільшується сильніше, ніж з боку виступу. При цьому криві не перетинаються, це свідчить про формування конусності ще на початковому етапі деформування.

Аналіз результатів змінення кута конусності при $D_v/d_0 = 1,8$ дозволив визначити, що максимальна конусність утворюється для низького виступу $D_v/d_0 = 2,4$.

Для середнього виступу ($D_v/d_0 = 2,5$) конусність постійно змінює знак конусності впродовж всього процесу розкочування. Спочатку вона підвищується, потім знижується майже до нуля, далі знов зростає. Більш цікавими

є результати зміни конусності для високого виступу ($D_b/d_0 = 2,6$). В цьому разі конусність на початку розкочування (до ступеня обтискання 0,15) збільшується, далі перестає змінюватися майже до обтискання 0,3, після чого починає знижуватися майже до нуля. Горизонтальна полиця на цій кривій конусності утворюється внаслідок того, що в цей момент швидкість збільшення діаметрів з боку уступу й виступу вирівнюються.

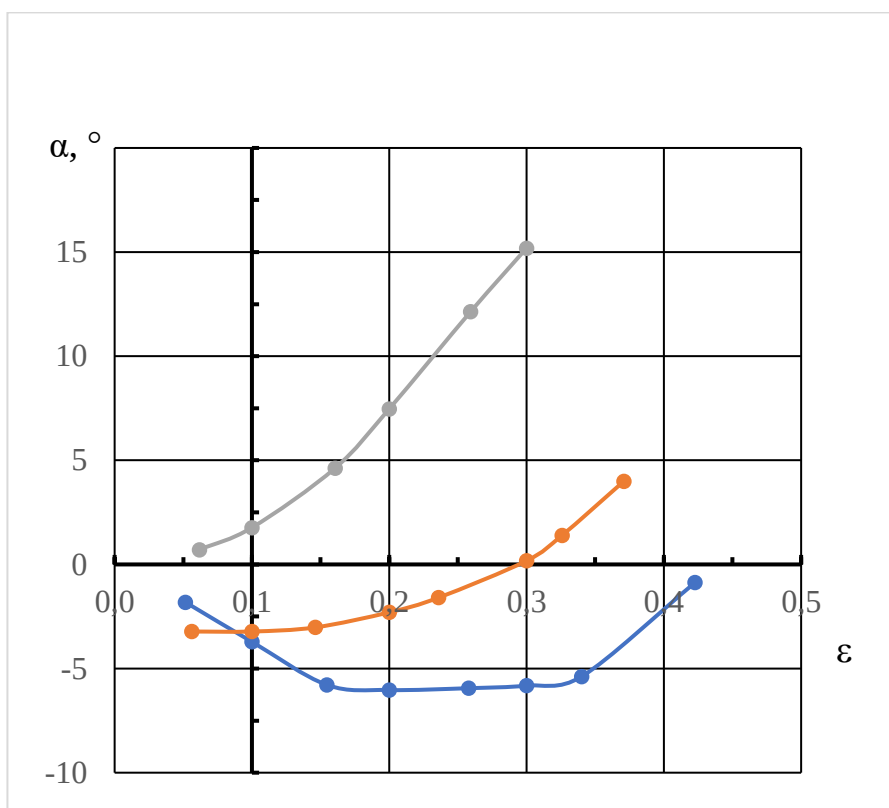


Рисунок 4.11 – Змінення кута конусності раструба від ступенів деформації ε для заготовок з різними відносними діаметрами виступів D_b/d_0 : 1 – 2,6; 2 – 2,5; 3 – 2,4

Зниження конусності пояснюється тим, що інтенсивне збільшення діаметра уступу починає компенсувати попереднє збільшення діаметра виступу [149].

4.5 Розкочування конусних втулок з тонкою стінкою уступа

Зменшення товщини стінки вихідної заготовки (відносного діаметра уступу $D_y/d_0 = 1,6$) дозволило отримати зовсім протилежні результати проти тих, які були встановлені раніше. А саме, при розкочуванні таких заготовок утворюється зворотна конусність, коли максимальний діаметр з'являється з боку виступу ступінчастої заготовки (рис. 4.12).

Досліджувані схеми деформування характеризувалися тим, що для них розкочування завжди розпочиналось з деформування виступу. Відмінність цих трьох схем полягала в тім, що варіювалась тільки висота виступу. За результатами дослідження було встановлено, що мінімальний кут конусності з'являється на поковці, яка була продеформована зі ступінчастої заготовки з $D_B/d_0 = 2,4$, а максимальний кут – з заготовки $D_B/d_0 = 2,6$ (рис. 4.12).

Розрахунок ступеня обтискання дозволив встановити, що при розкочуванні заготовок з високим виступом ($D_B/d_0 = 2,6$) ступінь деформації виступу змінюється прямо пропорційно обтисканням (рис. 4.12, г). Це призведе до утворення значної конусності у бік виступу, при цьому уступ не деформується до 6 проходу.

В результаті утворюється зворотна конусність на поковці. Не дивлячись на те, що наприкінці 10 проходу ступінь деформації в уступі та виступі вирівнялись, це не призвело к усуненню конусності.

Розкочення заготовок з виступом середньої висоти ($D_B/d_0 = 2,5$) призводить до схожих з попереднім випадком результатів, за виключенням того, що деформування уступу починається вже з 4 проходу та проходить більш інтенсивніше ніж для високого виступу (рис. 4.12, д). В результаті конусність знижується.

За схожим механізмом відбувається розкочення заготовок з низьким виступом (рис. 4.12, е) за такою відмінністю. За рахунок того, що виступ меншої висоти, то обтискання уступу починається раніше [122]. В результаті

уступ деформується більше і встигає збільшити свій діаметр, що дозволило зменшити конусність поковки. В цьому разі форма поковки близька до циліндричної. Зростання діаметра виступу є причиною того, що зростає різниця між діаметрами отвору зі сторони уступу й виступу. Це зростання на початковому етапі деформування визначається через обтискання виступу.

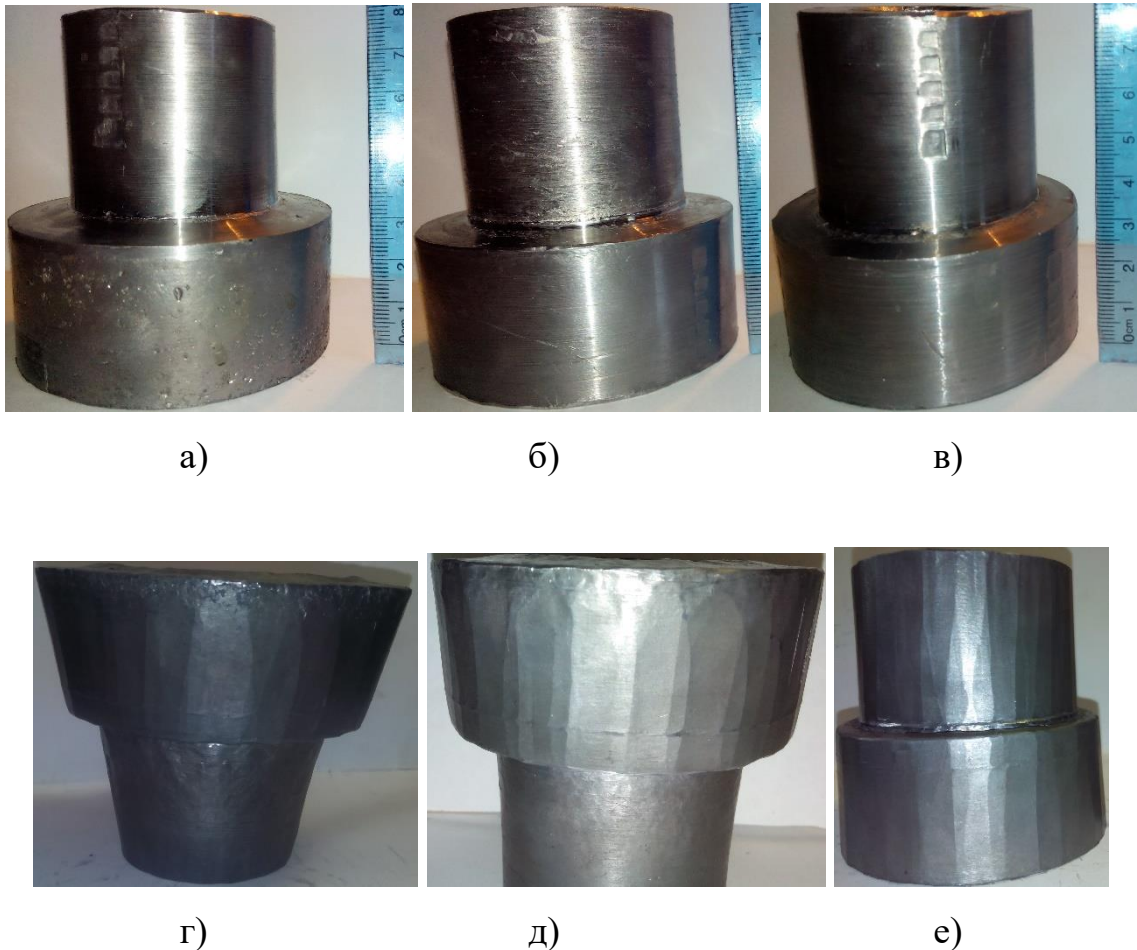
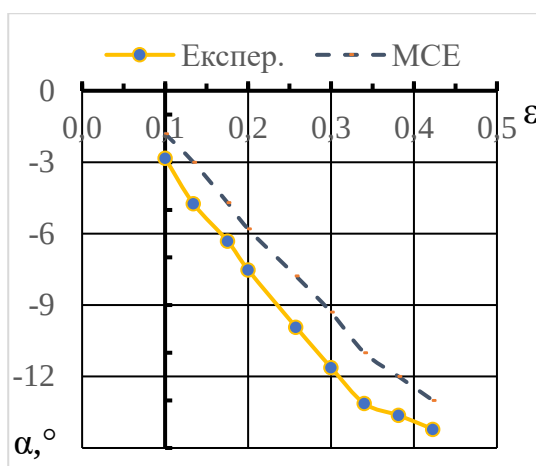
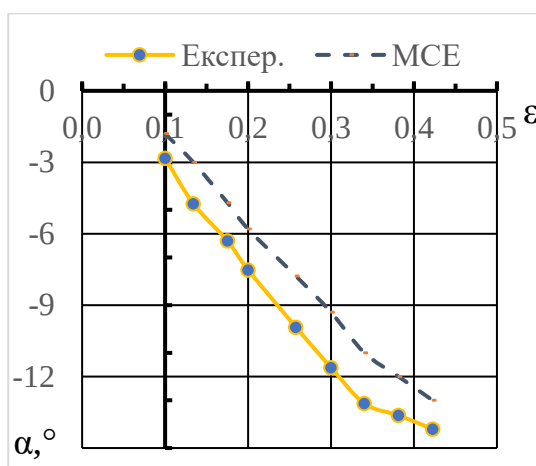


Рисунок 4.12 – Заготовки до (а – $D_B/d_0 = 2,6$; б – $D_B/d_0 = 2,5$; в – $D_B/d_0 = 2,4$ та після розкочення (г, д, е) при $D_y/d_0 = 1,6$

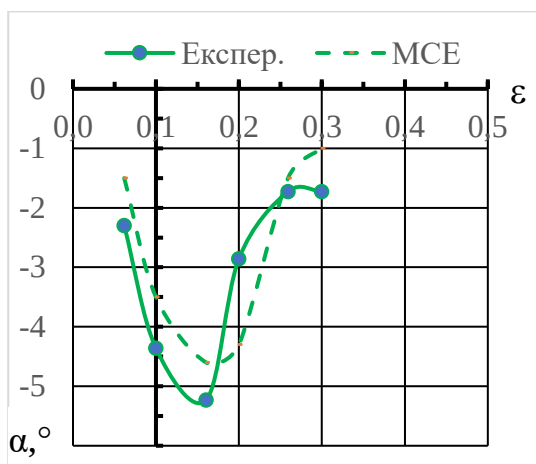
Аналіз результатів змінення кута конусності при розкочуванні раструбів з токою стінкою дозволив встановити, що для високих виступів ($D_B/d_0 = 2,6 \dots 2,5$) утворюється зворотня конусність (рис. 4.13, а, б) з розширенням в бік виступа.



а)



б)



в)

Рисунок 4.13 – Змінення кута конусності раструба від ступенів деформації ε при обтисканні для заготовок з різними відносними діаметрами виступів D_B/d_0 : а – 2,6; б – 2,5; в – 2,4

Ця закономірність майже змінюється лінійно для таких співвідношень розмірів, що буде облегшувати проектування геометрії пустотілої ступінчастої заготовки для майбутньої конусної поковки (таких як раструби та ін.). Однак при зменшенні висоти виступа кут нахилу цієї кривої зменшується, тобто утворення конусної поверхні відбувається не так інтенсивно.

Зовсім протилежна утворюється закономірність формозмінення при зменшенні висоти виступа (рис. 4.13, в).

На першому етапі до деформації (обтискання стінки виступа) на 15% з'являється зворотна конусність зі збільшенням діаметра фланцевої частини заготовки, при цьому діаметр з боку уступу практично не змінюється.

Але після обтискання виступу на 15% починає деформуватися також ділянка уступу і конусність починає інтенсивно збільшуватися в зворотному напрямку. Це в свою чергу призводить до вирівнювання поковки та набуття єю форми, наближеної до циліндричної. Такий спосіб деформування не є раціональним для виготовлення конусних поковок, а тільки годиться для циліндричних обичайок з фланцем.

Для ступінчастої заготовки, в якій $D_b/d_0 = 2,6$ діаметри отворів з боку виступу й уступу наприкінці розкочування мають максимальну різницю, хоча ступені обтискання майже співпадають. Це пояснюється тим, що на початку обтискається виступ і тільки після обтискання на 25% починає перетерплювати деформацію уступ, через те, що під час обтискання уступу виступ вже накопичив певний рівень деформації, який був більшим ніж половина загального ступеня деформації. Через значну різницю між діаметрами уступу й виступу висоти стінки уступу не вистачає для накопичення заданого рівня деформації при розкочуванні, для зниження різниці у діаметрах отворів [123]. На рисунку 4.14 представлені залежності змінення конусності поковки від ступеня обтискання. Розкочування високого та середнього виступів ($D_b/d_0 = 2,6$ та $D_b/d_0 = 2,5$) призводять до від'ємного збільшення конусності на протязі всього процесу

розкочування ступінчастої заготовки. Однак, розкочування низьких виступів ($D_b/d_0 = 2,4$, крива 3) забезпечує зниження конусності вже після обтискання на 15%.

Максимальну відємну конусність дає схема з максимальним уступом. В цьому разі можна отримати поковку з розширенням зі сторони виступа (фланця).

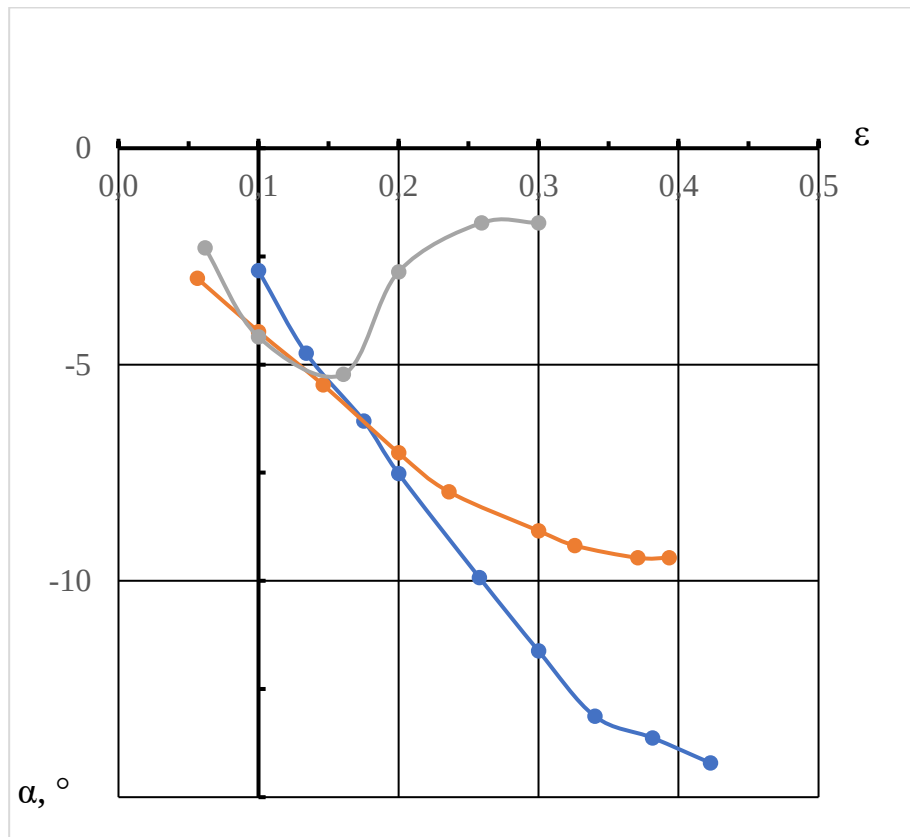


Рисунок 4.14 – Змінення кута конусності конусної втулки від ступенів деформації ε для заготовок з різними відносними діаметрами виступів D_b/d_0 : 1 – 2,6; 2 – 2,5; 3 – 2,4

Наступним кроком було встановлення закономірностей збільшення діаметра поковки з боку виступа у процесі розкочування конусних втулок з фланцем. Ця задача викликана тим, щоб обрати таку геометрію заготовки, яка б давала максимальну швидкість збільшення конусності про розкочуванні.

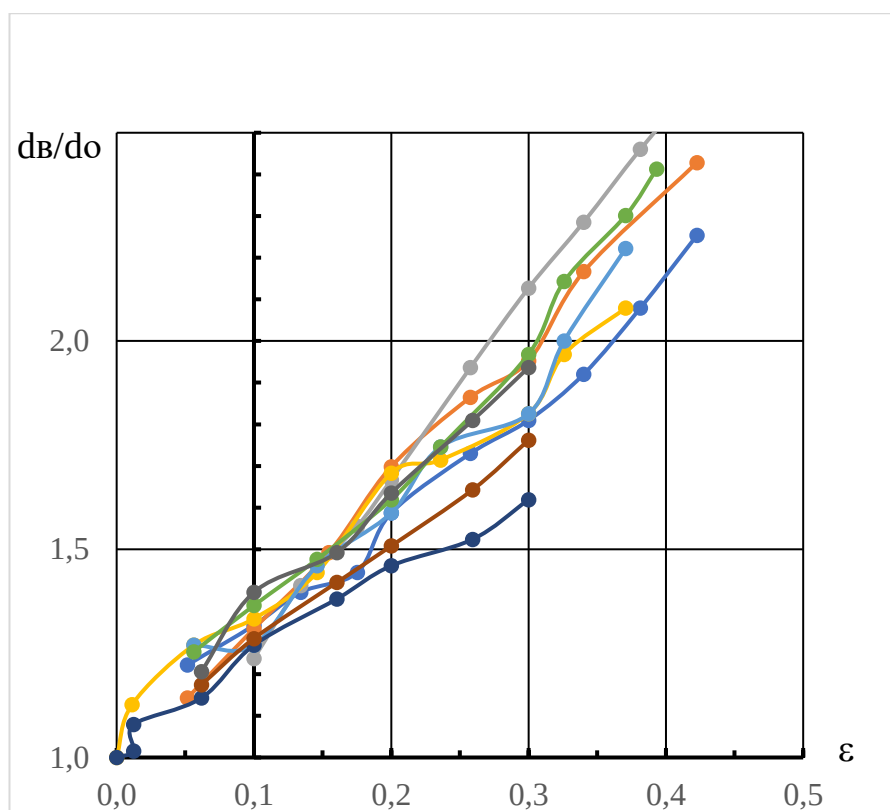


Рисунок 4.15 – Змінення відносного діаметра виступа у процесі розкочування від ступенів деформації ϵ для всіх досліджуваних заготовок

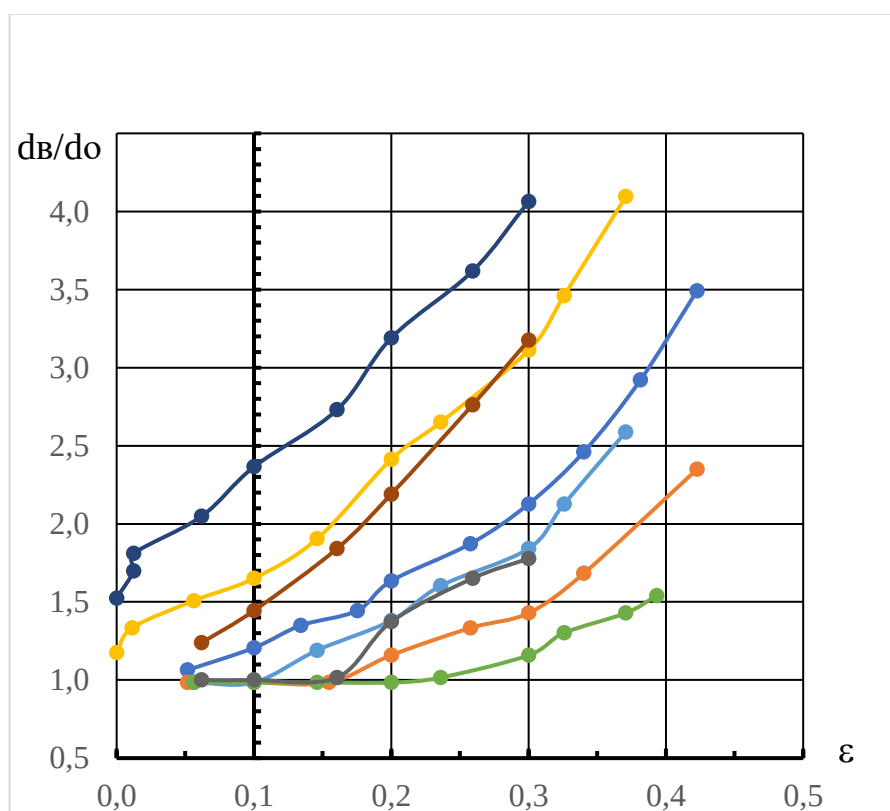


Рисунок 4.16 – Змінення відносного діаметра уступа у процесі розкочування від ступенів деформації ϵ для всіх досліджуваних заготовок

Загальна картина зміни діаметра отвору з боку виступа при розкочуванні представлена на рисунку 4.15. Аналіз отриманих результатів показує, що характер зміни діаметра отвору при розкочуванні однаковий, майже лінійний. Максимальну інтенсивність розкочування забезпечують низькі виступи.

Більш сильну різницю в швидкостях збільшення діаметру отвору мають уступи поковки. Швидкості збільшення суттєво відрізняються. Максимальні результати дають способи розкочування зі мінімальними висотами виступів ($D_v/d_0 = 2,4$) та діаметрами уступу $D_y/d_0 = 2$. Наступним кроком слід розробити математичні моделі формозмінення заготовки при розкочуванні конусних поковок.

4.6 Дослідження процесів кування конусних поковок без фланця

Такі вироби, як конічні кільця великих розмірів, досить поширені в машинобудуванні, в атомній та енергетичній промисловості. Такі деталі використовуються, наприклад, у вигляді елементів корпусів ядерних реакторів. Найбільш доцільним способом отримання таких виробів є розкочування ступінчастою заготовки, так як цей спосіб не пред'являє особливих вимог до наявності спеціального обладнання. Відомості про цей спосіб кування практично відсутні як у вітчизняній, так і в зарубіжній літературі, що перешкоджає його використанню у виробництві. Актуальними є дослідження, спрямовані на розширення галузі знань про цей метод та на створення методики проектування процесів кування конічних кілець.

Фізичне моделювання процесу кування конусної бандажа проводилося на основі методу розкочування ступінчастої порожнистої заготовки плоским бойком на циліндричній оправці [152]. Моделювання проводилося на свинцевих зразках. Процес виготовлення конусної пов'язки схематично показаний на рис. 4.17.

Спочатку була відлита свинцева заготовка циліндричної форми

діаметром 60 мм і висотою 54 мм. Після осадження отриману ступінчасту заготовку встановлювали фланцем вниз на рівну плиту. Зверху на заготовку встановлювався порожнистий прошивень і надставка, які втискувалися у заготовку. Після ненаскрізного прошивання заготовку з прошивнем і надставкою перенесли на плиту з отвором, і прошили наскрізь (рис. 4.17). Далі в отриману циліндричну порожнисту ступінчасту заготовку вставляли циліндричну гладку оправку і розкочували.



Рисунок 4.17 – Переходи кування конусної втулки

На рисунку 4.18 показані фото покрокового виготовлення конусної втулки. Варіюючи величину потовщення на поковки, отримували конічні втулки з різними значеннями конусності.



Таким чином, шляхом осадження і прошивання були отримані заготовки з діаметром бурта (D_2) 77 мм і висотою (H_1) 9, 13 і 17 мм. На

рисунку 4.19 наведено графік залежності кута конусності отриманої втулки від відносної висоти заготовки.

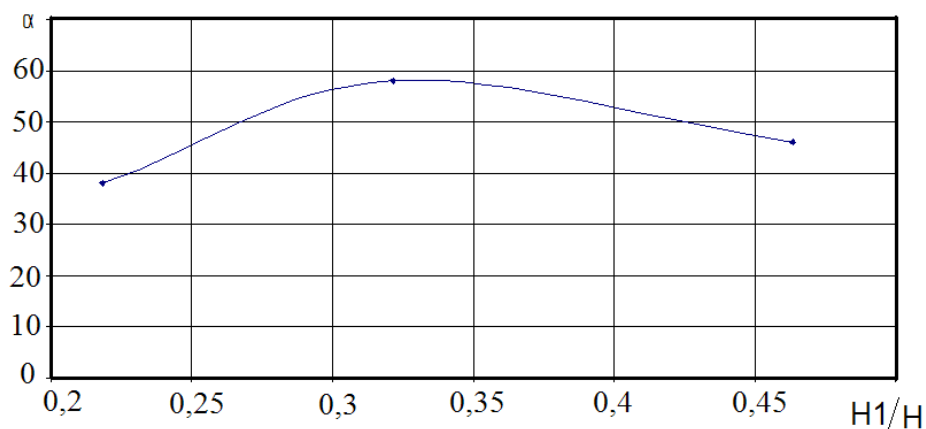


Рисунок 4.19 – Графік залежності кута конусності втулки α від відносної висоти палі H_1/H

Отримана залежність дозволяє зробити висновок, що висота бурта початкової заготовки визначає величину конусності отриманої поковки. Також можна помітити, що існують значення відносної висоти бурта заготовки, при якій конусність після розкочування буде найбільшою.



Рисунок – 4.20. Фото отриманих конусних кілець

Конусні втулки різних розмірів також були отримані експериментальним шляхом, фотографії показані на рис. 4.20. На підставі плагнування експерименту, регресійного аналізу і результатів

експериментальних досліджень була отримана математична модель, що описує вплив геометричних параметрів заготовки на конусність розкоченої втулки. При аналізі отриманої моделі були побудовані графіки залежності кута конусності втулки від різних геометричних параметрів заготовки.

Аналіз графіків показує, що при зміні висоти бурта кут конусності змінюється по параболічній залежності (рис. 4.21). Конусність кільця різко збільшується при збільшенні висоти бурта до 450 мм. При зміні висоти хомути від 450 до 900 мм конусність кута нахилу втулки зменшується. Це можна пояснити тим, що коли висота бурта занадто низька, то, відповідно, невелика кількість металу схильна до деформації, що позначається на конусності. При великій висоті бурта розширення стримується невеликою висотою втулки. Таким чином, найбільший кут конуса вийде при співвідношенні висоти ворсу до висоти кільця, яка знаходиться в районі 0,5. Ця залежність підтверджується для різних діаметральних параметрів заготовки.

Зміна зовнішнього діаметра кільця $D1 = 1500 \dots 1700$ мм показали, що конусність кута нахилу барабана зменшується при постійних параметрах H , $H1$, D , $D0$. При різних показниках $H1 = 100, 500, 900$ мм кут зменшується в межах 150. Ця залежність була підтверджена для різних значень висоти ворсу (рис. 4.21).

В результаті варіювання діаметра бурта була отримана майже лінійна залежність (рис. 4.21). Збільшення діаметра бурта в межах $D=1100 \dots 1500$ мм призвело до постійного збільшення конусності від 0 до 50 градусів. Найбільший кут звуження спостерігається при найбільшому діаметрі бурта. У той же час зміна внутрішнього діаметра мало впливало на зміну кута. Так для $D0 = 600, 630, 660$ мм зміна кута знаходиться в межах 5° .

Використовуючи профільовану заготовку методом кування, можна отримати більш складну конфігурацію виробів, наприклад, циліндр з розтрубом. У цьому випадку також необхідно використовувати циліндричну порожнисту заготовку зі ступінчастим зовнішнім контуром, а розкочування повинно проводитися вузьким бойком [124].

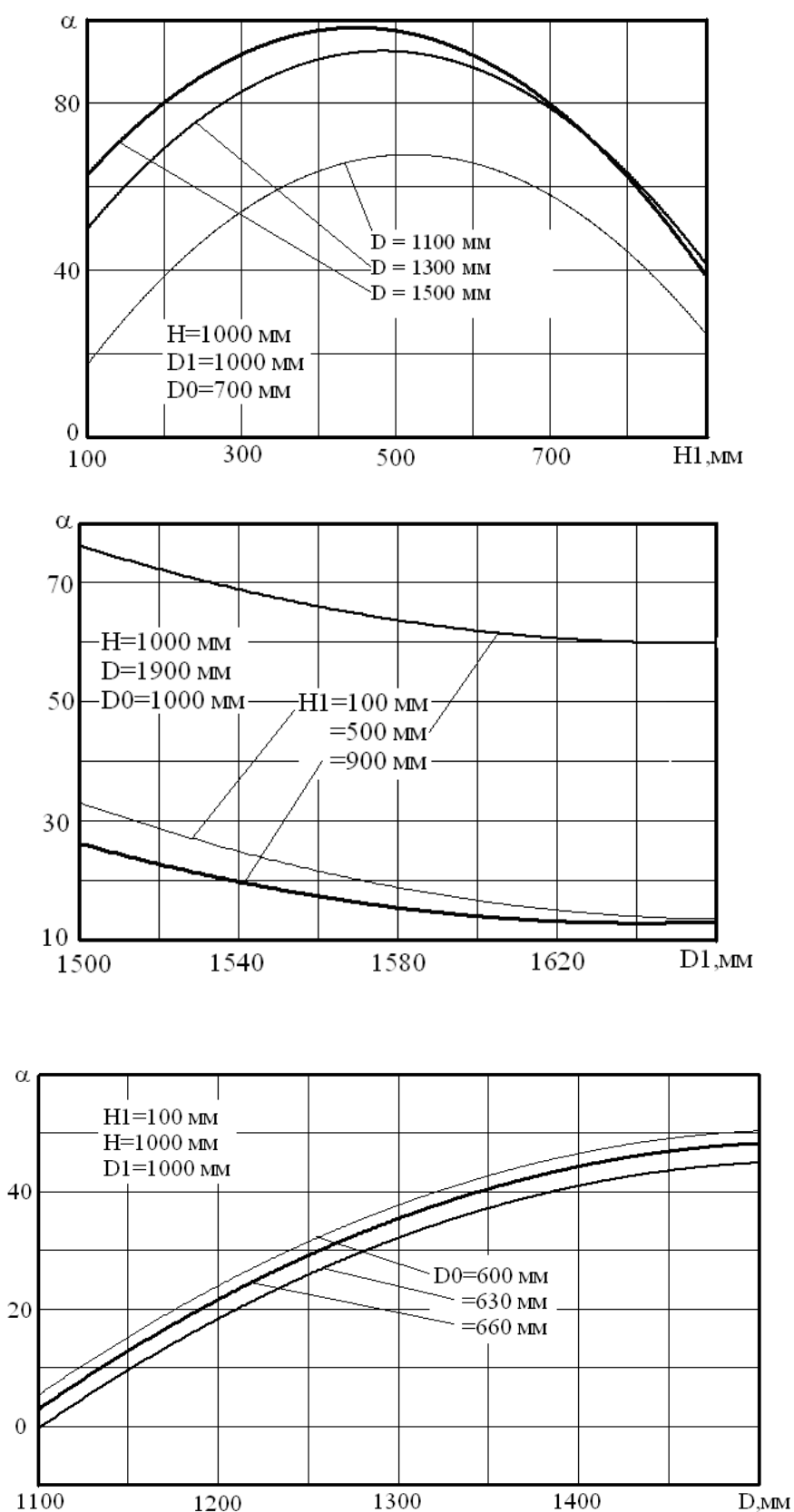


Рисунок 4.21 – Графік залежності кута конусності втулки від геометричних параметрів заготовки

При цьому борт на поковці повинен бути коротким, щоб під час розкочування залишалася жорстка недеформована циліндрична частина заготовки.

4.7 Розробка математичної моделі процесу розкочування конусних втулок

Для розробки нового технологічного процесу розкочування конусних втулок (раструбів) треба дати рекомендації з формозмінення заготовки при розкочуванні. Для цього треба розробити математичну модель змінення діаметрів конусної втулки при розкочуванні. Необхідно, щоб модель дозволяла встановлювати кут конусності отвору у поковці після розкочування, знаючи поковочні зовнішні відносні діаметри виступа та уступа. Згідно методики планування експерименту була розроблена математична модель процесу розкочування конусних втулок (раструбів)

$$\alpha = 5,3 + 0,51 \times X_1 - 0,67 \times X_2 + 0,21 \times X_1 \times X_2 \times X_3. \quad (4.3)$$

Перехід від кодових позначок до натуральних проводився згідно методики п. 4.1. Для перевірки цієї діаграми були проведені два додаткових експерименти. Мета цих експериментів полягала у переконанні, що встановлені рекомендації можна використовувати при проектуванні нових технологічних процесів кування крупних східчастих кілець. Для врахування всіх особливостей реального виробничого процесу кування слід експеримент відтворити повний – від вихідної заготовки до кінцевої поковки. Повний технологічний процес кування східчастих кілець передбачає використання таких операцій: прошивання отвору в суцільній заготівці, протягування на конусній оправці з формуванням ступінчастої проміжної заготовки, розкочування цієї ступінчастої заготовки на

дорні до поковочних розмірів. Схематично цей технологічний процес представлено на рисунку 4.22 [125].

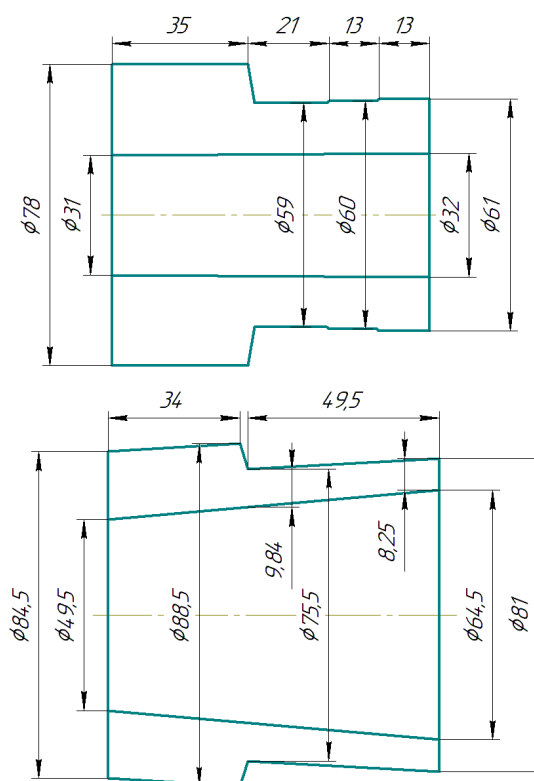


Рисунок 4.22 – Послідовність кування ступінчастої обичайки

Згідно схеми кування (рис. 4.22) був проведений експеримент у масштабі 1:20. На першому етапі була відлита заготовка (рис. 4.23, а). Після цього отриману заготовку осадили та прошили суцільним прошивнем (рис. 4.23, б). Далі за технологією прошита заготовка насажувалась на конусну оправку та відбувалось протягування у вирізних бойках для формування ступінчастої заготовки (рис. 4.23, в).

Протягування здійснювалось в два етапи: протягування до гладкої циліндричної поверхні та формування ступінчастої заготовки (рис. 4.23, г). Перший перехід був потрібен для усунення конусності, яка утворилась на заготовці після осадження та прошивання отвору (див. рис. 4.23, б). Крім цього, циліндрична форма заготовки потрібна для можливості точного

розмічання заготовки де буде розташовуватися уступ. Для отримання точних розмірів використовувалась оправка та вирізні бойки.



а)



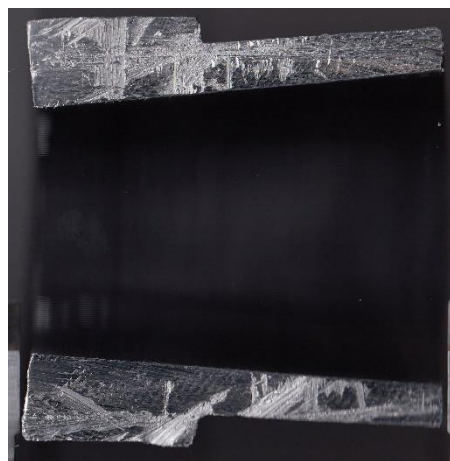
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.23 – Переходи кування ступінчастого кільці: а – заготовка;

б – осадка та прошивка; в – протяжка на оправці; г – розкочування ступінчастим бойком; д – розрізана поковка

Цей деформуючий інструмент дозволив виготовити симетричну точну заготовку. поки не була сформована ступінчаста заготовка (рис. 4.23, г). Для

можливості зйому заготовки з оправки остання передбачала конусну зовнішню поверхню. Після цього витягувалась конусна оправка та вставлялась циліндрична оправка – дорн. Заготовка з оправкою устанавлювалися на стойки та було проведено розкочування ступінчастої заготовки ступінчастим бойком (рис. 4.23, г). Операція розкочування проводилась для збільшення зовнішніх та внутрішніх діаметрів заготовки. При чому довжина (висота) заготовки майже не змінюється. Розкочування проводилось до заданої товщини стінки, яка відповідала поковочній та перераховувалась через масштабний коефіцієнт [111].

Обмірювання розмірів отриманої поковки (рис. 4.23, д) за цією технологією, дозволило встановити, що отримана форма поковки співпадає з розрахунковими по формулі (4.3). Це дозволяє зробити висновок, що отримані результати є прийнятними, а встановлені закономірності з формо змінення заготовки у процесі розкочування є адекватними.

4.8 Дослідження змінення структури металу та розподілу механічних властивостей на сталевих зразках

Оінити опрацювання внутрішньої структури та макропотоків течії металу після розкочування, можна на базі аналізу макро та мікроструктурних досліджень. З літератури відомо, що під час розкочування метал плине переважно у діаметральному напрямку. Ступінчасте розкочування призведе до зміни плину металу, а відповідно і до формування внутрішньої структури. В цьому разі фізичні розрізи заготовок слід робити вздовж осі заготовок.

Розроблюваний процес розкочування ступінчастої поковки передбачає нагрівання, кування на оправці, протягування уступу, розкочування до заданих розмірів поковки (рис. 4.24). Базова технологія передбачала кування заготовки, на оправці до Ø60 мм та остоточне

деформування до поковочних розмірів. Ці зразки підігрівалися до 1100°C в електричній печі. Експеримент проводився на пресі КД1426 з силою кування 430кН. Обтискання становило 1 мм за прохід на всіх переходах кування. Кування, як по новій так і по базовій технологіям, проводилося вирізними бойками. Для розкочування використовувалися стойки, оправка діаметром 25 мм та ступінчасті бойки для розкочування.

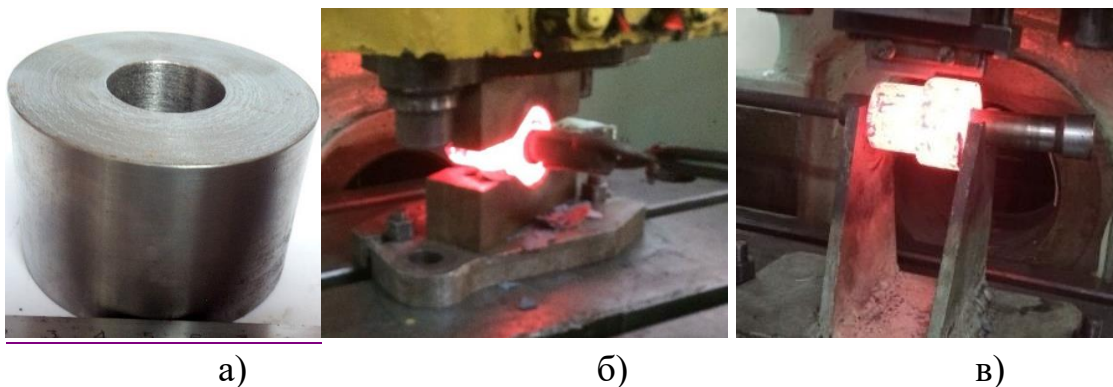


Рисунок 4.24 – Технологічні переходи експериментального кування конусних втулок на сталевих зразках: а – заготовка; б – протягування на оправці; в – розкочування конусної втулки

Після розкочування (рис. 4.25, а та б) поковки охолоджувалися на спокійному повітрі. Заготовки виготовлялися у масштабі 1:50, що пов'язано з розмірами робочого простору ковальського обладнання. Після охолодження поковки оброблювалися механічно до заданих розмірів [155].

Результати макроструктурного дослідження поковки, яка виготовлена за базовою технологією, дозволили встановити, що поковка має сліди плинину металу.

Далі вздовж осі поковок вирізалися зразки для металографічних досліджень. З однієї сторони зразки шліфувалися та вимірювалась твердість через кожні 4 мм за схемою наведеною на рисунку 4.26.



Рисунок 4.25 – Поковки після кування: а – базова технологія; б – нова технологія

Були вирізані зразки задля встановлення твердості. Аналіз отриманих результатів дозволив визначити, що з боку виступу заготовки твердість для двох варіантів кування майже рівна (для нового техпроцесу твердість, становить 82 HRB, для традиційної – 83 HRB). Для нового технологічного процесу твердість у бурті підвищується у бік до торця виступу заготовки. В уступі заготовки, яка відкута за новим процесом твердість становила 85 HRB, а для традиційного методу кування – 82 HRB. Це свідчить про більший рівень деформації при куванні за новим методом [113].

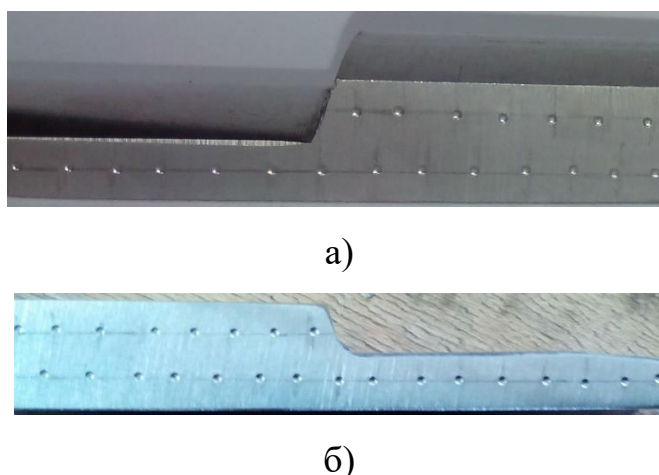


Рисунок 4.26 – Вимірювання твердості за базовою (а) та новою (б) технологіями

Волокна поковки співпадають з віссю (рис. 4.26). Заготовка, яка виготовлена за новим способом, має специфічну будову, волокна якої

співпадають з профілем поковки (рис. 4.26). Можна встановити, що кування за новою технологією призводить до того, що в місці уступу волокна ущільнюються, ніж з боку виступа.

Для кування конусної втулки було проведено аналіз макро- та мікроструктури. Було вирізано по одному зразку з виступу та уступу (рис. 4.27). Обидва зразки шліфували, обезжирювали та піддавали травленню. Для дослідження макроструктури поверхня зразка шліфувалася. Потім шліфувана поверхня була обезжирена та піддавалася травленню (рис. 4.28). Травлення виконували водним розчином соляної та сірчаної кислот у пропорціях 16% HCl , 34% H_2SO_4 , 50% H_2O . Травлення виконували у витяжній шафі у фарфоровій ванні, встановленій на електричній плиті. Промитий та просушений макрошліф фотографувався.

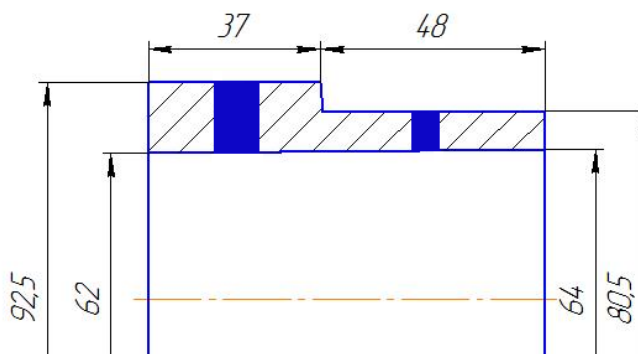


Рисунок 4.27 – Місця аналізу структури сталі

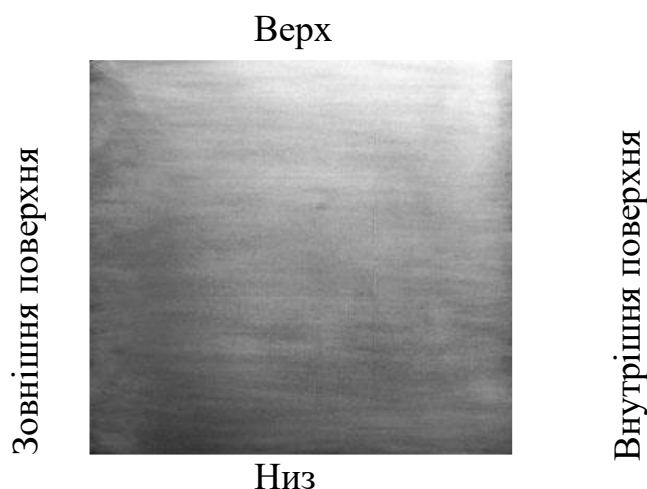


Рисунок 4.28 – Макроструктура зразка у фланці

Макроструктура поперечного перерізу виступу показана на рисунку 4.28. Значних дефектів не спостерігається, і ця частина виявилася досить хорошою.

Для дослідження мікроструктури зразки піддавався шліфуванню та поліруванню до усунення подряпин, були обезжирені та висушені. Травлення відбувалося у 4% розчині HNO_3 в спирті. Промитий та просушений мікрошліф вивчався під мікроскопом. Для дослідження мікроструктури використовувався металографічний мікроскоп ММТ–5Ц.

Для цього способу розкочування спостерігається наявність карбідної сітки, але на сітка слабо виражена, а зерна перліту мають менші розміри (рис. 4.29). Це підтверджує більш інтенсивну проробку структури металу. Максимальна різниця у розмірах зерен відслідковується в уступі поковки [118].

Уступ заготовки отримав більшу деформацію металу при куванні вирізними бойками, тому має менші за розміром зерна. У виступі заготовки, яка відкута за новим технологічним процесом, має інтенсивно подрібнені зерна у місті переходу на уступ. На торці виступа зерна крупніші та карбідна сітка чітка, це є причиною меншого ступіня деформації в цій ділянці поковки. Для встановлення балів зерен були підготовлені мікрошліфи на виступі у центральній частині та уступу у трьох зонах.

Аналіз мікроструктури дозволив визначити, що в уступі заготовки, що виготовлена за новим технологічним процесом, кристали в уступі менші на 0,03 мм, ніж у заготовці, яка отримана за традиційною технологією (бал зерна становить 4 одиниці проти 3). Це можна пояснити більшою величиною ступеня деформації при куванні уступу та розкочуванні. Виступи обох заготовок мали однаковий бал зерна (3 одиниці), що свідчить про рівний ступінь деформування з 20мм до 14мм. Визначення твердості є простим видом механічних властивостей матеріалів. Це випробування проводиться, без руйнування заготовки.

Результати аналізу мікроструктури показали, що в уступі утворюється більш дрібнозерниста структура (рис. 4.29, 4.30). Дрібнозерниста однорідна структура свідчить про достатній рівень гарячої деформації в процесі кування. Це пов'язано з більшою ступеню деформації, що утворюється в уступі.

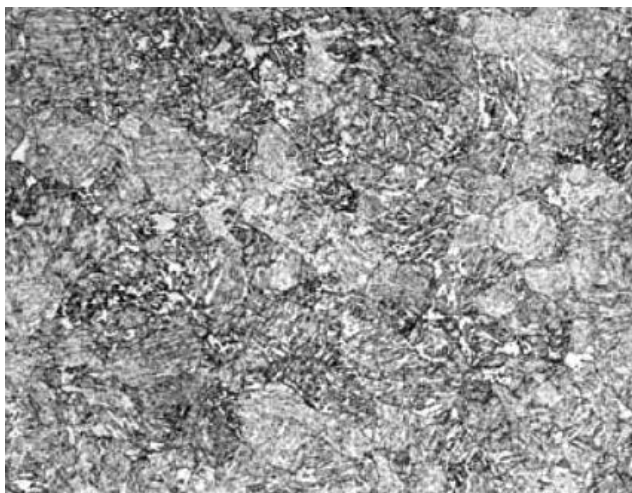


Рисунок 4.29 – Мікроструктура сталі в уступі(х500)

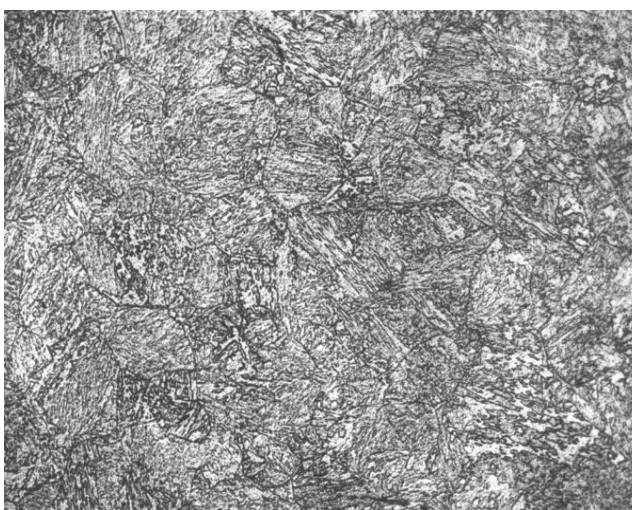


Рисунок 4.30 – Мікроструктура сталі в виступі (х320)

З цього можна зробити висновок, що при виготовленні конусної втулки прибільну частину злитка краще розташовувати з боку уступу. Через високу деформацію дрібні дефекти менш якісного металу прибуткової частини будуть заварені, а більш якісний метал донної частини піде на формування виступу, який отримує меншу деформацію.

Висновки за розділом 4

1. При обкочуванні заготовок з відносним діаметром $D_y/d_0 = 2$, при збільшенні ступень обтискання ε , підвищується внутрішній діаметр з боку учтупа, відношення внутрішніх діаметрів з боку бурта й уступу заготовки зменшується. Це можна пояснити меншим розширенням металу заготовки при деформуванні тонкої стінки, а відповідно підвищенням течії металу у бік збільшення діаметра заготовки. Збільшення конусності здійснюється при зниженні діаметра бурта заготовки. Розкочування східчастих заготовок з діаметром уступу $D_y/d_0 = 2$ забезпечує формування конусності там, де розташований уступ.

2. Обкочування заготовок із діаметром уступу $D_y/d_0 = 1,8$, при підвищенні ступень обтискання ε конусність змінюється не лінійно. Для відносного бурта $D_b/d_0 = 2,6$ та $2,5$, при обтисканні бурта конусність збільшується. Змінення конусності проходить у процесі одночасного обкочування бурта й уступу. На першому етапі конусність знижується, а подальше обкочування призводить до збільшення конусності тільки з іншим знаком.

3. При обкочуванні заготовок із діаметром уступу $D_y/d_0 = 1,6$, при підвищенні ступеня обтискання ε підвищується відносний внутрішній діаметр з боку бурта, відносний внутрішній діаметр бурта й уступу збільшується.

4. Після проведення досліджень на зразках зі свинця та сталі встановлено, що основним фактором, що чинить вагомий вплив на керування плином металу заготовки у діаметральному напрямку є висота виступа, який повинен знаходитися у межах $0,4 \dots 0,45$. В результаті поковки будуть мати циліндричну форму.

5. На основі методів планування експерименту були встановлені рівняння регресії, що можуть бути використані як математичні моделі для визначення геометричних розмірів поковки. Ці моделі дають прийнятний

результат у межах ступеня обтискання $0,1 \dots 0,3$ для співвідношення довжини бурта до довжини поковки $L_g/L = 0,4 \dots 0,5$.

6. Аналіз мікроструктури дозволив визначити, що попереднє протягування та остаточне розкочування ступінчастої заготовки східчастим бойком призводить до того, що волокна поковки співпадають з контуром виробу, що підвищує механічні властивостей деталей відповідального призначення. Твердість в уступі підвищилась на 4-6 одиниці по шкалі HRB, ніж для базового технологічного процесу. Це свідчить про додаткову проробку структури металу у процесі розкочування східчастим бойком.

5 МЕТОДИКА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ ТЕХПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ КОНУСНИХ ВТУЛОК

5.1 Методика проектування техпроцесів кування конусних втулок з буртом

Технологічний процес кування конусних втулок залежить від форми та розмірів деталі. Головним фактором, що обмежує техпроцес кування таких поковок, є конусність заготовки. Цю конусність можна розрахувати з використанням розробленої регресійної моделі. Розробка техпроцесу кування конусної втулки з використанням східчастого бойка зводиться до визначення потрібної форми та розмірів заготовки перед розкочуванням. У проекті представлено алгоритм розрахунку форми та розмірів заготовки для автоматизування процесу складання технології [115]:

Аналіз креслення деталі, який полягає у спрощенні конфігурації поковки до двох конструктивних елементів уступу та виступу. Проектування креслення пресової поковки згідно державного або отраслевого стандарту. Після встановлення припусків, допусків та гарячих розмірів поковки перераховуються довжини ділянок поковки, що потребує перевірку умови співвідношення розмірів, яка зазначена у п. 1 алгоритму. За умови, що співвідношення виконується, то розрахунок проводиться далі, інакше слід змінити припуски та напуски.

Після встановлення основних геометричних параметрів поковки, визначаються розміри ступінчастої заготовки. Розрахунок ступеня обтискання бурта. Відносний ступінь обтискання бурта повинна становити до 0,3. Розрахунок розмірів заготовки. Для розрахунку розмірів заготовки слід використовувати рівняння регресії (4.3). В них входять 3 змінні фактори X_1 , X_2 , X_3 . Ці фактори слід перерахувати за виразом (4.2), задля переходу від кодових позначок до натурних. Вихідними параметрами є розміри поковки і та кут конусність.

Після встановлення відносної різниці між діаметрами бурта й уступа можна визначати розміри зпрофільованої заготовки перед розкочуванням конусної втулки. При цьому поковки з конусною формою можуть мати розширення у бік бурта або уступа. Основний критерій, який буде чинити вплив на знак конусності – це різниця між діаметрами бурта й уступа перед куванням. Вище було встановлено, що при відносній різниці діаметрів більше за 0,45 буде призводити до утворення конусної форми зі збільшеним діаметром з боку бурта. Це пояснюється тим, що у бурті буде накопичуватися більша деформація ніж в уступі. Зменшення перепаду діаметрів бурта й уступа буде призводити до накопичення вищого ступеня обтискання з боку уступа та відповідно інтенсивного зростання діаметра отвору, що в свою чергу призведе до змінення знаку конусності.

Встановити, у який діапазон розмірів входить різниця між діаметрами. Якщо уступ низький, то деталь буде мати більший діаметр з боку уступа. Якщо уступ високий, то деталь буде мати конусність зі збільшеним діаметром з боку бурта. Якщо форма поковки співпадає з відповідними до можливого діапазону формою, то розміри конусної втулки встановлені вірно й подальший технологічний розрахунок проводять за відомою методикою.

Задля зниження витрат металу, енергії була спроектована нова технологія кування конусних втулок з пустотілих зливків. Через виключення енергоємних операцій осаджування та прошивання суттєво знижується витрати енергії на 40% та витрати металу близько 12%. Кування пустотілих зливків можна проводити за 3 нагрівання: протягування блоку та рубка торців, профілювання на конусній оправці заготовки та остаточне конусне розкочування [116].

У роботі вивчається змінення форми пустотілої конусної втулки. При проведенні експериментальних досліджень були відлиті заготовки у виливницю. Після відрізання прибуткової частини злитка, в тілі заготовки виявлялися порожнини, які розташовувалися у тілі поковки, що знижує якість заготовки. За цієї причини не бажано використовувати для деталей

відповідального призначення технологію кування пустотілих злитків. Таким чином, для розробки техпроцесу кування когнусної втулки буде застосовуватися звичайний ковальський злиток.

Обкочування граней зливка слід проводити за традиційною технологією у комбінованих вирізних бойках. Використання таких бойків при обкочуванні граней зливка дозволяє одночасно проводити рубку циліндричного блока за допомогою сокири. Після рубки блоку, його направляють у піч для підігрівання.

Нагрітий до потрібній температурі циліндричний блок слід осаджувати сферичною увігнутою плитою, задля запобігання утворення утягнення металу заготовки при прошиванні отвору. Перед осаджуванням вирубленого блока, його слід розташовувати прибутковою стороною до низу. Це дозволить додатково видалити дефекти, які розташовуються з боку прибуткової частині. В залежності від діаметра отвору в заготовці та діаметру осадженої заготовки обирається пустотілий або суцільний прошивень. Задирку після прошивання, слід зрізати газовим пальником. Осаджена, а потім прошита заготовка направляється у піч для подальшого підігрівання та кування [117].

В залежності від розміра діаметра отвору конусної втулки, далі вона розкочується до потрібного діаметру на дорні. Заготовка розкочується на дорні до діаметра заготовки, який відповідає діаметру бурта. Далі заготовка одягається на конусну оправку, засікається певна довжина виступа. Далі протягується уступ від засічки бурта до протилежного краю. Далі отримана заготовка направляється у піч для підігрівання.

Нагріта ступінчаста заготовка після нагрівання укладається на дорн та кується за обраною схемою. Розкочування проводиться ступінчастим бойком. Коли є потреба використовувати 2 спосіб, то розкочування здійснюється до ступеня обтискання уступа до 20%. Далі заготовка направляється у піч і підігрівається до 1000°C, щоб запобігти рекристалізацію, а відповідно та збільшення розмірів зерен [118].

Для схеми при якій спочатку розкочується борт заготовки з відносними діаметрами борта $D_b/d_0 \leq 2,6$ та уступу $D_y/d_0 \leq 1,8$ відповідно, відбувається утворення різновисочинності уступу до його розкочування. Це може призвести до збільшення довжини цієї ділянки. Це можна пояснити тим, що при обтисканні борта діаметр отвору зростає з боку борта і заготовка набуває конусної форми. В результаті, слід спочатку проводити обтискання уступу заготовки бойком із висотою сходинки більше на 10...20%, ніж сходинка на поковці. Остаточне розкочування буде проводитися бойком, який має висоту сходинки, яка відповідає висоті поковки [119].

5.2 Складання виробничого техпроцесу кування конусних втулок

Новий технологічний процес кування конусної втулки розроблений для патрубків реактору (рис. 5.1), вага якої складає 35 т. Деталь умовно можна розділити на 3 основних елемента уступу, конусна ділянка і борт. Подальшим етапом є встановлення геометричних параметрів заготовки перед розкочуванням. Для цього слід скористатися регресійною моделлю, яка була встановлена на базі експериментальних даних. Вихідними даними для проектування заготовки – це розміри остаточної поковки. При розрахунку розмірів заготовки перед розкочуванням слід користуватися законом сталості об'ємів заготовки до та після деформування, а також враховувати внутрішній діаметр заготовки та ступінь обтискання. Ступінь обтискання сильно впливає на формоутворення тому, що від нього залежить утворення конусності через відмінність у товщинах уступу і борта. Тому слід задати внутрішній діаметр заготовки борта і кут конусності раструба. Задля встановлення розмірів заготовки перед розкочуванням слід скористатися рівняннями регресії [120].

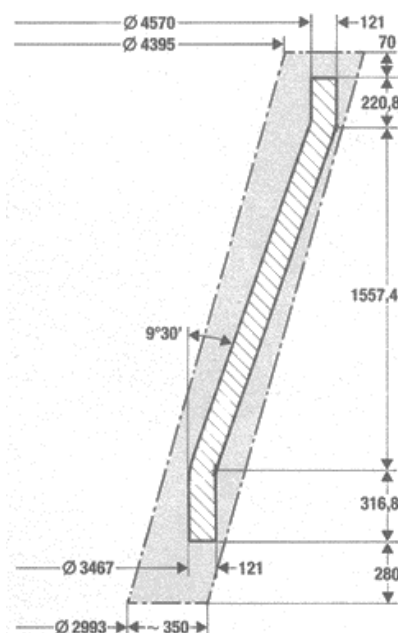


Рисунок 5.1 – Креслення конусної втулки (раструба)

Після встановлення розмірів заготовки слід забезпечити потрібне співвідношення між діаметрами. Це співвідношення повинно бути $0,4 \dots 0,45$, щоб утворювалася конусна поковка зі збільшеним діаметром з боку бурта чи уступу. Інакше буде виготовлятися поковка циліндричної форми. Задля уточнення конфігурації поковки слід використовувати регресійні залежності значення конусності. У цьому разі орієнтуватися слід на ступінь обтискання бурта.

Протягування пустотілої заготовки перед розкочуванням слід проводити вирізними ромбічними бойками. Перед дослідженнями на сталевих поковках були проведені експерименти моделях зі свинця. Це дозволило встановити, що протягування комбінованими бойками призводить до утворення різнотовщинності з боку бурта та уступа й утворення неспіввісності між цим ділянками. Використання для протягування ступінчастої заготовки вирізними ромбічними бойками дозволило виключити появу різнотовщинності. Протягування на конусній оправці проводиться у напрямок до бурта оправки, що призводить до утворення зазору між

поковкою та конусною оправкою, що зпростує зняття поковки з оправки [121].

У виробничих умовах осадження слід проводити увігнутою сферичною плитою для компенсації утяжки металу. Залишки металу слід зрізати газовим пальником, щоб при розкочуванні не виникали затиски. Отвори слід виконувати пустотілим прошивнем.

Для кування конусної втулки з буртом за новим технологічним процесом потрібно використовувати звичайний ковальський зливоч. Кування східчастим бойком проводиться з деформування бурта поковки. Для розкочування потрібно задіяти східчастий боек, в якого висота сходинки дорівнює висоті уступу на поковці. Ця різниця висот бурта на заготовці та на кінцевій поковці до початку розкочування між буртом та бойком зявиться зазор. При розкочуванні бурта його діаметр буде зростати і відповідно буде утворюватися конусність. При зменшені висоти бурта буде обтискатися уступ. Таким чином можна визначати яка конусність потрібна позитивна, чи від'ємна [122].

Протягування слід проводити малими обтисканнями і відслідковувати діаметр отвору з боку бурта й уступу. В наслідок інтенсивного збільшення діаметра отвору з боку уступу буде з'являтися конусність зворотнього знаку тій, яка з'явилася на початковому етапі процесу деформування при обтисканні бурта [123]. Розроблений технологічний процес кування призводить до економії металу. Традиційно ці деталі виготовляють з накриванням напуском уступу поковки, який виготовляється механічною обробкою. Нова технологія кування конусної втулки дозволила знизити собівартість виготовлення на 20-25% в умовах виробництва ПрАТ «Енергомашспецсталь», що підтверджено актом впровадження (Додаток В).

Фото кування східчатої заготовки перед розкочуванням конусної втулки представлено на рисунку 5.2.



а)



б)

Рисунок 5.2 - Фото кування східчатої заготовки: а – початок; б - завершення

5.3 Дослідження властивостей конусної втулки, яка виготовлена за новою технологією

Основна технологічна схема виробництва конусних втулок включала виплавку металу в електродуговій печі, вторинну обробку металу, вакуумне лиття ковальського злитка, кування заготовки на автоматизованому ковальсько-кувальному комплексі 150МН та попередню термічну обробку. Основна термічна обробка отриманої заготовки була проведена в шахтній печі ПрАТ «Енергомашспецсталь». Хімічний склад сталі 15Х2НМФА повністю відповідає зазначеному (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Хімічний склад металу злитка сталі 15Х2НМФА

Масова частка хімічних елементів, %									
C	Mn	P	S	Si	Ni	Mo	Cr	Cu	V
0,21	0,46	0,004	0,003	2,07	1,16	0,68	0,28	0,05	0,10

Виробництво конусної заготовки включало в себе наступні операції: кування цапфи з нижньої і прибуткової частин злитка, білетування, осадження, проколювання отвору, протягування на оправці, попереднє протягування на ступінчастий профіль, розкочування до розмірів поковки. Кування здійснювалося за допомогою східчастого розкочувального бойка.

Далі заготовка пройшла попередню термічну обробку в сучасній газовій термічній печі за режимом, що складається з витримки при температурі 600÷650°C і відпустки при температурі 640÷680°C.

Після проведення основної термічної обробки і контролю геометрії від заготовки конусної втулки були відокремлені випробувальні кільця для приймально-здавальних випробувань і додаткових досліджень. З огляду на значну висоту конусної заготовки було підібрано два випробувальних кільця

- з боку прибуткової частини і з боку нижньої частини. Ці зразки були взяті на всю товщину заготовки і нарізані на шаблони:

- один для випробування в стані після основної термічної обробки;
- дві під кутом по периметру 180° для випробування в стані після основної термічної обробки;
- дві під кутом 180° по периметру - для випробування в стані після основної термічної обробки.

Зразки для механічних випробувань розташовувалися в середній третині товщини заготовки в тангенціальному напрямку. Були виконані наступні види випробувань і контроль якості конусної заготовки:

- визначення хімічного складу від виплавки;
- статичні випробування на розтяг при температурах випробувань $+20$ і $+350^\circ\text{C}$ з визначенням тимчасового опору (R_m), умовної межі текучості ($R_{p0,2}$), відносного подовження (A), відносного стиснення (Z);
- випробування на ударний вигин з визначенням критичної температури крихкості;
- контроль забруднення неметалевими включеннями з боку прибуткової частини заготовки;
- контроль макроструктури заготовки;
- ультразвуковий контроль в 100% об'єму.

Результати випробувань механічних властивостей конусної заготовки в стані після основної термічної обробки і відпустки мінімальної і максимальної тривалості повністю відповідають вимогам (табл. 5.2). Забезпечується високий комплекс всіх механічних властивостей з першого пред'явлення і рівномірність міцнісних і пластичних характеристик по висоті і периметру заготовки.

Контроль макроструктури проводився після травлення 15% розчином персірчанокиислого амонію на дві ділянки з боку прибуткової частини заготовки, розташованих під кутом 180° . Макроструктура досліджуваних

ділянок відповідає вимогам, тріщин, розшарувань, флокенів та усадочних отворів не виявлено.

Ультразвуковий контроль конусної заготовки проводили з чутливістю $S_0 = 3,8\text{мм}^2$. Результати ультразвукового контролю заготовки відповідають вимогам, зафіксованих показань не виявлено.

Таблиця 5.2 - Механічні властивості конусної заготовки

Зразок марк ера	Тепло вий стан зразка	Місцезнаход ження зразка по висоті	T=20°C				T= +350°C				Задано
			Rm	Rp0,2	A	Z	Rm	Rp0,2	A	Z	
			МПа		%		МПа		%		
1П	Головний	з боку прибуткової частини	740	650	21,5	75,0	630	550	16,0	75,0	
			740	640	21,5	75,0	640	550	15,0	74,0	
1D		з нижньої частини	720	620	24,0	79,0	610	530	15,0	75,0	
			710	610	24,0	79,0	610	520	17,0	78,0	
Вимога ТУ			≥ 610	≥ 490	≥ 15,0	≥ 55,0	≥ 540	≥ 440	≥ 14	≥ 50	≤ -45
2П	+ основний мінімальний цикл	з боку прибуткової частини	700	600	24,0	79,0	590	520	17,5	74,0	-75
			710	600	23,5	79,0	590	520	19,0	76,0	
4П			700	600	26,0	79,0	590	520	18,5	76,0	
			700	600	24,5	79,0	590	520	19,5	75,0	
2D		з нижньої частини	680	580	24,0	78,0	570	495	18,5	77,0	-65
			680	580	24,0	80,0	570	495	17,5	75,0	
4D			690	580	25,0	80,0	580	500	18,0	77,0	
			680	580	25,0	80,0	580	495	18,5	77,0	

В результаті приймально-здавальних випробувань і контролю встановлено, що заготівля зі сталі 15X2НМФА повністю відповідає вимогам групи V і креслення деталі. Підтверджено можливість забезпечення заданого набору властивостей і високого рівня якості металу великогабаритної конусної заготовки.

5.3.1 Дослідження макроструктури і сірчаного відбитка

Дослідження макроструктури проводили безпосередньо на металі конусної поковки після основної термічної та механічної обробки.

Макроструктура оцінювалася на 4-х ділянках з донного та прибуткового торця під кутом 90°. При візуальному огляді зазначених ділянок тріщин, розшарування, флоків та усадкових раковин не виявлено.

Характер розподілу сірки оцінювався за допомогою сірчаних відбитків методом Баумана на вищезгаданих ділянках. Сірчані відбитки досліджуваних ділянок з боку прибуткової та донної частини поковки практично не відрізнялися і мали рівномірне світлофон. Сульфідних включень не виявлено. Таким чином, по результатам проведених досліджень встановлено:

- 1) Макроструктура металу обичайки відповідає вимогам ТУ та не має жодних індикацій;
- 2) Слабка інтенсивність забарвлення сірчаних відбитків свідчить про низький рівень вмісту сірки у металі конусної втулки, що було підтверджено результатами її хімічного аналізу.

5.3.2 Дослідження забрудненості неметалевими включеннями

Дослідження забрудненості неметалевими включеннями металу конусної поковки проводилося металографічним способом після основної термообробки в наступних зонах:

- на зразках, відібраних із середньої третини за товщиною з боку прибуткової частини (П);
- безпосередньо на металі поковки конусної втулки на прибутковому (П) і донному (Д) торці в середній третині товщини і ½ висоти з боку зовнішньої і внутрішньої поверхні.

При аналізі отриманих результатів встановлено наступне:

- 1) За рівнем забрудненості метал відповідає вимогам ТУ (таблиця 5.3).
- 2) Рівень забрудненості неметалевими включеннями металу заготовки після відрізки пробних кілець та механічної обробки - невисокий у всіх досліджуваних зонах і не перевищує допустимого.

3) Основним типом включень з боку прибуткової та донної частин поковки конусної обічайки є силікати, що не деформуються (СН) і силікати крихкі (СК).

Таблиця 5.3 - Результати оцінки забрудненості неметалевими включеннями металу конусної поковки із сталі 15Х2НМФА

Місце розташування зразка/ділянки для дослідження		оксиди		силікати		сульфіди
		ОС	ОТ	СН	СК	С
<i>Вимоги</i>		<i>не більше</i>				
		2,5	2,5	3,5	3,5	2,5
Здавальні випробування в обсязі вимог ТУ (на зразках)						
$\frac{1}{3}$ товщини	П	0	1,0	3,2	0	1,8
Додаткові випробування, виконані на поверхні поковки						
$\frac{1}{3}$ товщини	торець П	0	0	1,2	2,0	0
	торець Д	0	1,0	2,1	3,1	0
$\frac{1}{2}$ висоти	зовнішня поверхня	0	0	2,2	2,0	0
	внутрішня поверхня	0	0	1,5	1,0	0

5.3.3 Дослідження мікроструктури

Дослідження мікроструктури металу конусної заготовки зі сталі 15Х2НМФА у стані після основної термообробки проводилося у наступному обсязі:

- на зразках у п'яти зонах за товщиною поковки з боку прибуткової та донної частини;
- безпосередньо на зовнішній і внутрішній поверхні в $\frac{1}{2}$ висоти поковки.

Дослідження мікроструктури та визначення розміру зерна проводилося на мікрошліфах після травлення в 4% розчині азотної кислоти в спирті. У результаті дослідження встановлено наступне:

Структура металу у всіх досліджуваних зонах обічайки однорідна сорбітоподібна (відпущений бейніт). Структурно-вільного фериту не

виявлено, що свідчить про повне прогартування поковки в товщині стінки поковки (рис. 5.3).

Величина зерна не перевищує G_7 . У металі поковки відсутня різнозернистість. Дрібнозерниста однорідна структура свідчить про достатній рівень гарячої деформації в процесі кування, хорошу підготовку структури в процесі попередньої термообробки та якісно виконану основну термообробку поковки, що має сприяти отриманню високого комплексу механічних властивостей [124].

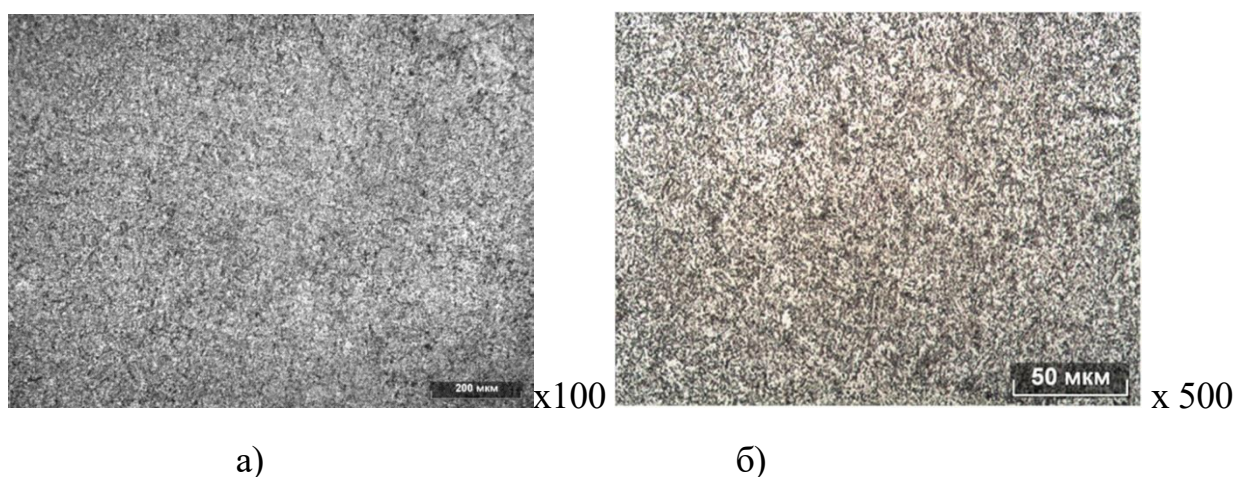


Рисунок 5.3 - Мікроструктура металу конусної втулки у стані після основної термічної обробки: а), б) при різних збільшеннях

5.3.4 Дослідження однорідності механічних властивостей

Дослідження однорідності механічних властивостей за висотою конусної втулки виконувалося на металі проб у наступних термічних станах:

- після основний термічною обробки;
- після відпустки мінімальної тривалості: $620^{\circ}\text{C} - 8,0 \div 9,0 \text{ год} + 650^{\circ}\text{C} - 8,0 \div 9,0 \text{ год}$.

Аналіз отриманих результатів показав наступне:

- 1) Механічні властивості металу поковки повністю задовольняють

вимогам ТУ та креслення.

2) Максимальна величина розкиду характеристик міцності при температурі випробувань 20°C та 350°C не перевищує 30МПа для кожного термічного стану, що для такої великогабаритної обичайки є показником однорідності механічних властивостей (рис. 5.4, а).

3) Значення характеристик пластичності з боку прибуткової та донної частини поковки після термообробки, а також після відпуску мінімальної тривалості знаходяться приблизно на одному рівні, що також підтверджує однорідність механічних властивостей.

Аналіз отриманих результатів визначення критичної температури крихкості наведено в таблиці 5.4. Встановлено, що метал поковки має низьку схильність до крихкої руйнації: $T_{ко} = -65 \div -85^{\circ}\text{C}$ (при вимоги креслення не вище мінус 45°C) та $T_{к} = -85 \div -95^{\circ}\text{C}$. Величина розкиду значень $T_{ко}$ з боку прибуткової та донної частини не перевищує 20°C , значень $T_{к}$ - 10°C .

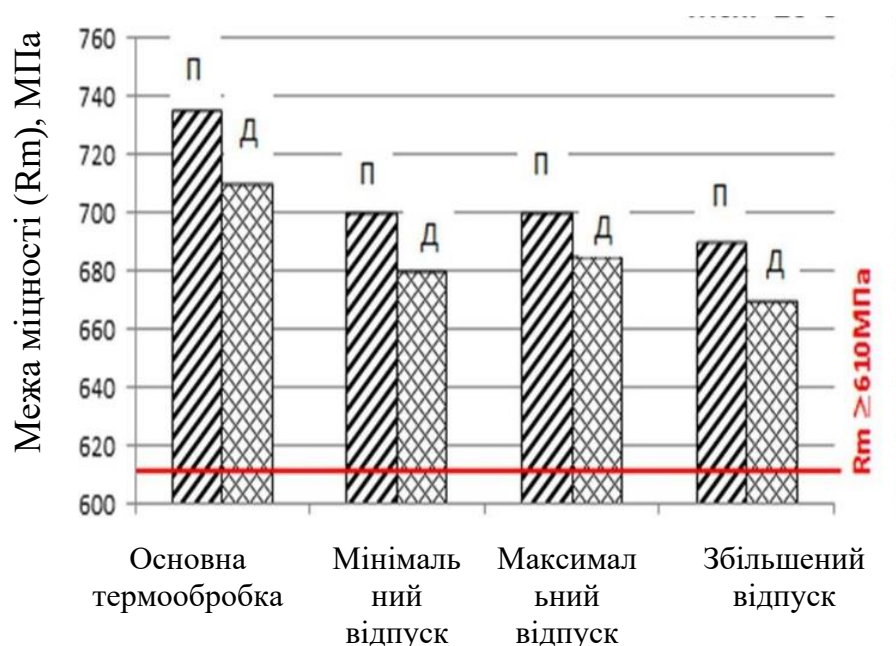


Рисунок 5.4 - Розподіл значень межі міцності по висоті конусної втулки у різних термічних станах

Таким чином, отримані дані свідчить про високу однорідність механічних властивостей металу за висотою конусної поковки.

Таблиця 5.4 - Результати значень критичної температури крихкості металу конусної поковки

Термічний стан	Розташування зразків для	Характеристика / методика	
		Т _{ко} ,°С	Т _к , °С
Після основний термообробки і відпустки мінімальної тривалості 620°С - 8,0 ÷ 9,0 год + 650°С – 8,0÷9,0година	З боку прибуткової частини (2 проби під кутом 180° по периметру поковки)	- 75	- 85
		- 75	
	З боку донної частини (2 проби під кутом 180° по периметру поковки)	- 65	- 85
		- 85	
Вимога креслення		≤ - 45	-

Дослідження однорідності механічних властивостей по товщині конусної поковки виконувалося на пробах з боку її прибуткової та донної частини в стані після основної термообробки та відпустки мінімальної тривалості (620°С, 8,0÷ 5,0 , 8,0÷9,0год). Зразки виготовлялися у тангенціальному напрямку у п'яти зонах за товщиною поковки:

- поблизу зовнішній поверхні;
- в середині зовнішній третини товщини;
- в ½ товщини;
- в середині внутрішньої третини товщини;
- поблизу внутрішньої поверхні.

При аналізі отриманих результатів досліджень встановлено:

1) Механічні властивості відповідають вимогам ТУ та креслення по всій товщині з боку прибуткової та донної частин поковки.

2) Розкид характеристик міцності за товщиною не перевищує 20 МПа і

знаходиться практично на одному рівні як з боку прибуткової, так і донної частини поковки (рисунок 5.5).

3) Критична температура крихкості по товщині з боку прибуткової та донної частин конусної поковки знаходиться в межах $-75^{\circ}\text{C} \div -95^{\circ}\text{C}$, що значно нижче (краще) необхідного за кресленням значення (не вище від -45°C).

4) Найнижчі (кращі) значення $T_{\text{ко}} = -95^{\circ}\text{C}$ отримані в поверхневих шарах поковки з боку як прибуткової, так і її донної частини (рисунок 5.6), що обумовлено швидшим охолодженням поверхневих шарів при загартуванні.

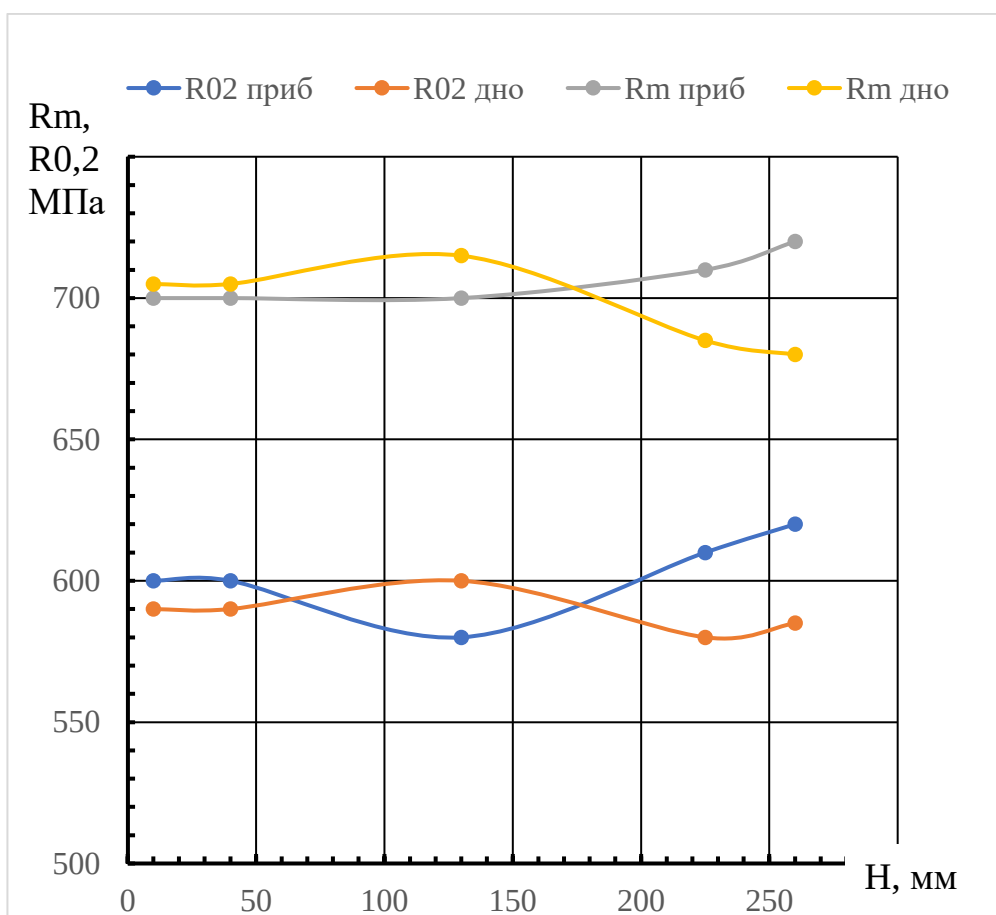


Рисунок 5.5 – Змінення механічних властивостей по товщині стінки поковки

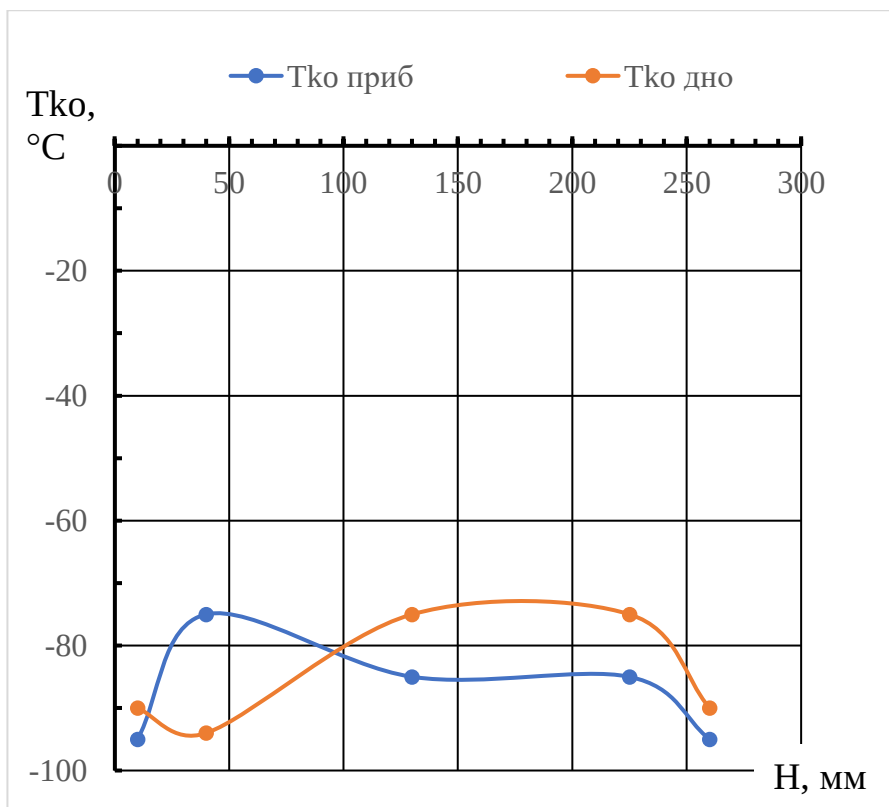


Рисунок 5.6 – Змінення критичної температури крихкості по товщині стінки поковки

5.3.5 Визначення анізотропії механічних властивостей

Дослідження анізотропії механічних властивостей конусної поковки виконувалося на металі проб, відібраних під кутом 180° по периметру з боку прибуткової та донної частини, після відпустки мінімальної тривалості. Зразки для випробувань були вирізані в тангенціальному, поздовжньому та радіальному напрямках щодо осі зливка. Аналіз отриманих результатів випробувань показав наступне:

Механічні властивості, випробувані на зразках у всіх трьох напрямках, відповідають вимогам ТУ та креслення деталі. Розкид значень показників міцності з боку як прибуткової, так і донної частини конусної втулки в залежності від напрямку вирізки зразків не перевищує 20 МПа. Значення міцності перебувають приблизно одному рівні: $690 \div 710$ МПа при $T_{исп} = 20^\circ\text{C}$ $570 \div 590$ МПа при $T_{исп} = +350^\circ\text{C}$.

Таким чином, в результаті досліджень не виявлено анізотропію механічних властивостей металу конусної поковки, що свідчить про добру металургійну якість і добре термомеханічне опрацювання металу поковки.

5.3.6 Визначення твердості металу конусної втулки

Твердість металу по висоті конусної втулки визначалася безпосередньо на зовнішній та внутрішній поверхні під кутом 180° по периметру поковки з кроком 250 мм. Результати вимірів наведено на рисунку 5.7. Встановлено, що твердість з боку донної та прибуткової частин перебуває на одному рівні ($225 \div 237$ HB) і відповідає термоулучшенному стану металу поковки.

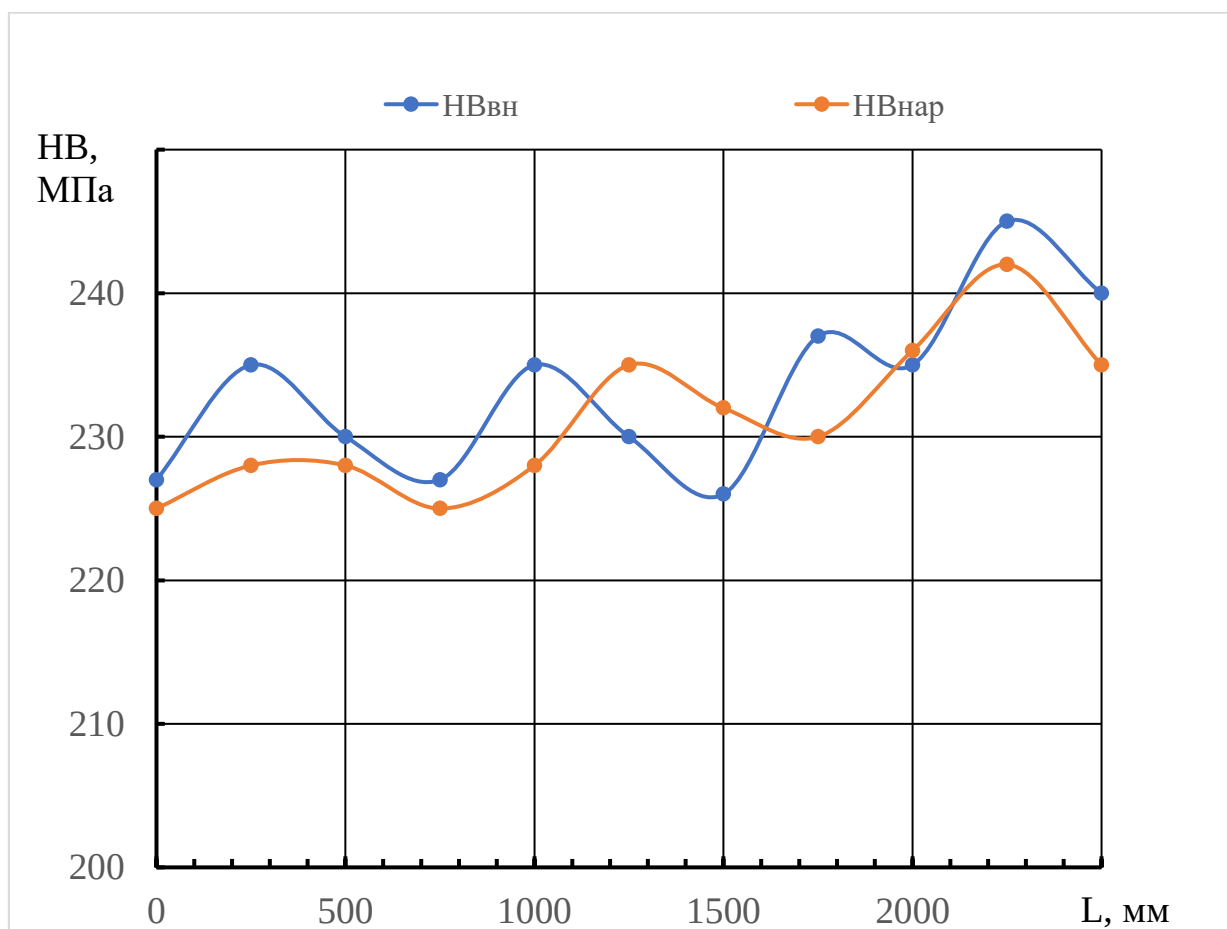


Рисунок 5.7 - Розподіл твердості по довжині конусної поковки, по внутрішній та зовнішній поверхні

5.3.7 Ударна вязкість металу конусної поковки

Визначення стійкості матеріалів до крихких руйнувань має свою специфіку в різних системах стандартів. В області виробництва обладнання для атомної енергетики, однією з характеристик тріщиностійкості, що визначається при приймально-здавальних випробуваннях корпусних матеріалів, є критична температура крихкості $T_{ко}$. У зарубіжних стандартах (американський код ASME, французький стандарт RCC-M) з тією ж метою використовується температура нульової пластичності TNDT і контрольна температура RTNDT. Метод випробування $T_{ко}$ складається з випробування на ударний вигин зразків з гострою насічкою типу Шарпі при ряді температур. Критична температура крихкості - це мінімальна температура, при якій ударна в'язкість перевищує критерій, обраний для кожного матеріалу в залежності від межі плинності. При цьому повинні бути дотримані додаткові умови, а саме: при отемпературі $T_{ко} + 30^{\circ}\text{C}$ значення ударної в'язкості повинна бути не нижче другого критерію, в 1,5 рази вище першого, а кількість в'язкої складової (BC) в зламі має бути не менше 50%. Приклад визначення $T_{ко}$ металу конусної втулки зі сталі 15X2НМФА і загальний вигляд випробуваних зразків наведені в таблиці 5.4 і рисунку 5.8.

Таблиця 5.4 - Результати ударного вигин металу поковки зі сталі 15X2НМФА з визначенням $T_{ко}$

Критерій	$T_{випр} = 25^{\circ}\text{C}$		$T_{випр} = 35^{\circ}\text{C}$		$T_{випр} = 45^{\circ}\text{C}$		$T_{випр} = 55^{\circ}\text{C}$		$T_{випр} = 65^{\circ}\text{C}$		$T_{випр} = 75^{\circ}\text{C}$		$T_{ко}, ^{\circ}\text{C}$
	KCV	BC	KCV	BC	KCV	BC	KCV	BC	KCV	BC	KCV	BC	
	КДж/м ²	%	КДж/м ²	%	КДж/м ²	%	КДж/м ²	%	КДж/м ²	%	КДж/м ²	%	
590 КДж/м ²	3250	100	2280	62	2240	60	1840	37	1120	25	1190	25	
	2440	66	2180	56	2220	60	450	12	1880	37	140	6	-65
	2010	52	2060	50	1140	25	1970	44	1360	27	240	11	



а)



б)

Рисунок 5.8 – Зразки Шарпі зі сталі 15X2НМФА після випробувань на ударний вигин при температурах випробувань $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) і $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)

В результаті вищевказаних випробувань було встановлено, що для заготовок зі сталі 15X2НМФА рівень $T_{\text{ко}}$ становив від мінус 45 до мінус $65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Висновки за розділом 5

1. Випробування та дослідження металу підтвердили хорошу металургійну якість, повне термодформаційне опрацювання на повний переріз та високий комплекс властивостей конусної втулки. Хімічний аналіз, виконаний як на металі зразків, так і безпосередньо на конусній поковки, відповідає вимогам ТУ і підтверджує високу однорідність хімічного складу за товщиною та периметром з боку прибуткової та донної частини поковки. Встановлено, що ліквіація хімічних елементів за висотою та товщиною поковки дуже незначна або відсутня.

2. У металі конусної втулки вміст шкідливих домішок дуже низьке, вміст газів (азоту, кисню і водню) невелика і не перевищує їх звичайне вміст у сталі марки 15Х2НМФА. Рівень забрудненості неметалевими включеннями металу конусної втулки у всіх досліджуваних зонах (після відрізки пробних кілець та механічної обробки) невисокий, суттєво нижчий, ніж у зразках, відібраних з підприбуткової зони, і не перевищує вимог ТУ. Макроструктура конусної втулки відповідає вимогам ТУ та не містить жодних індикацій. Сірчані відбитки підтверджують низький вміст сірки в металі, що досліджується.

3. Мікроструктура металу конусної втулки однорідна сорбітоподібна і представляє собою відпущений бейніт. Структурно-вільного фериту в товщині стінки поковки не виявлено.

4. Механічні властивості металу конусної втулки повністю задовольняють вимогам ТУ та креслення, у тому числі за рівнем $T_{\text{ко}}$ після основної термічної обробки та після мінімальної відпустки. Встановлено високий рівень однорідності механічних властивостей і $T_{\text{ко}}$ металу за висотою та товщиною конусної втулки. Максимальна величина розкиду міцностних характеристик при температурі випробувань 20°C і 350°C не перевищує 30МПа для кожного термічного стану. В результаті дослідження

не виявлено анізотропію механічних властивостей металу конусної втулки, що свідчить про хорошу металургійну якість і хороше термодформаційне опрацювання металу поковки. Твердість з боку донної і прибутковою частин конусної втулки перебуває практично одному рівні ($225 \div 237$ НВ) і відповідає термоулучшенному стану металу.

5. При порівнянні результатів визначення критичної температури крихкості встановлено, що метал конусної втулки має низьку схильність до крихкого руйнування: $T_{ко} = -65 \div -85^{\circ}\text{C}$ (при вимозі креслення не вище мінус 45°C) і $T_{ко} = -85 \div -95^{\circ}\text{C}$. Розмір розкиду значень $T_{ко}$ із боку прибуткової і донної частини вбирається у 20°C , значень $T_{ко} - 10^{\circ}\text{C}$.

ВИСНОВКИ

1. Визначено, що існуючі методи кування пустотілих поковок, таких як ступінчасті обичайки, передбачають використання значної механобробки або складання двох деталей з використанням операції зварювання, що призводить до збільшення металовитрат та зниження якості металу. Пропонується виготовляти конусну заготовку з буртом, що повторює контури деталі, за рахунок використання спеціального деформуючого інструменту зі ступінчастою поверхнею.

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

3. При одночасному розкочуванні ступінчастої заготовки ступінчастим бойком утворюється конусна форма поковки. Причиною утворення конусності є накопичення різного рівня відносної деформації у виступу та уступі при однаковому їх обтисканні. Це стає можливим через те, що товщини стінок ступінчастої заготовки різні, а відповідно буде різний відносний ступінь деформації в тілі заготовки. Деформації в уступі накопичуються більш інтенсивно, ніж у виступі.

4. Визначено, що при розташуванні виступу заготовки з боку більшого діаметра отвору уступ буде мати діаметр менший ніж розкочування без внутрішньої конусності та більшу довжину. Виступ майже не збільшується по довжині та зменшується у діаметрі. Конусність склала 10° .

5. Встановлено, щоб збільшувати конусність залишати додатковий напуск металу, який би стримував у процесі деформування з одного боку. Або призначити додатковий уступ з боку виступу (додатковий технологічний напуск), що спрямо би підвищенню інтенсивності розкочування з боку виступу. При призначенні додаткового напуску з боку виступу конусність

поковки після обтискання на 25% зменшується та становить 0,05. Цей спосіб має обмеження, яке полягає в підвищенні зайвих витрат металу в наслідок додаткового технологічного напуску.

6. Було встановлено, що при розкочуванні заготовки з напуском з боку уступу, діаметр з боку уступу зменшився в порівнянні зі схемою без напуску. Конусність поковки становила 0,04, що менше, ніж при розкочуванні поковки з напуском з боку виступу. За результатами моделювання можна зробити висновок, що при одночасному деформуванні виступу та уступу заготовки поковка буде мати значну конусність (0,16) в наслідок того, що виступ під час розкочування буде зазнавати менший ступінь деформації, ніж уступ. Додатковий напуск збільшеного діаметра з боку уступу призводить до збільшення витрат металу. Додатковий напуск з боку виступу сприяє радіальній течії металу і є дієвим методом для регулювання конусності, за рахунок забезпечення симетричності схеми деформування. Що у кінцевому рахунку зменшує конусність.

7. За результатами дослідження було встановлено, що у процесі розкочування до товщини стінки поковки 345 мм виготовлена поковка буде мати конусність меншу 0,003 у порівнянні зі всіма досліджуваними схемами. При цьому довжина виступу була знижена також на 3,0 %, а уступу на 5,0 %. Рівень деформації в уступі більш високий, що можна пояснити збільшеною товщиною стінки уступу до деформації за рахунок технологічного напуску. Знов таки, максимальні деформації локалізовані у поверхневих шарах з боку виступу.

8. Збільшення висоти сходинки між виступом та уступом за рахунок збільшення діаметра виступу, призводить до утворення зворотної конусності зі збільшенням діаметру з боку виступу. Це пояснюється тим, що в такому випадку ступінь деформування виступу буде більшою, ніж уступу. Така закономірність спостерігається протягом усього процесу розкочування. Короткі по довжині виступи призводять до формування конусності на ступінчастій заготовці зі збільшеним внутрішнім діаметром з боку уступу.

Такі заготовки можна використовувати при виготовленні деталей конусної форми. При збільшенні зовнішнього діаметра виступу відбувається зниження конусності та заготовка за формою близька до циліндричної.

9. Збільшення висоти уступу (D_y/d_0) призводить до підвищення ступеня його обтискання уступу, що призводить до зростання внутрішнього діаметру. Збільшення висоти бурта (D_b/d_0) призводить до підвищення ступеня його обтискання, що призводить до збільшення внутрішнього діаметру з боку бурта. Це чинить вплив на зміну знака та величини конусності при розкочуванні. Зниження різниці висот сходинок призводить до збільшення внутрішнього діаметра з боку уступу, а підвищення різниці – до збільшення внутрішнього діаметру з боку бурта.

10. При обкочуванні заготовок з відносним діаметром $D_y/d_0 = 2$, при збільшенні ступень обтискання ε , підвищується внутрішній діаметр з боку уступу, відношення внутрішніх діаметрів з боку бурта й уступу заготовки зменшується. Це можна пояснити меншим розширенням металу заготовки при деформуванні тонкої стінки, а відповідно підвищенням течії металу у бік збільшення діаметра заготовки. Збільшення конусності здійснюється при зниженні діаметра бурта заготовки. Розкочування східчастих заготовок з діаметром уступу $D_y/d_0 = 2$ забезпечує формування конусності там, де розташований уступ.

11. Обкочування заготовок із діаметром уступу $D_y/d_0 = 1,8$, при підвищенні ступень обтискання ε конусність змінюється не лінійно. Для відносного бурта $D_b/d_0 = 2,6$ та $2,5$, при обтисканні бурта конусність збільшується. Змінення конусності проходить у процесі одночасного обкочування бурта й уступу. На першому етапі конусність знижується, а подальше обкочування призводить до збільшення конусності тільки з іншим знаком.

12. При обкочуванні заготовок із діаметром уступу $D_y/d_0 = 1,6$, при підвищенні ступеня обтискання ε підвищується відносний внутрішній діаметр з боку бурта, відносний внутрішній діаметр бурта й уступа збільшується.

13. Після проведення досліджень на зразках зі свинця та сталі встановлено, що основним фактором, що чинить вагомий вплив на керування плином металу заготовки у діаметральному напрямку є висота виступа, який повинен знаходитися у межах $0,4 \dots 0,45$. В результаті поковки будуть мати циліндричну форму.

14. На основі методів планування експерименту були встановлені рівняння регресії, що можуть бути використані як математичні моделі для визначення геометричних розмірів поковки. Ці моделі дають прийнятний результат у межах ступеня обтискання $0,1 \dots 0,3$ для співвідношення довжини бурта до довжини поковки $L_e/L = 0,4 \dots 0,5$.

15. Аналіз мікроструктури дозволив визначити, що попереднє протягування та остаточне розкочування ступінчастої заготовки східчастим бойком призводить до того, що волокна поковки співпадають з контуром виробу, що підвищує механічні властивостей деталей відповідального призначення. Твердість в уступі підвисилась на 4-6 одиниці по шкалі HRB, ніж для базового технологічного процесу. Це свідчить про додаткову проробку структури металу у процесі розкочування східчастим бойком.

16. Розроблені рекомендації й методика для проектування техпроцесу розкочування кільця з буртом, що базуються на рівняннях регресії задля встановлення розмірів ступінчастої заготовки перед остаточним обкочуванням, що дозволили зменшити витрати металу. Виявлені базові дефекти форми, що притаманні процесу обкочування східчастим деформуючим інструментом, та встановлені рекомендації їх запобігання. Ці рекомендації стосуються збільшені нахилу переходу між буртом й уступом до 25° .

18. Встановлені та впроваджені на виробництві технологічні рекомендації задля виробництва ступінчастих кільцевих поковок на ПрАТ

«ЕМСС». Впровадження розробленого технологічного процесу внаслідок зниження величини припуску призводить до суттєвої економії металу. Можливість виготовляти поковку по контуру деталі дозволило знизити собівартість кування крупногабаритних кілець з буртом на 15...20% в умовах заводу «ЕМСС».

19. Випробування та дослідження металу підтвердили хорошу металургійну якість, повне термодформаційне опрацювання на повний переріз та високий комплекс властивостей конусної втулки. Хімічний аналіз, виконаний як на металі зразків, так і безпосередньо на конусній поковки, відповідає вимогам ТУ і підтверджує високу однорідність хімічного складу за товщиною та периметром з боку прибуткової та донної частини поковки. Встановлено, що ліквіація хімічних елементів за висотою та товщиною поковки дуже незначна або відсутня.

20. Макроструктура конусної втулки відповідає вимогам ТУ та не містить жодних індикацій. Сірчані відбитки підтверджують низький вміст сірки в металі, що досліджується. Мікроструктура металу конусної втулки однорідна сорбітоподібна і представляє собою відпущений бейніт. Структурно-вільного фериту в товщині стінки поковки не виявлено.

21. Механічні властивості металу конусної втулки повністю задовольняють вимогам ТУ та креслення, у тому числі за рівнем $T_{\text{ко}}$ після основної термічної обробки та після мінімальної відпустки. Встановлено високий рівень однорідності механічних властивостей і $T_{\text{ко}}$ металу за висотою та товщиною конусної втулки. Максимальна величина розкиду міцностних характеристик при температурі випробувань 20°C і 350°C не перевищує 30 МПа для кожного термічного стану. В результаті дослідження не виявлено анізотропію механічних властивостей металу конусної втулки, що свідчить про хорошу металургійну якість і хороше термодформаційне опрацювання металу поковки. Твердість з боку донної і прибутковою частин конусної втулки перебуває практично одному рівні (225÷237 НВ) і відповідає термоулучшенному стану металу.

22. При порівнянні результатів визначення критичної температури крихкості встановлено, що метал конусної втулки має низьку схильність до крихкого руйнування: $T_{ко} = -65 \div -85^{\circ}\text{C}$ (при вимозі креслення не вище мінус 45°C) і $T_{ко} = -85 \div -95^{\circ}\text{C}$. Розмір розкиду значень $T_{ко}$ із боку прибуткової і донної частини вбирається у 20°C , значень $T_{ко}$ - 10°C .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kowalski J. Experimental investigation of the strain state in the ringforging process / J. Kowalski, B. Hoderny // *Journal of Mechanical Working Technology*. – 1987. – №14 – Pp. 309-324
2. Солонцов С.С. Формоизменение кольцевых заготовок при горячей раскатке поковок с тавровым профилем поперечного сечения / С. С. Солонцов, М. Я. Альшиц // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1970. - № 2. - С. 1-4
3. А. с. 946763 МКИ В 21 J 1/04. Способ изготовления полых поковок / С.А. Балуюев, Н.И. Лаун, В.М. Кулабухов (СССР). – № 3210038; заявл. 01.12.80; опубл. 30.07.1982, Бюл. №28
4. Балуюев С.А. Изготовление поковок втулок ПЖТ из полрой литой заготовки / С. А. Баолуев, С. С. Львова, Е. Л. Линденбаум // *Кузнечноштамповочное производство*. – 1986. - №11 - С. 27 - 28
5. Опыт изготовления крупногабаритных конических обечаек ковкой / В. Д. Арефьев, А. В. Пакало, Г. С. Рябцев [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство*. - 1985. - №1. - С. 10-12.
6. А. с. 1006032 МКИ В 21 К 1/38. Способ изготовления полых конических поковок / И. П. Шелаев, В. О. Кононенко, Л. Ф. Дикий, И. Б. КучерукКучеренко, Н.И. Лаун (СССР) – № 3366330; заявл. 16.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11 495
7. Lianggang Guo Towards a steady forming condition for radial–axial ring rolling / Lianggang Guo, He Yang // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2011. – Vol. 53 – pp. 286–299.
8. А. с. 871942 МКИ В 21 Н 1/06. Инструмент для раскатки колец / В. Д. Арефьев, Э.Л. Рогожин, И.Н. Лебедьинскийи, Е.П. Субботин (СССР). – № 2880769; заявл. 06.02.1980; опубл. 15.10.1981, Бюл. № 38.

9. А. с. 604615 МКИ В21К1/38. Устройство для кузнечной раскатки полых поковок / Н. П. Шляхин, А. А. Мишулин, Б. А. Деревянко, А. И. Русанов (СССР). – № 2322151; заявл. 11.02.1976; опубл. 30.04.1978, Бюл. № 16
10. А. с. 1189559 МКИ В 21 J 1/04. Способ изготовления полых цилиндрических изделий / Г. А. Шутков, В. Г. Зорин, Н. П. Шляхин, А. М. Кузьменко, Б. А. Деревянко, В. Д. Полянский (СССР). – № 3706487; заявл. 06.01.1984 ; опубл. 07.11.1985 , Бюл. № 41
11. Banaszek G. Numerical analysis of the torsion stretch forging operation 488 in asymmetric anvils / G. Banaszek, S. Berski, H. Dyja / Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – №7. - pp. 98–101
12. Пат. 90962 Україна, МПК В 21 К1/28. Спосіб кування дисків з усту пами / Чухліб В.Л., Ашкелянєць А.В. заявник та власник Національна мета лургійна академія України, Дніпропетровськ. - № а200814963; заявл. 10.07.09.; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.
13. Youn S. S. Aluminium powder forging process using a rotating platen / S. S. Youn, J.H. Park, C.W. Park // Institute of Materials Engineering Australasia. – 2004 - № 28 - pp. 212-21
14. Kowalski J. Experimental investigation of the strain state in the ring forging process / J. Kowalski, B. Hoderny //Journal of Mechanical Working Technology. – 1987. – №14 – pp. 309-324
15. Recent Progress of Large and Integrated Forgings for Nuclear Power Plants / H.Tsukada, K. Suzuki, M. Shimazaki, I. Sato // The 3rd JSME: ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, 23–27 April 1995. – Kyoto. – 1995. – pp. 439-444.
16. Lianggang Guo Towards a steady forming condition for radial–axial ring rolling / Lianggang Guo, He Yang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2011. – Vol. 53 – pp. 286–299

17. Ghaci A. Study of the effects of die geometry on deformation in the radial forging process / A. Ghaci, M.R. Movahhedy, A. Karimi Taheri // Journal of material processes technology. – 2005. - №170 – pp. 156-163
18. Manufacturing processes and properties of nuclear RPV shell ring forged from hollow ingot / Ohashi Nobuo, Enami Teilchi, Wanaka Hiroshige, Sao Keruo // Nuclear engineering and design. – 1984. - №81 – pp.193-205
19. Comperison of mechanical and metallurgical properties of hollo and sol id forged products / A. Taherizadeh, A. Najafizadeh, R. Shateri , J.J. Sonas // Fournal of materials processing technology. - 2006. - №178 – pp. 181-187.
20. Hamzah Ssemakula A study of pore closure in the manufacturing of heavy rings / Hamzah Ssemakula, Ulf Stahlberg // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 84 - pp. 25-37
21. Дослідження впливу осадки і протяжки на механічні властивості та структуру поковок / В. Л. Чухліб, В. О. Гринкевич, А. В. Ашкелянec, Д. С. Олійник, А. І. Старосек // Вісник Національного технічного університету “ХПІ” : зб. наук. пр. / НТУ “ХПІ”. – Харків, 2013. – № 42. – С. 205–209.
22. Askelianets A. Analysis of theoretic research of the ring tapered tool penetration with subsequent upsetting in the lining ring while manufacturing a disc with shoulder / A. Askelianets // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 4. – С. 70–75.
23. Wu, Y. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process / Yunjian Wu, Xianghuai Dong, Qiong Yu // International Journal of Mechanical Sciences. – 93 (2015). – P. 102–110.
24. Sizek, H. W. Radial Forging / H. W. Sizek // Metalworking : Bulk Forming. – 2005. – С. 172–178.
25. Ghaei, A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel / A. Ghaei, M. R. Movahhedy, A. Karimi Taheri // Materials & Design. – 2008. – № 29. – P. 867–872.

26. Fan, L. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes / Lixia Fan, Zhigang Wang, He Wang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 16 (2014). – P. 329–334.

27. Пат. 106713 Україна, МПК В 21 К 1/00. Пристрій для розкочування пустотілих виробів на гідравлічному пресі / П. П. Кальченко, О. Є. Марков, Н. О. Руденко, П. І. Різак; заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201508935; заявл. 16.09.2015; опубл. 10.05.2016, бюл. № 9. – 3 с.

28. Rotary swaging forming process of tube workpieces / Qi Zhang, Kaiqiang Jin, Dong mu, Pengju Ma, Jie Tian // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 1924 October 2014. – Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – *Procedia Engineering*. – 81 (2014). – P. 2336–2341.

29. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / M. Sanjari, P. Saidi, A. Karimi Taheri, M. HosseinZadeh // *Materials and Design*. – 38 (2012). – P. 147–153.

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

31. Розов, Ю. Г. Аналіз технології виготовлення трубчатих виробів із сталі 20Х17Н2 гідропресуванням на гладкій оправці / Ю. Г. Розов, В. В. Піманов, Д. Б. Шкарлута // *Вісник НТУУ «КПІ»*. – 2012. – № 64. – С. 234–238.

32. Latest Development in Railway Axle and ThickWalled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX / Frederik Knauf, PaulJosef Nieschwitz, Albrecht Holl, Hans Pelster, Rolf Vest // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P. 215–220

33. А. с. 175644 ЧССР, МПК В 21 J 5/00, В21К21/32. Способ производства кольцеобразной поковки фасонного профиля / И. Эльфман,

С. Туронь, С. Бурда [и др.] (ЧССР) – № 477/8–7; заявл. 02.07.1973 ; опубл. 28.08.1976, Бюл. № 25. – 2 с.

34. Comparison of radial forging between the two and threesplit dies of a thinwalled copper tube during tube sinking / Yong Li, Jinlong Huang, Guangwen Huang, Wei Wang, Jucong Chen, Zhixin Zeng // *Materials and Design* 56 (2014). – P 822–832.

35. Pantalé, O. Influence of the Constitutive Flow Law in FEM Simulation of the Radial Forging Process / Olivier Pantalé, Babacar Gueye // *Journal of Engineering*, Volume 2013, Article ID 231847, 8 pages.

36. Kowalski, J. Experimental Investigation Of The Strain State In The RingForging Process / J. Kowalski, B. Hoderny // *Journal of Mechanical Working Technology*, 14 (1987). – P 309–324.

37. Forging of Heavy Products for Nuclear Fuel Containers / Anthony Pastore, Evelyne Guyot, Jonathan Dairon, Mickael Lemoine // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P 244247.

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

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

40. Ameli, A. A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process / A. Ameli, M. R. Movahhedy // *Int J Adv Manuf Technol*. – № 33 (2007). – P 7–17.

41. A conical mandrel to assess failure criteria / C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez // JMPT. – 214 (2014). – P. 347–357.
42. A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria / C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez // Journal of Materials Processing Technology. – 214 (2014). – P. 347–357.
43. Khayatzadeh, S. A Simulation of Hollow Radial Forging Using 3DFEM Method / S. Khayatzadeh, M. Poursina, H. Golestanian // Int J Mater Form (2008) Suppl 1: 371–374.
44. Multiobjective optimization of die geometry in ingot forging / Peter Christiansen, Paulo A. F. Martins, Niels Bay, Jesper Henri Hattel // Proceeding 11th International Conference // Procedia Engineering 81 (2014). – P. 2457–2462.
45. The effect of strain nickel base super alloy / Buckingham R. C., Argyrakis C., Hardy M. C., Biroasca S. // Materials Science & Engineering. – A654 (2016). – P. 317–328.
46. Розробка автоматизованої методики апроксимації діаграм рекристалізації для вибору термомеханічних режимів кування, що підвищують експлуатаційні властивості поковок валів / В. В. Кухар, О. О. Тузенко, О. Ю. Балалаєва, О. В. Василевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту / ВНТУ. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – № 2. – С. 123–130.
47. Analysis of laminated crack defect in the upsetting process of heavy diskshaped forgings / Minting Wang, Dongying Li, Fan Wang, Xinliang Zang, Xuetong Li, Hong Xiao, Fengshan Du, F. C. Zhang, Zhengyi Jiang // Engineering Failure Analysis. – № 59. – 2016. – P. 197–210.
48. Cracking mechanisms in large size ingots of high nickel content low alloyed steel / Matthieu Bitterlin, Abdelhalim Loucif, Nicolas Charbonnier, Mohammad Jahazi, LouisPhilippe LapierreBoire, JeanBenoit Morin // Engineering Failure Analysis. – № 68. – 2016. – P. 122–131.

49. Dobrzański, L. A. Influence of hotworking conditions on a structure of highmanganese austenitic steels / Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – № 29/2. – 2008. – P. 139–142.
50. Hippenstiel, F. Recent developments in gear steels for use in power generation plants / F. Hippenstiel, K.P. Johann // Forgemasters Meeting, Santander, Spain, (3–7 Nov. 2008). – 2008.
51. Gonzalez J. R. Fem simulation of the new radial forging device process at Sidenor / J. R. Gonzalez, P. F. David, J. Gordon // Proc. 17th IFM 2008, November, 3–7. Santander. Spain. – P. 237–243.
52. Злыгорев В. Н. Совершенствование технологических процессов ковки крупных поковок на основе разработки нового способа осадки четырёхлучевых заготовок : монография / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков. – Краматорск : ДГМА, 2016. – 148 с.
53. Meng, F. Methodology of the shape optimization of forging dies / Meng F., Labergere C., Lafon P. // IJMF. – Vol. 3 (2010). – P. 927–930. ISSN 19606206.
54. Numerical and experimental investigations on the extension of friction and heat transfer models for an improved simulation of hot forging processes / Behrens B. A., Alasti M., Bouguecha A., Hadifi T., Mielke J., Schäfer F. // International Journal of Material Forming.
55. Attia, M. F. Nonlinear analysis of frictional thermoviscouselastic contact problem using FEM / Attia M. F., ElShafei A. G., Mahmoud F. F. // Int. J. Appl. Mechanics. – № 6 (3), 26 pp.
56. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites / Ma Fengcang, Lu Weijie, Qin Jining, Zhang Di, Ji Bo // Mater. and Des. – 2007. – № 28. – C. 1339–1342
57. Modelling of Damage during Hot Forging of Ingots / Christiansen P., Jesper H. Hattel, Niels Bay, Paulo A. F. Martins. // The 5th International Conference, Czech Republic (2013).

58. Baoguang, S. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots / S. Baoguang, K. Xiuhong, L. Dianzhong // J. Materials Processing Technology. – 2010. – № 210. – P. 703–711.

59. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3D void evolution model / Chao Feng, Zhenshan Cui, Mingxiang Liu, Xiaoqing Shang, Dashan Sui, Juan Liu // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – № 237. – P. 371–385.

60. Nakasaki, M. Application of hydrostatic integration parameter for freeforging and rolling / M. Nakasaki, I. Takasu, H. Utsunomiya // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – № 177. – P. 521–524.

61. Physical modeling of the upsetting process in open die press forging / E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch, D. C. Shah // J. Mech. Working Tech. – 1989. – № 19. – P. 195–210.

62. Saby, M. A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming / Michel Saby, PierreOlivier Bouchard, Marc Bernacki // Finite Elements in Analysis and Design. – 2015. – № 105. – P. 63–78.

63. Dudra, S. P. Analysis of void closure in open die forging / Dudra S. P., Im Y. T. // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 1990. – № 30. – P. 65–75.

64. Chen, MingSong. Numerical simulation of large forgings during hot working / MingSong Chen, Y. C. Lin // International Journal of Plasticity. – 2013. – № 49. – P. 53–70.

65. A criterion for void closure in large ingots during hot forging / XiaoXun Zhang, ZhenShan Cui, Wen Chen, Yan Li // JMPT. – 2009. – № 209. – P. 1950–1959.

66. Threedimensional finite element analysis of multistage hot forming of railway wheels / Gangopadhyay T., Ohdar R. K., Pratihara D. K., Basak I. // Int J Adv Manuf Tech. – 2011. – № 53 (14). – P. 301312.

67. Ma Q. Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM / Ma Q, Lin Zq, Yu Zq. // JAMPT. – 2009. – № 40(34). – P. 253260.

68. Fluhner, J. Deform 3D User's Manual Version 6.0 / J. Fluhner // Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, OH (2006).
69. Пат. 86881 Україна, МПК(2013.01) В 21 J 5/00. Спосіб кування пустотілих циліндрів з дном / Марков О. Є., Маркова М. О.; Краматорськ. – № u201309697; заявл. 05.08.13; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1. – 5 с. : іл
70. Влияние угла клиновых бойков 160° на схему напряженного состояния поковки в процес се протяжки / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, П. И. Ризак // Обработка материалов давлением. – 2016. – №2 (43). – С. 51-56.
71. Tolkushkin, A. Development and computer modeling of forgings such as slabs and plates / Tolkushkin A., Panin E., Talmazan V. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 51, 4, 2016. – P. 443–450.
72. Simulation of void defect evolvement during the forging of steel ingot / Chen K., Yang Y. T., Liu K. J., Shao G. J. // Adv Mat Res. – 2010. – 97101:30793084.
73. Современные способы получения тонкостенных деталей ответственного назначения / О. Е. Марков, Шарун А. О. Косилов М. С., Инчаков Е. В. // Обработка материалов давлением. – 2017. – №1 (44). – С. 115–122.
74. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є.Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №80. – С. 85–91.
75. Mathematical modeling of stressdeformed state of metal while flattening of the straddle profiled metal / A. Zavhorodnii, S. Nastoyasha, M. Markova // 14th International Conference RaDMI 2014: Proceedings on CDROM. – Topola, Serbia, 2014. – Vol. 1. – P. 305309.
76. Пат. 116546 Україна, МПК: В21J 5/00. Спосіб виготовлення порожнистих тонкостінних поковок / О. Є. Марков, В. М. Злигорєв, А. О. Шарун, А. В. Коляденко, С. О. Шевцов, Г. О. Овсяннікова.; заявник та

власник ДДМА, Краматорськ. – №u201612412; заявл. 06.12.2016; опубл. 25.05.2017; Бюл. № 10. – 5 с. :іл.

77. Марков О.Є. Удосконалення процесу кування великогабаритних плит за рахунок використанням інтенсивних пластичних деформацій. Теорія та практика обробки матеріалів тиском / Під редакцією: Богуслава В. О., Бобир М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. // Колективна монографія. Запоріжжя: Мотор Січ. 2016. 522с. 386-414.

78. Perig A. V. CFD 2D Description of Local Flow of Polymer Workpiece through a modified U-Shaped Die During Equal Channel Multiple Angular Extrusion / A. V. Perig & N. N. Golodenko // Materials Research – Ibero-american Journal of Materials – 2016. – Vol. 19 – N. 3 – pp. 602-610

79. Пат. 106713, Україна, МПК В 21 К 1/00. Пристрій для розкочування порожнистих виробів на гідравлічному пресі / Кальченко П. П., Марков О.Є., Руденко Н. О., Різак П. І., Краматорськ. - № u201508935; заявл. 27.07.15; опубл. 25.02.16, Бюл. № 4/2016. – 2 с. : іл.

80. Gribkov E. P. Research of energy-power parameters during powder wire flattening / E. P. Gribkov, A. V. Perig // International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2016 – August 2016 – Vol. 85. – Combined Iss. 9-12. – pp. 2887-2900.

81. Пат. 106717 Україна, МПК В 21 J 1 / 04. Спосіб виготовлення порожнистих сферичних поковок / Кальченко П. П., Марков О.Є., Руденко Н. О. Краматорськ. - № u201508943; заявл. 16.09.15; опубл. 10.05.16, Бюл. № 9/2016. – 2 с. : іл.

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

83. Oleg E. Markov, Volodymyr V. Kukhar, Vitalii N. Zlygoriev, Alexander A. Shapoval, Anton S. Khvashchynskyi, Roman U. Zhytnikov

(2020) Improvement of Upsetting Process of Four-Beam Workpieces Based on Computerized and Physical Modeling. FME Transactions Vol. 48, Is. 4, 946-953
<https://doi.org/10.5937/fme2004946M>

84. Computerized and physical modeling of upsetting operation by combined dies / Markov Oleg, Aliiev Igramotdin, Aliieva Leila, Hrudkina Natalia // Journal of chemical technology and metallurgy. 2020. Volume 55. – Issue 3. – P. 640-648. https://dl.uctm.edu/journal/node/j2020-3/23_19-275_p_640-648.pdf. ISSN 1314-7471 (print) ISSN 1314-7978 (on line)

85. Anishchenko, O.S.; Kukhar, V.V.; Artiukh, V.G.; Markov, O.E. & Prysiashnyi, A.G.: Chapter 3: Advanced theory and technology of superplastic forming., 2020, pp. 49–72. ISBN 978-86-6075-069-5.
<https://plus.sr.cobiss.net/opac7/bib/30113545#full>

86. Совершенствование технологических процессовковки крупныхпоковок : монография / Г. М. Скударь, В. М. Олешко, Г. А. Чередник, П. П. Кальченко, О. Е. Марков, Е. Д. Качура. – Краматорск : ДГМА, 2020. – 147 с. ISBN 978-966-379-727-4

87. Алиев И.С., Жбанков Я. Г. Методы расчета процессов горячего пластического деформирования и совершенствование технологийковки крупных поковок. Монография. ООО «Тираж–51». 2020. – 192 с. ISBN 978-966-379-910-0

88. Удосконалення процесу осадження масивних заготовок для виготовлення деталей енергетичного машинобудування / О.Марков, А.Хващинський, В.Панов, П.Різак, Р.Житніков // Технічні науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – № 2 (20). – С.46–52.

89. Марков О.Є., Хващинський А.С., Житніков Р.Ю., Мусорін А.В., Рагузін Є.А. Комп'ютерне моделювання нового процесу кування поковок відповідального призначення // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2020. – №2(121). – С. 129-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.30929/1995-0519.2020.2.129-134>

90. Марков О.Є., Маркова М.О., Житніков Р.Ю., Різак П.І. Дослідження схем кування крупних злитків. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020», випуск 6. – Херсон: ХНТУ, 2020.

91. Марков О.Є., Хващинський А.С., Житніков Р.Ю. Удосконалення процесу осадження масивних заготовок // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2020): матеріали тез доповідей Х МНТК. Чернігів, 29–30 квітня 2020 р.: у 2-х т. : ЧНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 60.

92. Пат. 145120 Україна, МПК (2006) В 21 J5/10. Спосіб прошивання ковальських заготовок / Кальченко А.О., Марков О. Є., Панов В. В., Житніков Р.Ю., Мусорін А.В., Хващинський А.С., Шевченко Н.Г. заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u202003105; заявл. 25.05.2020; опубл. 26.11.2020, бюл. № 22. – 4 с.
<https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1465132>

93. Панов В.В., Марков О.Є., Іванова Ю.О., Мусорін А.В., Степура С.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // Матеріали МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» 13.05.2021–15.05.2021. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. – 111-112

94. Марков О. Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Мусорін А.В. Дослідження та розробка процесу розкочення ступінчастих конусних кілець // Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 26-27 травня 2021 р., Чернігів, НУ «Чернігівська політехніка» – 2021. – Т.1. – С. 56–58

95. Іванова Ю.О., Марков О. Є., Панов В.В., Мусорін А.В. Розробка технологічного процесу кування крупних поковок з мінімальними припусками // Матеріали XII МНТК «Інновації, моделювання, технології в машинобудуванні та металургії», 28-29 жовтня 2021 р., Харків: НТУ ХПІ, 2021. – С. 23–24

96. Марков О. Розробка нового способу деформування злитків на основі кування профільованих заготовок / О.Марков, А.Хващинський, А.Мусорін, М.Маркова, Р.Житніков Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 2(28). С. 7-15. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-7-15](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-7-15)

97. Марков О. Скінчено-елементне дослідження напружено-деформованого стану процесу профілювання циліндричних заготовок / О.Марков, А.Хващинський, А.Мусорін, М.Маркова, А.Лисенко Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 1(27). С. 45-53. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-45-53](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-45-53)

98. Марков О. Є. Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження заготовок з уступами / О. Є. Марков, А. С. Хващинський, А. В. Мусорін, А. А. Лисенко, В. В. Молодецький // Обробка матеріалів тиском. – 2022. – № 1 (51) 61 – 70 с. http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/

99. 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. — № а201809102; заявл. 03.09.2018 опубл. 10.12.2020, Бюл. № 23. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1467678>

100. Kalchenko P. P., Markov O. E., Aliiev I. S., Hrudkina N. S. Progressive technologies of forging large parts. Monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2022. 96 p. ISBN 978-9934-26-231-9 DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-231-9>
<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/270>

101. Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Markov, O., Anishchenko, O., & Prysiazhnyi, A. (2020). Improving of closed die-forging of transport and

marine fasteners "wing nut". Paper presented at the *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 918(1) doi:10.1088/1757-899X/918/1/012096

102. 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. — № а201805234; заявл. 11.05.2018 опубл. 10.08.2020, Бюл. № 15. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1447223>

103. Iaroslav Zhbankov, Leila Aliieva, Khrystyna Malii. Simulation of microstructure changes of steel during the open die forging process // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020. Volume 55. – Issue 3. – P. 523-529. https://dl.uctm.edu/journal/node/j2020-3/4_19-278_p_523-529.pdf

104. Кобєлев О. А., Єфімов М. В., Лобанов О.І., Панов В.В. Перспективні напрямки розвитку заготівельного виробництва енергетичного та важкого машинобудування // *Обробка матеріалів тиском*. – 2012. – № 2 (31) 74 – 78 с.

105. Жбанков Я.Г. Уменьшение неравномерности распределения деформаций при осадке профилированных заготовок / Я.Г. Жбанков, В.В. Панов, О.Е. Марков // Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013». Краматорск, 22-24 травня 2013. – С. 28-30.

106. Кобелев О.А., Марков С.И., Жидков Д.А., Панов В.В., Лобанов А.И., Технологические и материаловедческие перспективы развития реакторов ВВЭР большой мощности. // *Металлург*. – 2014. -№8. – С. 87-91

107. Панов В.В., Марков О.Є., Іванова Ю.О., Мусорін А.В., Степура С.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту»*, 13-15 травня 2021 р., Вінниця, ВПІ – 2021. – с. 111-112

108. Розробка рекомендацій для автоматизованого проектування процесів осадження профільованих заготовок / О. Е. Markov, V. N. Zlygorev, O. V. Gerasimenko, V. V. Panov, R. Yu. Zhytnikov, U. O. Ivanova // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2019. – №2 (86). – С. 47–53.

109. Панов В.В., Марков О.Є., Іванова Ю.О., Степура С.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // *Матеріали МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту»* 13–15 травня 2021. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. – 129-130

110. Удосконалення процесу осадження масивних заготовок для виготовлення деталей енергетичного машинобудування / О.Марков, А.Хващинський, В.Панов, П.Різак, Р.Житніков // *Технічні науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – № 2 (20). – С.46–52*

111. Марков О. Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Мусорін А.В. Дослідження та розробка процесу розкочення ступінчастих конусних кілець // *Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 26-27 травня 2021 р., Чернігів, НУ «Чернігівська політехніка»* – 2021. – Т.1. – С. 56–58

112. Марков О., Панов В., Іванова Ю., Хващинський А., Житніков Р., Косілов М. Удосконалення операції кування великогабаритних пустотілих поковок зі складним профілем. *Технічні науки та технології: науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 1(23). С. 25-36. DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-25-36*

113. Іванова Ю.О., Марков О. Є., Панов В.В., Мусорін А.В. Розробка технологічного процесу кування крупних поковок з мінімальними припусками // *Матеріали XII МНТК «Інновації, моделювання, технології в машинобудуванні та металургії», 28-29 жовтня 2021 р., Харків: НТУ ХП, 2021. – С. 23–24*

114. Марков О.Є., Панов В.В., Косілов М.С., Іванова Ю.О., Коткова В.В. Експериментальне дослідження процесу розкочування конусних обичайок зі складним профілем // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2021. – №2(127). – С. 129-134

115. Марков О. Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Хващинський А.С. Моделювання процесу кування крупногабаритних пустотілих заготовок // Матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», 01-04 червня 2021 р., Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 96–97

116. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець / Марков О.Є., Панов В.В., Іванова Ю.О., Хващинський А.С., Мусорін А.В., Косілов М.С. // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 42. – (Технічні науки). – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2021. – С. 92-99

117. Іванова Ю. О., Панов В. В., Хващинський А. С. Підвищення якості та зниження витрат металу при виробництві крупних поковок // Матеріали XXV міжнародної науково-практичної конференції «Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», 24-26 жовтня 2022 р., Краматорськ, ДДМА – 2022.

118. Скінчено-елементне дослідження напружено-деформованого стану процесу профілювання циліндричних заготовок / Марков О., Мусорін А., Хващинський А., Панов В., Житніков Р., Лисенко А. Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 2(24). С. 9-16.

119. Іванова Ю.О., Марков О.Є., Панов В.В., Мусорін А.В., Ровенський С.Г. Розробка технологічного процесу кування крупних поковок з мінімальними припусками. 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.40-41.

120. 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)

121. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool / O. Markov, M. Kosilov, V. Panov, V. Kukhar, S. Karnaukh, N. Ragulina, P. Bochanov, P. Rizak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6/1(102), p.19–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>

122. Марков О. Є., Шевцов С. А., Алдохін М.Д., Панов В.В., Ровенський С. Г. Дослідження способу обкочування снарядів з трубної заготовки // Обробка матеріалів тиском. – 2024. – № 1 (53) 53 – 58 с.

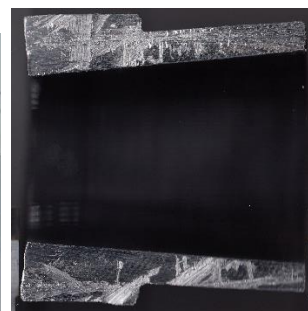
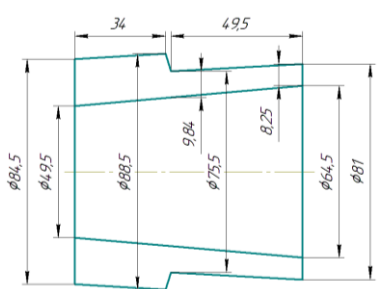
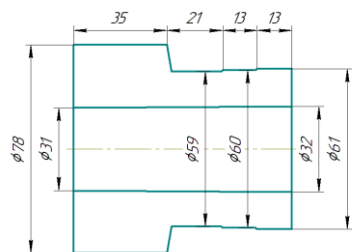
123. Markov, O., Panov, V., Karnaukh, S., Khvashchynskyi, A., Zhytnikov, R., Kukhar, V., Kosilov, M., Rizak, P. (2020). Determining the deformed state in the process of rolling conical shells with a flange. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (108), 34-41

124. Пат. 142502 Україна, МПК (2006) В 22 D 7/00. Спосіб спосіб сифонного розливання сталі у виливниці / Кальченко П.П., Марков О. Є., Панов В. В., Шевченко Н.Г., Коткова В.В., заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u201911704; заявл. 06.12.2019; опубл. 10.06.2020, бюл. № 11. – 4 с.

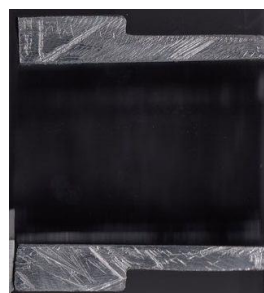
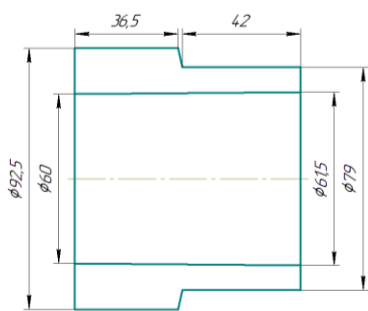
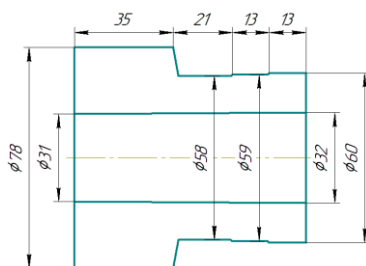
125. Пат. 145120 Україна, МПК (2006) В 21 J5/10. Спосіб прошивання ковальських заготовок / Кальченко А.О., Марков О. Є., Панов В. В., Житніков Р.Ю., Мусорін А.В., Хващинський А.С., Шевченко Н.Г. заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u202003105; заявл. 25.05.2020; опубл. 26.11.2020, бюл. № 22. – 4 с.

ДОДАТОК А – Дослідження формозмінення ступінчастої заготовки при розкочуванні конусних втулок

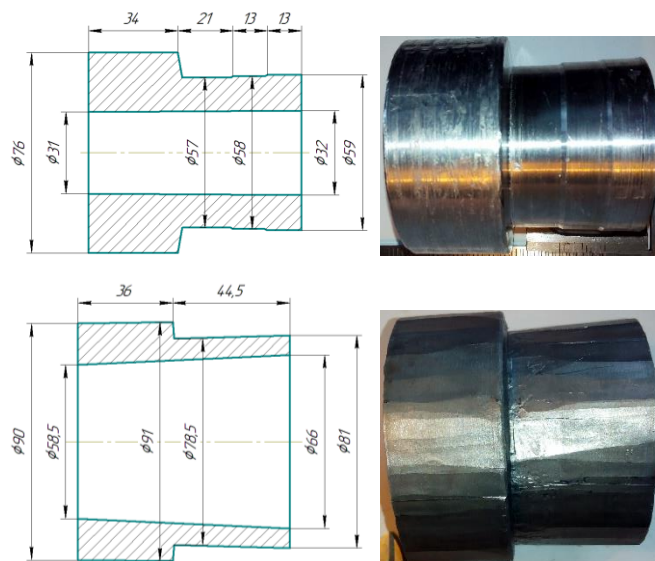
Розміри заготовки $\varnothing 78 \times \varnothing 61$



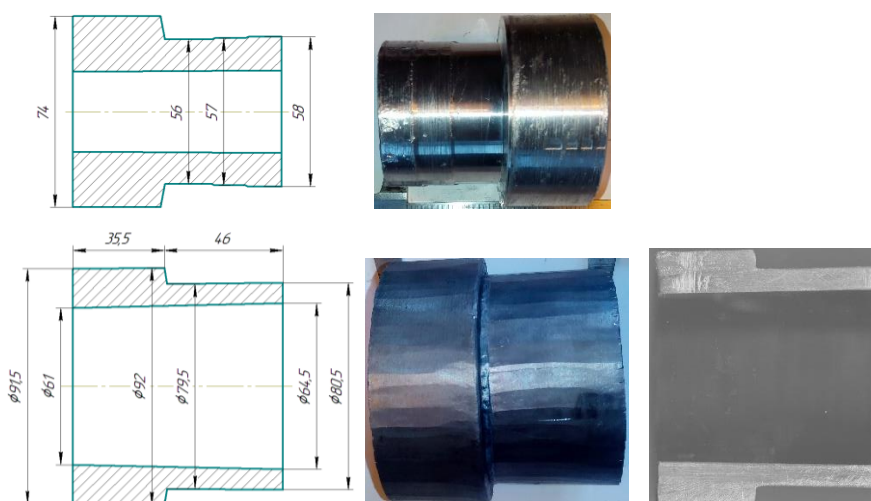
Розміри заготовки $\varnothing 78 \times \varnothing 60$



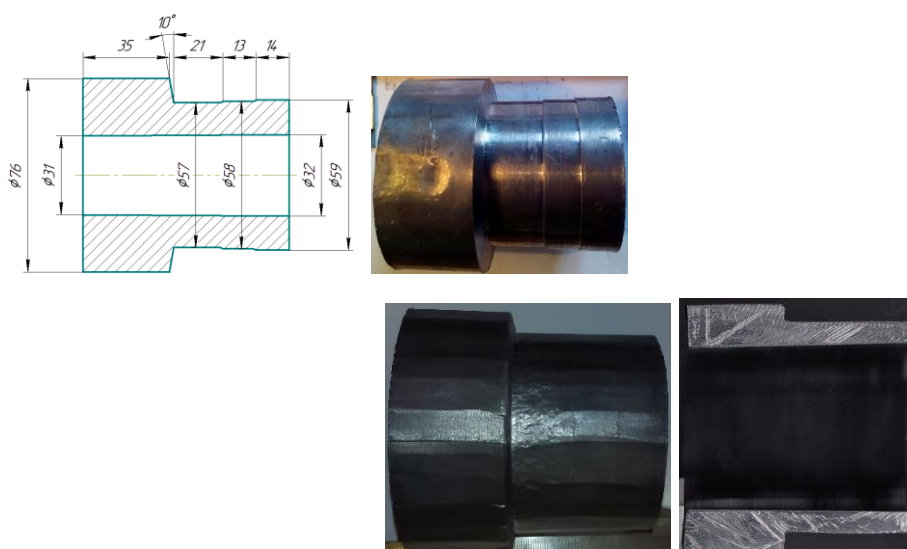
Розміри заготовки Ø76х Ø59



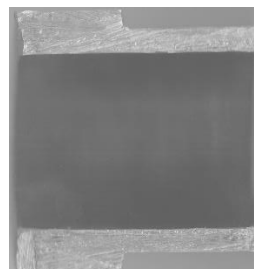
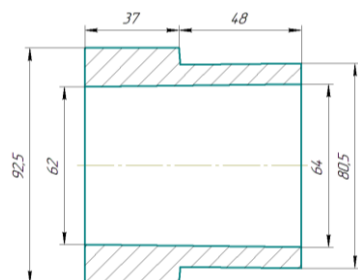
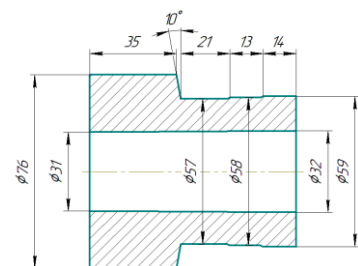
Розміри заготовки Ø74х Ø58



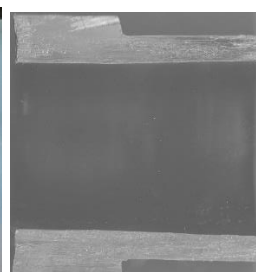
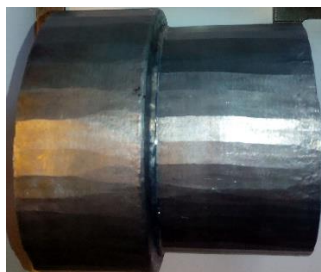
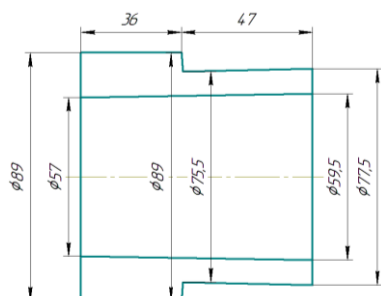
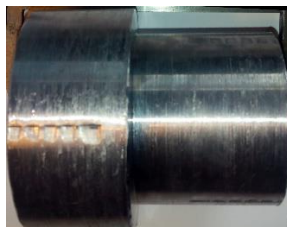
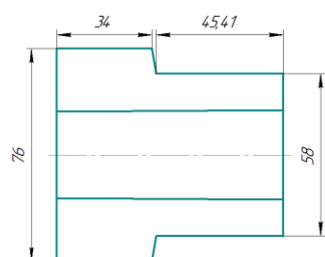
Розміри заготовки Ø76х Ø59



Розміри заготовки Ø76х Ø59



Розміри заготовки Ø76х Ø58



ДОДАТОК Б – Акт впровадження результатів дисертаційної роботи



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

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

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «ЕНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

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

