

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОТАМАНСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ВЛАДИСЛАВОВИЧ



УДК 621.787.4

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ ДЕФОРМУЮЧИМ ПРОТЯГУВАННЯМ**

Спеціальність 05.02.08 – Технологія машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Житомир – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка» (м. Житомир)

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Немировський Яків Борисович
Державний університет «Житомирська політехніка»
(м. Житомир), професор кафедри механічної інженерії та
автомобільного транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гурей Ігор Володимирович
Національний університет «Львівська політехніка»
(м. Львів), професор кафедри робототехніки та
інтегрованих технологій машинобудування

доктор технічних наук, професор
Сивак Роман Іванович
Вінницький національний технічний університет
(м. Вінниця), професор кафедри галузевого
машинобудування

Захист відбудеться 11 вересня 2026 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 14.052.02 в Державному університеті «Житомирська політехніка» за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, конференц зала.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету «Житомирська політехніка» за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, та на сайті Вченої ради Університету за адресою: <https://ztu.edu.ua/site/departament?id=156>

Автореферат розісланий 07 серпня 2026 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 14.052.02
кандидат технічних наук, доцент



О. А. Громовий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із головних напрямів сучасного машинобудування є впровадження ресурсозберігаючих технологій, які забезпечують підвищення якості при виготовленні нових деталей та відновленні зношених. Особливе місце серед них займають процеси, що ґрунтуються на деформуючому протягуванні (ДПР).

Цей метод холодної пластичної деформації широко застосовується як на стадіях чорнової, так і чистової обробки отворів циліндричних заготовок, забезпечуючи формоутворення розмірів виробу, корекцію геометричних похибок, поліпшення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу, формування залишкових напружень стиску на робочих поверхнях виробу, зменшення припусків під механічну обробку, а в ряді випадків – можливість повної відмови від кінцевої обробки різанням. Застосування цього методу особливо актуальне для відновлення зношених деталей, адже дозволяє зберегти до 80 % виробів у повторній експлуатації при собівартості, що суттєво нижча від виготовлення нових. З огляду на сказане, використання ДПР сприяє не лише зменшенню матеріальних і енергетичних витрат, а й впровадженню безвідходних технологій, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку машинобудування.

Значна частина машинобудівних виробів виготовляється зі сталей поліпшеної якості та легованих сплавів, що відзначаються високими експлуатаційними характеристиками та високим рівнем пластичності. До таких матеріалів належать сталі 40Х, 18ХГ, 38ХМЮА, 40ХНМА та багато інших, зокрема і сталь 12ХН3А, яка широко застосовується при виготовленні відповідальних деталей машинобудівної, транспортної, авіаційної техніки. З цієї сталі виготовляють деталі типу втулок, гільз, циліндрів, поршневих пальців і тому подібних, які працюють в умовах підвищених механічних, трибологічних навантажень і вимагають високої зносостійкості поверхневих шарів. У практиці експлуатації ці деталі часто зношуються саме по посадкових місцях внутрішньої або зовнішньої поверхні, що зумовлює актуальність їх виготовлення та відновлення методами пластичної деформації. Таким чином, вибір 12ХН3А як базового матеріалу для дослідження процесу ДПР є обґрунтованим і має науково-прикладне значення. Водночас розроблювані в даній дисертаційній роботі підходи, а також результати досліджень ДПР, можуть бути поширені і на інші вироби з конструкційних та легованих сталей, а також кольорових сплавів з достатнім рівнем пластичності матеріалу.

Незважаючи на значну кількість наукових теоретичних досліджень і експериментальних робіт, низка аспектів процесу деформуючого протягування потребує додаткового вивчення. Зокрема, актуальним є вивчення взаємозв'язку між деформацією виробу та зміною зовнішніх розмірів виробу, впливу режимних параметрів та геометрії інструменту на його формоутворення, а також пояснення причин різної зміни осьового розміру (укорочення чи подовження) деталей, що спостерігається на практиці. Відомі аналітичні рішення та експериментальні дослідження здебільшого орієнтовані або на тонкостінні, або на заготовки з безкінечною товщиною стінки, що не дозволяє поширити їх на випадки обробки деталей з кінцевою товщиною стінки з наскрізною деформацією. При цьому

важливим завданням є визначення гранично допустимих деформацій заготовок, що не призводять до її руйнування під час обробки та забезпечують необхідну якість.

Складність теоретичного опису та недостатня точність експериментальних методів вимагають застосування чисельних методів аналізу, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ), для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) та формоутворення деталей при ДПР. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними дозволить перевірити адекватність розроблених моделей і створити науково обґрунтовану базу для розробки ефективних технологічних процесів ДПР.

Великий обсяг наукових досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців, зокрема Бусела Ю.Ф., Гриценка Е.І., Грушка О.В., Розенберга О.М., Розенберга О.О., Кривошеї В.В., Крицького А. Д., Кузнєцова А.М., Монченка В.П., Немировського Я.Б., Огороднікова В.А., Посвятенка Е.К., Проскурякова Ю.Г., Цеханова Ю.О., Чернявського О.В., Шейкіна С.Є., Шепеленка І.В., Benseddiq N., Calaf-Chica J., Creager M., Curto-Cardenas D., Davidson T.E., Dong X., Fan L., Gibson M.C., Kendall D.P., Phillips J.L., Lahoti G.D., Li J., Liu C., Liu Y., Liu J., Yu Q. дали багато інформації що до цілісності розуміння процесу ДПР, однак, питанню наукового обґрунтування і реалізації формоутворення при керованій пластичній зміні розмірів заготовок з кінцевою товщиною стінки із пластичних металів не приділено достатньої уваги, що робить таку задачу актуальною для її аналізу та вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка» у відповідності до постанови Кабінету Міністрів де підтверджується, що задачі технології машинобудування входять в перелік пріоритетних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок в Україні «Нові ресурсозберігаючі, енергоощадні та екологічно безпечні процеси одержання конкурентоспроможних речовин і матеріалів та виробів із них»; Положень про організацію наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності в Державному університеті «Житомирська політехніка» від 31.05.2019 р. №9/од.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка технологічних підходів забезпечення заданих розмірних параметрів циліндричних виробів із пластичних металів при деформуючому протягуванні за рахунок вибору режимних параметрів, геометрії інструменту та товстостінності заготовки.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **основні завдання наукового дослідження:**

1. Виконати аналітичний огляд наукових джерел з формоутворення при пластичному деформуванні циліндричних заготовок з кінцевою товщиною стінки із пластичних металів та встановити фактори, які впливають на граничні деформації, що призводять до руйнування заготовки;

2. Розробити методику дослідження напружено-деформованого стану та похідних від нього параметрів для заготовок, оброблених деформуючим протягуванням, із застосуванням програмних комплексів, які базуються на методі скінченних елементів;

3. Виконати імітаційне моделювання напружено-деформованого стану в осередку деформації циліндричних заготовок із кінцевою товщиною стінки при їх деформуванні та встановити закономірності зміни його характеристик;

4. Провести експериментальні дослідження процесу та виконати порівняльний аналіз результатів числового моделювання з експериментальними для верифікації параметрів осередку деформації;

5. Дослідити шляхом чисельного моделювання використаний ресурс пластичності матеріалу на внутрішній і зовнішній поверхнях оброблених заготовок та визначити технологічні фактори, що впливають на нього;

6. Визначити особливості деформування заготовок при обробці групою деформуючих елементів та встановити вплив технологічних факторів на мінімізацію використання ресурсу пластичності на зовнішній та внутрішній поверхнях заготовки;

7. Дослідити вплив геометрії інструменту, режимів протягування і товстостінності заготовки на забезпечення розмірів деформованих виробів, розробити схему їх отримання та провести її промислову апробацію.

Об'єкт дослідження. Процес деформуючого протягування заготовок із пластичних металів.

Предмет дослідження. Визначення впливу геометрії деформуючого елемента, режимів обробки та товстостінності заготовки на її розмірні параметри при деформуючому протягуванні заготовок із пластичних металів.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використано комплекс теоретичних, чисельних та експериментальних методів досліджень, а саме: положення теорії пружності, пластичності та механіки суцільного середовища для аналізу напружено-деформованого стану заготовок при деформуючому протягуванні; положення теорії подібності та розмірного аналізу для обґрунтування вибору безрозмірних геометричних параметрів заготовок; метод скінченних елементів, реалізований у програмному комплексі Deform 2D/3D, для дослідження механіки пластичного деформування; графічно-аналітичний метод та методи апроксимації даних для побудови розрахункових залежностей; експериментальні дослідження для верифікації результатів моделювання; метод візіопластичності для експериментального визначення характеристик осьової деформації заготовок.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– *вперше* при імітаційному моделюванні деформуючого протягування встановлено механізм руйнування (мікрорушення) поверхневого шару отвору заготовки, який полягає у вичерпанні ресурсу пластичності матеріалу в зоні локальної пластичної деформації за ділянкою контакту. Визначальним фактором руйнування є зміна напруженого стану металу на внутрішній поверхні заготовки при виході з зони контакту, де він знаходився в напруженому стані, близькому до всебічного стиску, до напруженого стану, близького до двовісного розтягування, обумовленого появою позитивного значення гідростатичного тиску, осьових та колових розтягуючих напружень, що інтенсивно вичерпує ресурс пластичності на внутрішній поверхні заготовки;

– *вперше* встановлено, що найбільший рівень вичерпання ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні при деформуванні заготовки різною кількістю деформуючих елементів за однакового сумарного натягу досягається за умови

використання максимальної кількості деформуючих елементів з мінімальним натягом на кожен, що дало змогу розробити схему керування вичерпанням ресурсу пластичності матеріалу заготовок послідовними групами деформуючих елементів, за якої перша група елементів забезпечує зниження використання ресурсу пластичності на внутрішній поверхні, а друга – на зовнішній;

- *вперше* встановлено зв'язок необхідної окружної деформації зовнішньої поверхні заготовки з сумарним натягом на отвір. Показано, що окружна деформація зовнішньої поверхні не залежить від кута нахилу твірної робочого конуса, а визначається тільки товстостінністю заготовки і сумарним натягом;

- *набули подальшого розвитку* особливості деформування заготовок з кінцевою товщиною стінки, які полягають у одночасному виникненні зон локальної пластичної деформації в місцях сполучення ділянки контакту з позаконтактними зонами в умовах досягнення в осередку деформації критичного контактного тиску;

- *набули подальшого розвитку* закономірності керування осьовими розмірами виробу при деформуючому протягуванні, згідно з якими величина контактного тиску в осередку деформації визначає знак і величину осьової деформації заготовки.

Практичне значення одержаних результатів:

- удосконалено експериментально отримані рекомендації для проєктування інструменту з груповим розташуванням деформуючих елементів. Згідно з ними, основну частину деформації отвору доцільно здійснювати групою деформуючих елементів зі значними натягами на елемент $a/d_0 \geq 0,0375$. При цьому досягається мінімізація використаного ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки. Потім здійснюють обробку групою елементів з незначними натягами на елемент $a/d_0 \leq 0,0125$ та необхідною сумарною деформацією, яка забезпечить мінімізацію використаного ресурсу пластичності та дотримання потрібних параметрів якості обробленого поверхневого шару;

- розроблено шляхи оптимізації досягнення необхідних розмірів виробу, що полягають у встановленні технологічного впливу режимів протягування, геометрії інструменту та товстостінності заготовки на розміри внутрішньої та зовнішньої поверхонь, а також на осьовий розмір обробленої заготовки;

- отримано залежність для визначення необхідного натягу, який забезпечує потрібне значення окружної деформації (e_φ) зовнішньої поверхні;

- удосконалена методика визначення діаметру обробленого отвору за рахунок результатів, отриманих при симулюванні процесу. Отримані розрахункові залежності для визначення параметрів, необхідних для розрахунку діаметру обробленого отвору. Додатково запропоновано інтерполяційні залежності для оцінювання пружного відновлення отвору. Обґрунтовано їхній зв'язок із геометрією позаконтактної зони. Встановлений зв'язок діаметра обробленого отвору з режимами протягування та товстостінністю заготовки;

- доведено необхідність перевірки деформації зовнішньої та внутрішньої поверхні деталі після пластичного деформування по параметру використаної пластичності матеріалу, що забезпечує поліпшену якість деформованої робочої поверхні після хіміко-термічної та термічної обробки;

- розроблено методику послідовної реалізації пластичного формоутворення розмірів виробу, що полягає у визначенні окружної деформації та необхідної

деформації отвору. Після чого визначається кут нахилу твірної робочого конуса α^* , що забезпечує відсутність осьової деформації згідно отриманої залежності. Для забезпечення необхідних осьових розмірів обробленої заготовки кут α деформуючого елемента слід обирати з таких умов: за відсутності зміни довжини $\alpha = \alpha^*$, для отримання укорочення $\alpha < \alpha^*$, а для забезпечення подовження $\alpha > \alpha^*$;

– розроблено схему технологічного процесу обробки або відновлення з використанням пластичного деформування циліндричних деталей, що дозволило визначити режими протягування і геометрію інструменту, які забезпечать отримання необхідних розмірів, при мінімізації використаного ресурсу пластичності.

Особистий внесок здобувача:

Безпосередньо автором здійснено: інформаційний пошук та аналіз літературних джерел за темою дисертації; розробку методики імітаційного моделювання методом скінченних елементів напружено-деформованого стану, заготовок, оброблених деформуючим протягуванням; імітаційне моделювання методом скінченних елементів напружено-деформованого стану заготовки та його аналіз; експериментальні дослідження по визначенню довжини контактної зони деформуючого елемента з заготовкою; дослідження шляхом чисельного моделювання використаного ресурсу пластичності на внутрішній і зовнішній поверхнях заготовки; обґрунтування впливу геометрії інструмента та режимів протягування на процес формоутворення поверхонь заготовки; розробку технологічного процесу виготовлення деталі «втулка» з застосуванням операції деформуючого протягування та його апробацію в групі «А.ТОМ» компанії «Пак-Трейд» (ФОП Томчук А.М.).

Постановка мети, розробка завдань та обговорення результатів проведені разом з науковим керівником.

З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Внесок здобувача у праці, опубліковані в співавторстві, наведено у списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідались та обговорювались на 11 науково-технічних конференціях, у тому числі і міжнародних: XII Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (2023, Житомир), VI Міжнародна науково-практична конференція «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем» (2024, Кропивницький), Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки (2024, Житомир), Міжнародна конференція «Матеріали та технології в інженерії (MTI-2024)» (2024, Луцьк), 6 th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024) (2024, Одеса), XXIV міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2024)» (2024, Харків), Міжнародна науково-технічна конференція «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні» (2024, Одеса), Міжнародний науково-технічний семінар «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті» (2025, Київ), International Conference on Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems (SIEMS-2025) (2025, Запоріжжя) Всеукраїнська науково-практична онлайн-

конференція аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (2025, Житомир), XIII Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (2025, Житомир).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, з них: 3 статті у наукових фахових виданнях України (одноосібних – 1, 1 стаття категорії «А» у виданні, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Web of Science), 2 статті у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus, Web of Science, 1 стаття у періодичному науковому виданні держави, яка входять до ОЕСР та ЄС, 1 патент України на корисну модель, 1 колективна монографія та 9 публікацій апробаційного характеру в інших наукових виданнях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 151 найменувань і 8 додатків. Повний обсяг роботи складає 260 сторінок машинописного тексту з додатками, у тому числі 83 рисунків та 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичну цінність роботи. Наведені данні про публікації, апробацію, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан досліджень, що стосуються формоутворення заготовок при ДПР. Особливу увагу приділено аналізу відомих положень, що до схеми осередку деформації, її геометричних та кінематичних характеристик. Встановлено, що найбільш точною є схема, відповідно до якої осередок деформації складається з ділянки контакту та позаконтактних зон, сполучених з нею.

Детально процес деформуючого протягування (прошивання) експериментально досліджено і теоретично описано в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України такими науковцями як: О.М. Розенберг, О.О. Розенберг, Ю.Ф. Бусел, В.В. Кривошея, Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, Ю.О. Цеханов, С.Є. Шейкін, а також В.А. Огородніковим, В.О. Грушко. І.О. Сивак, Р.І. Сивак, N. Benseddiq, J. Calaf-Chica, M. Creager, D. Curto-Cardenas, T.E. Davidson, M.C. Gibson, D.P. Kendall, J. Li, C. Liu, J.L. Phillips, G.A. Rodman, Z. Yue. Наукові роботи цих та інших авторів дали багато інформації що до цілісності розуміння процесу деформуючого протягування, однак, питанню наукового обґрунтування і реалізації формоутворення при керованій пластичній зміні розмірів заготовок з кінцевою товщиною стінки зі пластичних металів не приділено достатньої уваги.

Результати, наведені в роботах, які стосуються впливу режимів протягування, геометрії інструменту та товстостінності заготовки, часто мають суперечливий характер. Наприклад, у низці праць зазначено, що після обробки заготовки деформуючим протягування (прошиванням) її довжина укорочується, в той же час в деяких роботах відзначається можливість подовження деталей.

Складність теоретичного опису, трудомісткість та недостатня точність експериментальних методів вимагають застосування сучасних чисельних методів

аналізу, зокрема методу скінченних елементів. Такі методи набувають все більшої популярності і починають використовуватися, наприклад, у дослідженні деформування виробів із чавуну при дослідженні процесу ДПР, а також в закордонних роботах, які стосуються процесів схожих на ДПР – ротаційного обтискання труб, редукування, опублікованих: Y. Liu, J. Liu, M. Herrmann, C. Schenck, B. Kuhfuss, G. D. Lahoti, L. Liuzzi, T. Altan, Y. Wu, X. Dong, Q. Yu, L. Fan, Zh. Wang, H. Wang.

Для забезпечення необхідних розмірів виробу ДПР необхідно проводити з наскрізними пластичними деформаціями, що, в свою чергу, може призвести до руйнування заготовки під час обробки, тому під час виконання операції виникає питання визначення гранично допустимих деформацій матеріалу, тобто оцінки використаного ресурсу пластичності матеріалу.

Проведено аналітичний огляд наукових публікацій з яких впливають дві практично важливі задачі: перша – визначення допустимого ресурсу пластичності для забезпечення безруйнівності процесу формоутворення, та друга – оцінка впливу ступеня попередньої пластичної деформації на подальші технологічні операції і кінцеві властивості матеріалу.

Отже, задачу забезпечення розмірів циліндричних виробів із пластичних металів при ДПР необхідно вирішувати на основі аналізу НДС матеріалу під час обробки з наступним порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними, що дозволить перевірити адекватність розроблених моделей і створити науково обґрунтовану базу для розробки ефективних технологічних процесів ДПР.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалу – сталь 12ХН3А, яка може бути оброблена ДПР з наскрізною пластичною деформацією. Вибір 12ХН3А як базового матеріалу для проведення моделювання та дослідження процесу ДПР має науково-прикладне значення. Водночас розроблювані підходи та результати можуть бути поширені і на інші вироби з конструкційних та легованих сталей, до яких належать марки 40Х, 18ХГ, 38ХМЮА, 40ХНМА та інші.

Велике різноманіття розмірів циліндричних виробів спонукає під час дослідження процесу ДПР застосовувати положення теорії подібності. Як основний параметр обирає діаметр отвору заготовки $d_0 = 40$ мм, довжину $l_0 = 150$ мм, та різні відношення товщини стінки до прийнятого діаметра – t_0/d_0 : 0,05; 0,15; 0,2; 0,25; 0,35; 0,45. Це дасть можливість отримувати результати у вигляді безрозмірних залежностей розмірів обробленої заготовки від її початкових геометричних параметрів (довжини l_0 , діаметра отвору d_0 , товщини стінки t_0). А також від геометричних і режимних параметрів процесу (a , $\sum a$, α).

Для проведення імітаційного дослідження процесу ДПР було використано підхід послідовного однофакторного експерименту, який сформований на основі апріорних даних про фізику процесу ДПР. Отримані результати представлялися у вигляді табличних та графічних залежностей, які надалі апроксимувалися аналітичними виразами. Верифікацію результатів проведено шляхом адаптивного експерименту з перевіркою отриманих попередньо опорних точок.

Для проведення експериментів деформуючим прошиванням використовувався модернізований гідравлічний прес П-50 з встановленою гідравлічною станцією та системою реєстрації максимального тиску в системі.

Для визначення довжини контакту матеріалу заготовки з деформуючим елементом (ДЕ) було використано відому методику, яка полягає в нанесенні на внутрішню поверхню заготовки алмазовмісних плям. Після ДПР на поверхні ДЕ залишаються сліди у вигляді подряпин, які відображають довжину контакту.

Зміна осьових розмірів оброблених заготовок визначалася методом візіопластичності по зміні відстаней між попередньо нанесеними мітками.

Розроблено методику для дослідження НДС в осередку деформації при ДПР із застосуванням МСЕ у програмно-розрахунковому комплексі DEFORM 2D/3D V11.0, яка дозволяє вивчити інтенсивність напружень і деформацій, інтенсивність швидкостей деформацій та їх компоненти відповідних тензорів, а також відслідковувати зміну гідростатичного тиску та показника напруженого стану.

Розроблено методику визначення геометричних характеристик осередку деформації на основі результатів числового моделювання. Вона дає можливість встановлювати основні параметри осередку, зокрема: довжину контактної зони, протяжність та висоту позаконтактних зон, величину усадки отвору після обробки.

У **третьому розділі** на основі МСЕ проведено аналіз НДС в осередку деформації, який дав змогу вивчити механіку деформування при ДПР заготовок із пластичних металів, що обробляються з наскрізними пластичними деформаціями, і визначити шляхи технологічної оптимізації таких параметрів якості, як формоутворення заготовки та використаний ресурс пластичності матеріалу.

Підтверджено, що при ДПР в умовах наявності на ділянці контакту критичного контактного тиску виникають зони локальної пластичної деформації в місцях з'єднання ділянки контакту з позаконтактними зонами (рис. 1, б). Для цього випадку уточнено відому схему осередку деформації при ДПР (рис. 1, а). Пояснені причини появи цих зон. Передня зона, являє собою наплив матеріалу з ділянки контакту і збільшує її протяжність, а задня – витікання оброблюваного металу з ділянки контакту на циліндричну стрічку (рис. 2), що призводить до зменшення висоти позаконтактної зони (рис. 3). Представлені розрахункові та експериментальні дані, що підтверджують наявність цих зон. При контактному тиску менше критичного геометричні розміри осередку деформації можна розраховувати за відомими теоретичними моделями осередку деформації, яка справедлива для тонкостінних заготовок, без врахування впливу локальних зон пластичного деформування

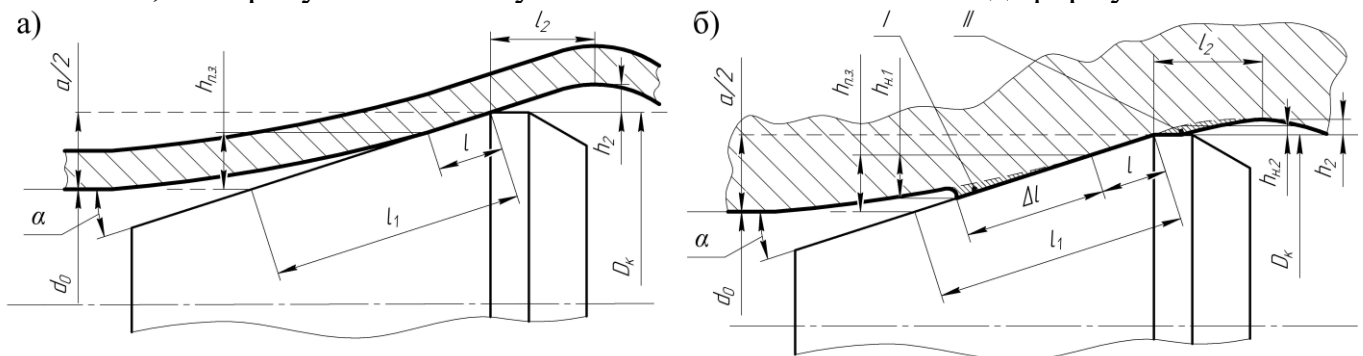


Рисунок 1 – Деформуюче протягування заготовки: а – тонкостінної $q < q_{кр}$;

б – товстостінної $q \geq q_{кр}$; I, II – зони локальної пластичної деформації

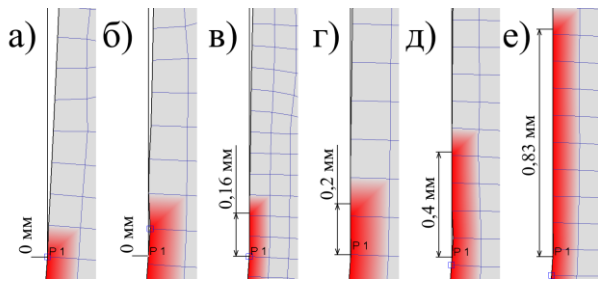


Рисунок 2 – Контакт матеріалу із циліндричною ділянкою ДЕ, $a/d_0 = 0,025$, $\alpha = 4^\circ$, t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,15; в) 0,2; г) 0,25; д) 0,35; е) 0,45

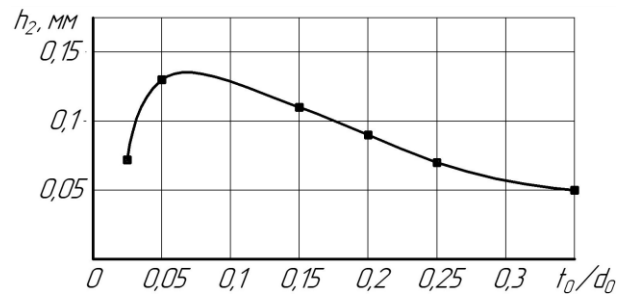


Рисунок 3 – Зміна висоти позаконтактної зони, отримана моделюванням

Представлено порівняння результатів моделювання з експериментальними по визначенню зміни протяжності контакту від товстостінності заготовки (рис. 4, а) (суцільна лінія – результати моделювання, пунктирна – результати експериментів). Зі збільшенням товстостінності заготовки протяжність контакту спочатку знижується, а потім починає зростати, причому чітко простежується перегин функції $l_2 = f(t_0/d_0)$ в районі критичної товщини стінки. Очевидно, що величина критичної товщини стінки залежить від натягу на елемент та кута α (рис. 4, б).

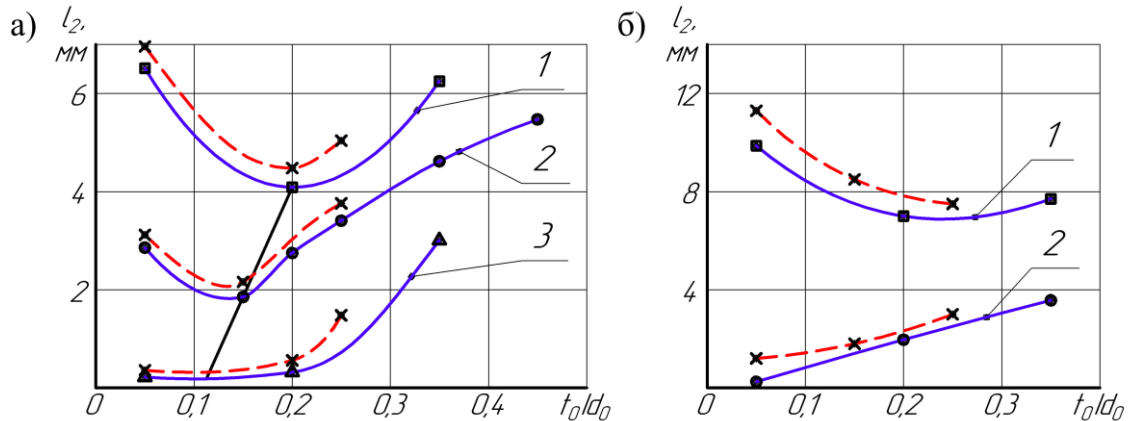


Рисунок 4 – Залежність довжини контакту від товстостінності при симуляції — та експерименті - - деформування ДЕ: а) з кутом $\alpha = 4^\circ$ та натягом на елемент a/d_0 : 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125; б) з натягом $a/d_0 = 0,025$ і кутом α : 1 – 2° ; 2 – 8°

В результаті статистичної обробки результатів моделювання отримано залежність (1) по якій можна визначити значення критичної товщини стінки, при якій в контактній зоні виникає критичний контактний тиск:

$$(t_0/d_0)_{\text{кр}} = 0,07 + 3,46 a/d_0, \quad (1)$$

Вивчено НДС в осередку деформації при ДПР на поверхні отвору (рис. 5, 6, 7 точка 1), по середині стінки (рис. 6, 7 точка 2) та на зовнішній поверхні (рис. 5, 6, 7 точка 3), заготовок з різною товстостінністю t_0/d_0 від 0,05 до 0,35, на яких, виникають різні умови контактного тиску q .

При обробці заготовок різної товстостінності спостерігається локальне падіння інтенсивності напружень після виходу з контактної зони, що обумовлено наявністю зони локальної пластичної деформації.

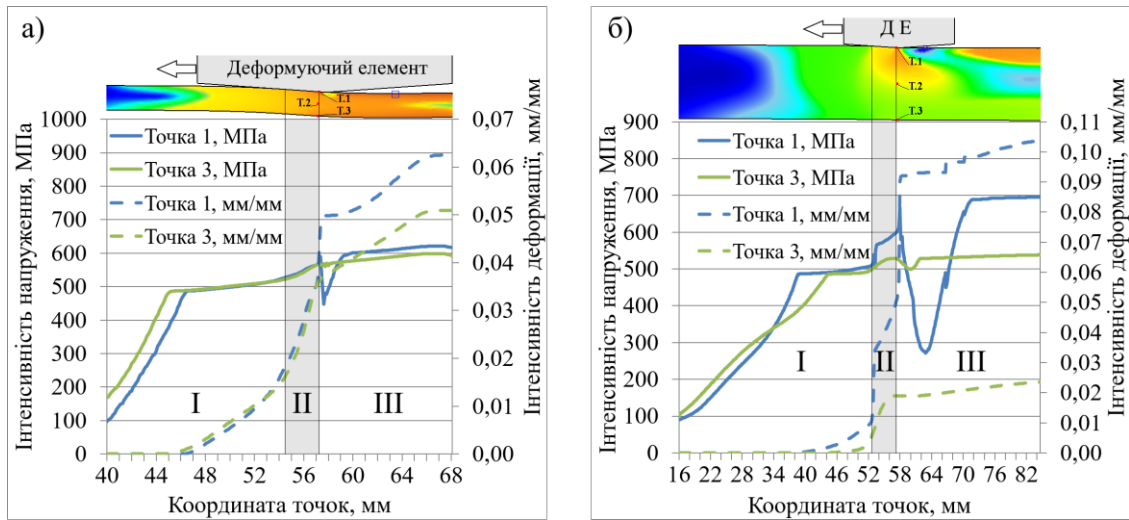


Рисунок 5 – Зміна інтенсивності напружень та інтенсивності деформацій в осередку деформації під час симуляції деформування заготовок із натягом $a/d_0 = 0,025$, $\alpha = 4^\circ$, товстостінністю t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,35

Компоненти тензора напружень на початку контактної зони на внутрішній поверхні заготовки сягають від'ємних значень причому зі збільшенням товщини стінки їх інтенсивність зростає, матеріал перебуває в стані інтенсивного об'ємного стиску. При переході в позаконтактну зону з'являються позитивні значення компонентів напружень. Позитивні значення осевих напружень після контактної зони зростають зі збільшенням товщини стінки (рис. 6, б; 7, б).

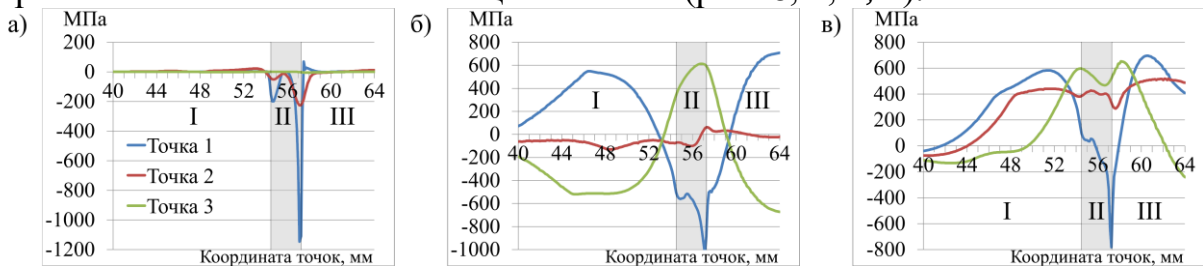


Рисунок 6 – Зміна компонентів тензора напружень при деформуванні тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний σ_r ; б – осевий σ_z ; в – окружний σ_ϕ

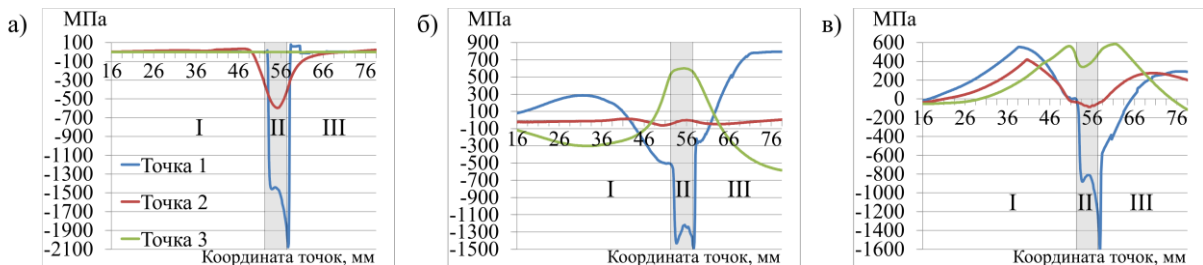


Рисунок 7 – Зміна компонентів тензора напружень при деформуванні товстостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний σ_r ; б – осевий σ_z ; в – окружний σ_ϕ

На зовнішній поверхні в зоні, що відповідає ділянці контакту, осьоова та окружна складові тензора напруження мають позитивні значення, радіальна складова знаходиться в межах нуля. Тобто, має місце напружений стан, близький до двовісного

розтягу. Після виходу з контактної зони осьова та окружна складові напруження зменшуються та змінюють свій знак на від'ємний, таким чином на зовнішній поверхні формуються залишкові напруження стиску.

Збільшення товщини стінки призводить до зміни деформованого стану. При обробці тонкостінних заготовок мають місце два стискуючі та один розтягуючий компоненти тензора деформації, а при обробці товстостінних – один стискуючий і два розтягуючі. Слід звернути увагу, що при обробці тонкостінних заготовок осьовий компонент менше нуля $e_z < 0$, тобто має місце укорочення деталі, а при обробці товстостінних з'являється подовження, осьовий компонент більше нуля $e_z > 0$.

Зазначений факт можна використовувати для технологічного управління розмірними параметрами виробів при деформуючому протягуванні. Тобто поєднанням режимних параметрів і геометрії інструмента можна забезпечити необхідні осьові розміри обробленої деталі від укорочення до подовження. Особливо важливий цей факт при розробці технології відновлення зношених деталей.

Виявлені умови виникнення руйнування поверхневого шару (мікророзриву) на внутрішній поверхні оброблюваної заготовки при деформуванні її в умовах наявності контактного критичного тиску, що характерно для товстостінних деталей. Руйнування обумовлене появою зони локальної пластичної деформації за зоною контакту, яка виникає за рахунок витікання матеріалу із зони контакту. При цьому, як показало вивчення НДС, на внутрішній поверхні при виході матеріалу з ділянки контакту, де він знаходився в умовах, близьких до всебічного стиснення, виникає осьове розтягуюче напруження, яке різко вичерпує ресурс пластичності і, незважаючи на незначну окружну деформацію в позаконтактній зоні, приводить через деяке число циклів деформації до появи руйнування поверхневого шару отвору.

Досліджено використаний ресурс пластичності на зовнішній та внутрішній поверхнях заготовки. У ряді робіт запропоновано обмеження щодо допустимого значення використаного ресурсу пластичності:

$$\psi_{max} \leq [\psi]^*, \quad (2)$$

де: $[\psi]^* = (0,25 \div 0,3) \cdot [\psi]$; $[\psi]$ – гранична деформація заготовки, що відповідає конкретному показнику напруженого стану при її деформації.

Перевищення цього значення призводить до різкого погіршення механічних властивостей матеріалу виробу після термообробки.

Для з'ясування можливості реалізації задачі, пов'язаної з пластичним деформуванням необхідно проводити оцінку використаної або залишкової пластичності обробленої деталі. Найбільш зручним для операції ДПР, є критерій Колмогорова:

$$\psi = \int_0^{e_0} \frac{de_0}{e_{пр}(\eta)}, \quad (3)$$

де: $e_{пр}(\eta)$ – гранична деформація матеріалу при відповідному постійному значенні коефіцієнта жорсткості напруженого стану;

η – коефіцієнт жорсткості напруженого стану, визначається по формулі (4);

e_0 – інтенсивність деформацій для осесиметричної заготовки;

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (4)$$

В основному накопичена деформація визначається деформацією на зовнішній поверхні, що відповідає зоні контакту. Наявність на зовнішній поверхні показника напруженого стану $\eta = +2$, що відповідає двовісному розтягу, робить значення цієї деформації визначальним при руйнуванні на зовнішній поверхні заготовки.

На рисунку 8 наведено залежність накопиченої деформації від товстостінності заготовки для різних натягів, що отримана на основі симуляції. Слід зазначити, що дані, наведені на цьому рисунку, отримано при використанні кута $\alpha = 4^\circ$. Однак для зовнішньої поверхні зміна кута в діапазоні від 2° до 8° мало впливає на зміну накопиченої деформації. Тому ці дані з деякими допущеннями можна використовувати для визначення параметра e_0 у зазначеному діапазоні кутів α .

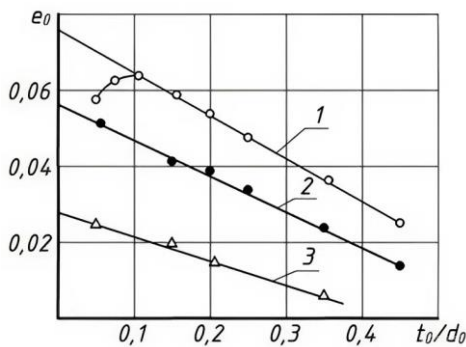


Рисунок 8 – Залежність інтенсивності деформації на зовнішній поверхні заготовки від товстостінності при обробці з кутом $\alpha = 4^\circ$ і натягом на елемент a/d_0 :
1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125

За результатами симуляції (рис. 8) отримано аналітичну залежність для визначення деформації на зовнішній поверхні заготовки:

$$e_0 = (0,007 + 1,9 a/d_0) - (0,034 + 2,03 a/d_0) t/d_0, \quad (5)$$

Для побудови діаграми пластичності сталі 12ХН3А необхідно визначити деформації до руйнування в широкому діапазоні показників напруженого стану – від двовісного розтягу до всебічного стиску. Враховуючи, що на зовнішній поверхні, під час ДПР, матеріал перебуває в умовах двовісного розтягу, а на внутрішній, в зоні контакту, напружений стан близький до всебічного стиску, для аналізу пластичності було проведено ряд експериментів по деформуванню зразків з дослідженого матеріалу при показниках напруженого стану $\eta = -1$ та $\eta = -2$. Результати досліджень, а також значення деформації до руйнування при інших показниках напруженого стану дозволили побудувати діаграму пластичності для сталі 12ХН3А.

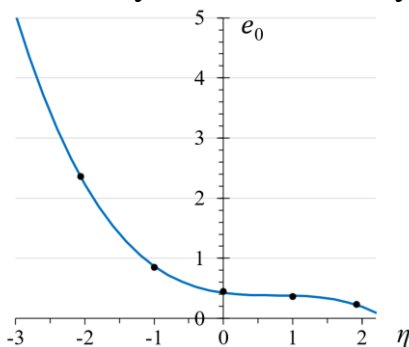


Рисунок 9 – Діаграма пластичності сталі 12ХН3А

Апроксимація кривої (поліном 3-го порядку) отриманої діаграми пластичності для сталі 12ХН3А має наступний вигляд:

$$e_0(\eta) = -0,0886 \cdot \eta^3 + 0,1970 \cdot \eta^2 - 0,1556 \cdot \eta + 0,4248, \quad (6)$$

Результати розрахунку за критерієм Калмогорова показали, що зміна пластичності вздовж осередку деформації під час деформування товстостінної деталі має два різких піки, які відповідають місцям сполучення контактної зони з позаконтактними. На тонкостінній деталі ці піки мають також місце, але вони практично незначні.

Найчастіше ДПР здійснюється групою ДЕ. У цьому разі деформований стан стає циклічним, тобто після виконання деформації одним елементом починає деформувати наступний. Проведено моделювання та розрахунок використаного ресурсу пластичності при деформуванні групою ДЕ (рис. 10).

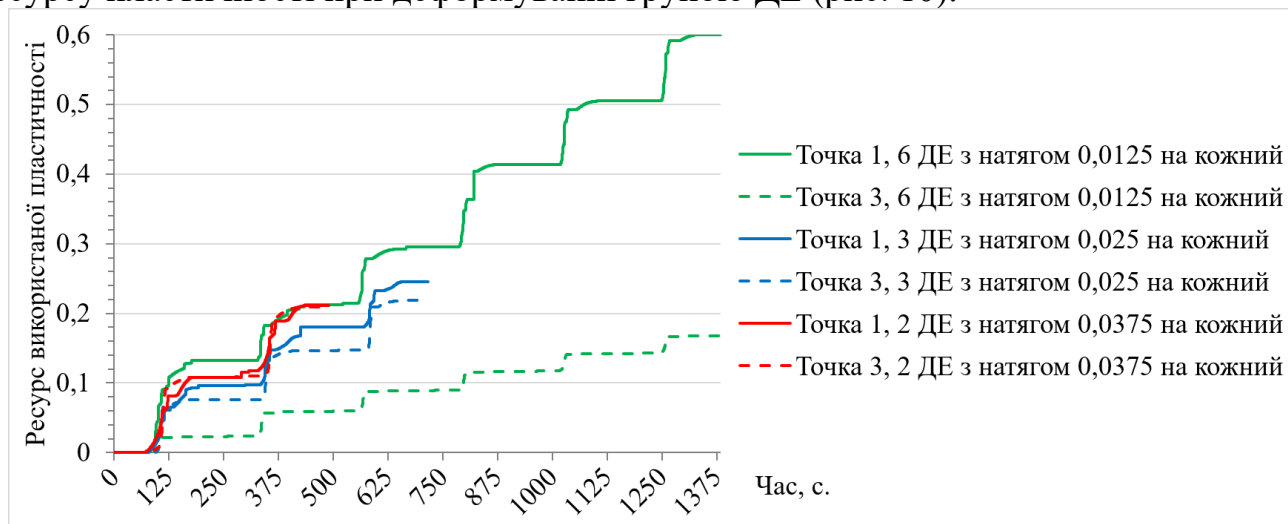


Рисунок 10 – Зміна використаного ресурсу пластичності у осередку деформації заготовки з $t_0/d_0 = 0,35$ при симулюванні її деформування сумарною деформацією отвору $\Sigma a/d_0 = 0,075$: суцільні лінії – деформація на внутрішній поверхні; пунктирні лінії – деформація на зовнішній поверхні

Накопичений використаний ресурс пластичності матеріалу при обробці шістьма ДЕ з мінімальними натягами набагато вищий, ніж при виконанні тієї ж сумарної деформації, але трьома ДЕ з більшими натягами і двома з ще більшими натягами (рис. 10). Накопичений використаний ресурс пластичності на зовнішній поверхні найбільший при використанні максимальних натягів на елемент. На рисунку 11 представлена залежність зміни параметра ψ від числа ДЕ, які здійснюють однакову пластичну деформацію, але з різними натягами.

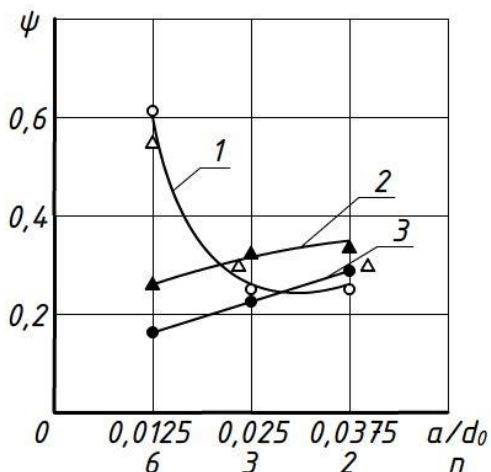


Рисунок 11 – Зміна використаного ресурсу пластичності на внутрішній і зовнішній поверхні заготовок з $t_0/d_0 = 0,35$ і $0,2$ при симулюванні їх деформування з сумарною деформацією отвору $\Sigma a/d_0 = 0,075$: 1 – зміна ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки при $t_0/d_0 = 0,35$ – $\circ$, $t_0/d_0 = 0,2$ – Δ ; 2 – зміна ресурсу пластичності на зовнішній поверхні при $t_0/d_0 = 0,2$; 3 – зміна ресурсу пластичності на зовнішній поверхні при $t_0/d_0 = 0,35$

Використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні заготовки мало залежить від товстостінності заготовки (рис. 11, крива 1). На зовнішній поверхні, особливо товстостінних заготовок, використаний ресурс пластичності в залежності від кількості ДЕ змінюється незначною мірою (рис. 11, криві 2 і 3). Його максимальне значення відповідає використанню великих натягів. Помітний вплив товстостінності на значення використаного ресурсу пластичності на зовнішній поверхні заготовки (рис. 11, криві 2 і 3). При цьому, чим менша товстостінність, тим більше значення використаного ресурсу пластичності.

Апроксимація даних, наведених на рис. 11 дозволила отримати залежність для визначення використаного ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні:

$$\psi_{\text{вн. пов.}} = 1080,8 \cdot (a/d_0)^2 - 69,059 \cdot a/d_0 + 1,299, \quad (7)$$

Та на зовнішній поверхні:

$$\psi_{\text{зов. пов.}} = 0,29822 + 9,96667 \cdot a/d_0 - 0,48444 \cdot t_0/d_0 - 249,6 \cdot (a/d_0)^2 - 0,9333 \cdot (t_0/d_0)^2 + 13,6 \cdot a/d_0 \cdot t_0/d_0, \quad (8)$$

Наведені залежності (7, 8) дозволяють визначити необхідну кількість ДЕ і натяг на них для отримання необхідного використаного ресурсу пластичності.

Рисунок 12 показує залежність зміни накопиченої деформації e_0 в осередку деформації від кута α . Збільшення кута α від 2 до 8° змінює значення e_0 в 4 рази.

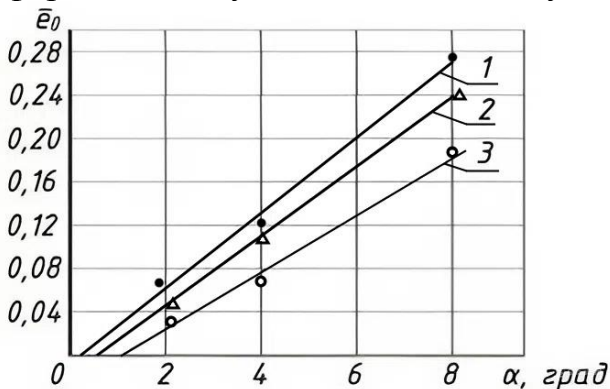


Рисунок 12 – Залежність накопиченої деформації на внутрішній поверхні обробленої заготовки від кута α при симулюванні обробки заготовок зі сталі 12ХН3А з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ з товстостінністю t_0/d_0 : 1 – 0,35; 2 – 0,2; 3 – 0,05

Статистична обробка даних, наведених на рис. 12, дала змогу отримати залежність для визначення накопиченої деформації на внутрішній поверхні заготовки при використанні різних кутів.

$$\bar{e}_0 = (-0,033 + 0,066 t_0/d_0) + (0,024 + 0,04 t_0/d_0)\alpha, \quad (9)$$

Використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні також залежить від кута α (рис. 13) і мінімум його значення спостерігається при куті $\alpha = 2^\circ$. Чим більша товстостінність заготовки, тим більший використаний ресурс пластичності матеріалу. Це зумовлено тим, що зі зростанням товщини стінки зростає деформація внутрішньої поверхні (рис. 12).

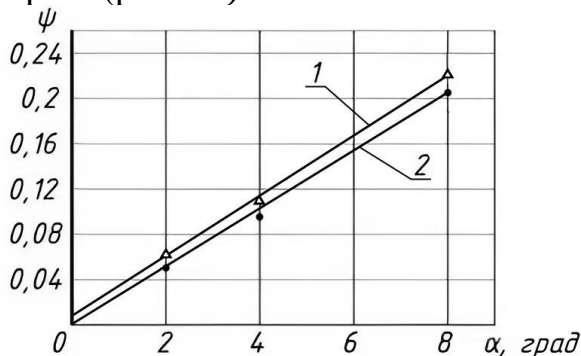


Рисунок 13 – Залежність пластичності на внутрішній поверхні від кута α при симулюванні процесу деформування заготовки з натягом $a/d_0 = 0,025$ при товстостінності заготовки t_0/d_0 : 1 – 0,35; 2 – 0,2

Наведені приклади по визначенню використаного ресурсу пластичності матеріалу при обробці заготовки групою ДЄ з різними натягами дали змогу сформулювати умови розробки схеми деформування з послідовним використанням ресурсу пластичності спочатку на зовнішній, а потім на внутрішній поверхні заготовки. На основі цієї схеми деформування з послідовним використанням ресурсу пластичності розроблені рекомендації для проектування деформуючої протяжки з груповим розташуванням ДЄ, яка використовується для чорнової формоутворюючої обробки заготовок. Ці рекомендації полягають у тому, що основна частина деформації отвору здійснюється групою ДЄ зі значними натягами на елемент $a/d_0 \geq 0,0375$. При цьому відбувається мінімізація використаного ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки. При здійсненні наступної обробки групою ДЄ з незначними натягами на елемент $a/d_0 \leq 0,0125$ визначають необхідну сумарну деформацію, яка забезпечує потрібний використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні деталі. Схема забезпечує мінімальне використання ресурсу пластичності на внутрішній і зовнішній поверхнях і, як було зазначено вище, потрібну деформацію внутрішньої поверхні заготовки, що в свою чергу сприятливо позначається на параметрах якості обробленого поверхневого шару.

У четвертому розділі для визначення діаметру зовнішньої поверхні заготовки на основі результатів моделювання встановлено взаємозв'язок окружної деформації зовнішньої поверхні e_ϕ з сумарним натягом на отвір (рис. 14). Параметр e_ϕ не залежить від кута α , а визначається товстостінністю заготовки і сумарним натягом. Апроксимація даних, дозволила отримати залежність, по якій можна визначити окружну деформацію:

$$e_\phi = 0,95 \cdot a/d_0 - (1,95 \cdot a/d_0) \cdot t_0/d_0, \quad (10)$$

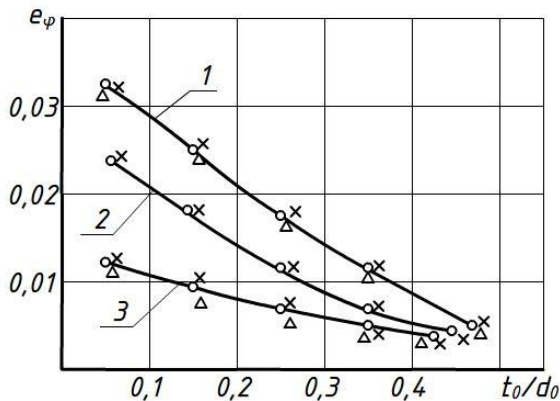


Рисунок 14 – Залежність окружної деформації e_ϕ від товстостінності заготовки t_0/d_0 при симуляції деформування заготовки з натягом на елемент a/d_0 : 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125 з різними кутами α : $\circ$ – 4° ; $\times$ – 8° ; Δ – 2°

Необхідна сумарна деформація внутрішньої поверхні визначиться:

$$\sum a/d_0 = \frac{e_\phi^*}{0,95 - 1,95 \cdot t_0/d_0}, \quad (11)$$

Якщо є необхідність виконувати декілька циклів деформування, сумарний натяг розбивається на декілька переходів, причому:

$$\sum a/d_0 = a_1/d_0 + a_2/d_0, \quad (12)$$

Розмір отвору заготовки залежить від пружного відновлення матеріалу після проходження деформуючого елемента. О. М. Розенберг пропонує геометричну залежність (13) для визначення діаметру обробленого отвору.

$$d = D_k + 2h_2 - U_d, \quad (13)$$

де: D_k – зовнішній діаметр деформуючого елементу, мм; $2h_2$ – подвоєна висота позаконтактної зони за ДЕ, мм; U_d – пружне відновлення обробленого отвору, мм.

Та залежність (14) для розрахунку пружного відновлення обробленого отвору:

$$U_d = \frac{D_k \cdot \sigma_i}{\sqrt{3} \cdot E} \cdot [K_1^2 \cdot (1 - \mu) + (1 + \mu)], \quad (14)$$

При деформуванні виробів із пластичних матеріалів зі значними наскрізними деформаціями, висота позаконтактної зони має суттєвий вплив на розмір обробленого отвору. Залежно від її величини та значення пружного відновлення, діаметр отвору може виявитися меншим (усадка отвору) або більшим (розбивка отвору) від діаметру деформуючого елементу.

На рисунку 15. представлені результати визначення пружного відновлення від сумарної деформації при виконанні її різним числом деформуючих елементів з різними натягами.

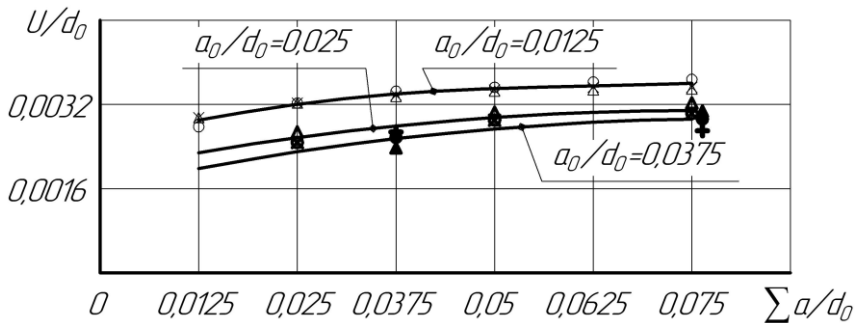


Рисунок 15 – Залежність зміни усадки отвору від сумарної деформації та деформації на один ДЕ при різній товстостінності

Статистична обробка результатів, наведених на рисунку 15, дозволила отримати інтерполяційну залежність (15) для розрахунку пружного відновлення:

$$U_d/d_0 = -0,201 \cdot \left(\sum \frac{a}{d_0}\right)^2 + 1,093 \cdot \left(\frac{a}{d_0}\right)^2 + 0,169 \cdot \frac{a}{d_0} \cdot \sum \frac{a}{d_0} + 0,0262 \cdot \sum \frac{a}{d_0} - 0,0941 \cdot \frac{a}{d_0} + 0,0036, \quad (15)$$

Залежність для розрахунку подвоєної висоти позаконтактної зони за деформуючим елементом ($2h_2$) також отримана обробкою результатів моделювання при різній товстостінності заготовки та обробці її з різними натягами на елемент.

$$2h_2 = 10,1 a/d_0 - (17,4 a/d_0) t_0/d_0, \quad (16)$$

Як було зазначено вище при деформуванні тонкостінних деталей має місце укорочення заготовки, в той же час при деформуванні товстостінних деталей присутнє подовження заготовки. На основі процесу симуляції деформування в широкому діапазоні зміни режимних параметрів, геометрії інструменту та товстостінності заготовки отримана аналітична залежність для визначення кута α^* , який забезпечує відсутність осьової деформації при обробці заготовки.

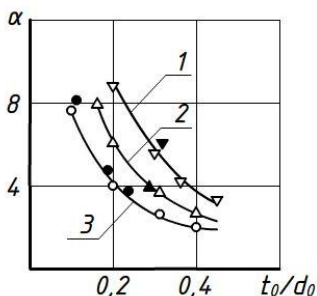


Рисунок 16 – Залежність кута α , який забезпечує відсутність осьових деформацій від товстостінності заготовки

$$\alpha^* = \frac{0,35(1 + 100 a/d_0)}{t_0/d_0}, \quad (17)$$

Для отримання необхідних осьових розмірів обробленої заготовки необхідно вибрати кут α із наступних умов: для отримання нульової зміни довжини кут $\alpha = \alpha^*$, для отримання укорочення $\alpha < \alpha^*$, для отримання подовження $\alpha > \alpha^*$.

Розроблено схему технологічного управління формоутворенням порожнистої циліндричної деталі (рис. 16), що дозволило визначити необхідні режими протягування і геометрію інструменту, які забезпечать отримання необхідних розмірів обробленої або відновленої деталі.

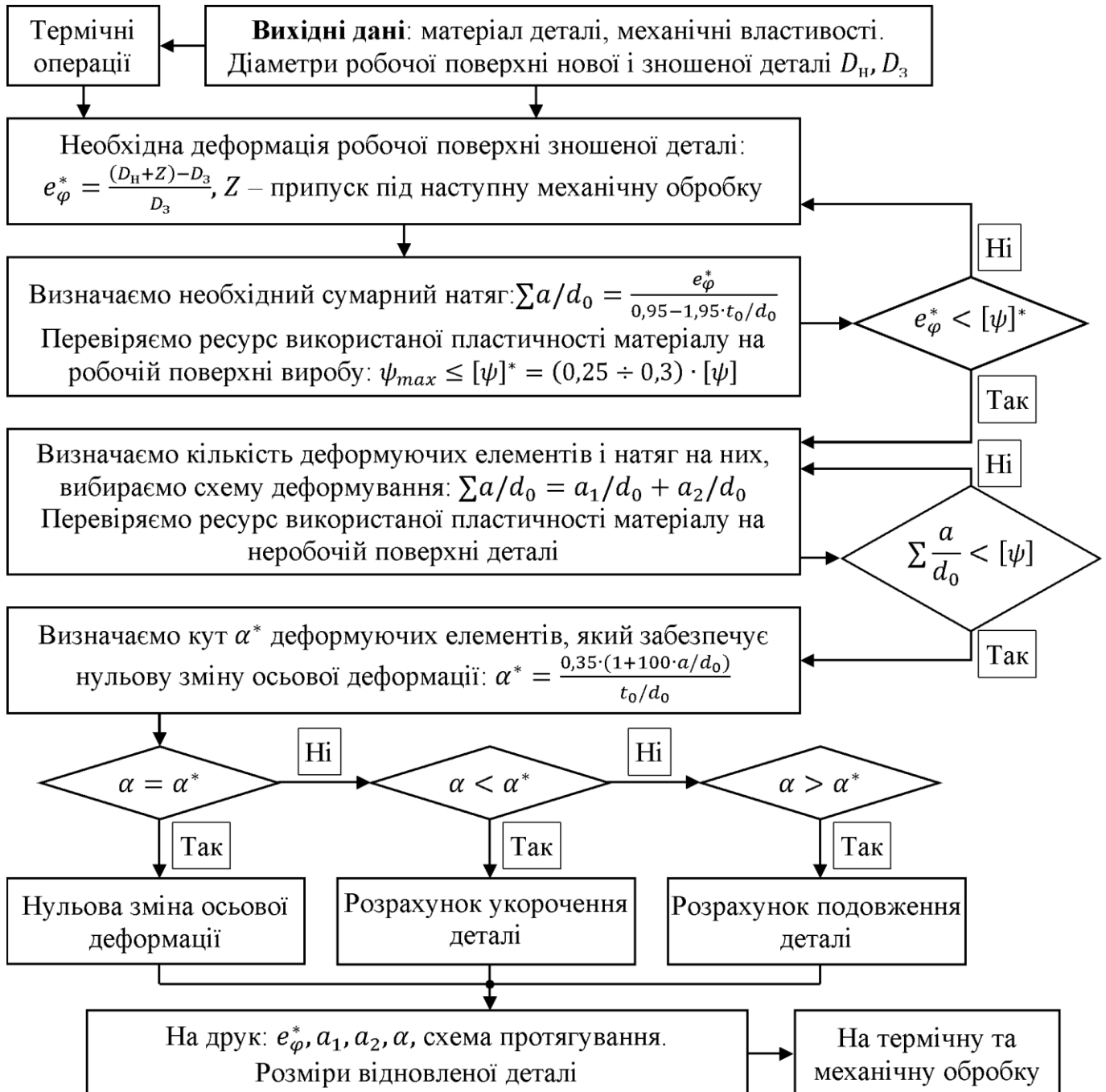


Рисунок 17 – Схема технологічного процесу відновлення або обробки циліндричних виробів з використанням пластичного деформування

Процес управління формоутворенням для заданої товстостінності заготовки здійснюється наступним чином. Спочатку визначається окружна деформація,

необхідна для компенсації зносу і забезпечення припуску під подальшу механічну обробку. Потім, за отриманою у результаті моделювання залежністю (11), визначаємо необхідний сумарний натяг на елемент $\sum a$ по залежності (12).

Якщо деталь в процесі обробки піддається термічним або хімічно-термічним операціям, обов'язково виконується перевірка використаного ресурсу пластичності.

Далі по залежності (13) з використанням залежностей (15 – 16) розраховуємо діаметр обробленого отвору. Після цього перевіряється використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні обробленого отвору.

Потім, по заданій товстостінності та визначеному натягу, який відповідальний за отримання необхідного розміру зовнішнього діаметру, визначаємо кут α^* , що забезпечує нульову зміну довжини заготовки.

У подальшому, залежно від вимог до деталі, виконуємо умови, за яких заготовка або подовжується $\alpha > \alpha^*$, вкорочується $\alpha < \alpha^*$ або її осьовий розмір залишається без змін $\alpha = \alpha^*$.

Розроблену схему можна застосовувати при проектуванні технологічних процесів обробки нових або відновлення зношених деталей з використанням ДПР.

На основі виконаних досліджень був розроблений технологічний процес виготовлення деталі «втулка», каталожний номер 809/00127, що використовується у шарнірах штока гідроциліндра задньої стріли екскаватора-навантажувача JCB моделей 3CX, 4CX. Розроблений технологічний процес з використанням операції ДПР дозволить на 30% знизити витрату металу на виготовлення цієї деталі.

Результати наукового дослідження та розроблений технологічний процес апробовано в групі «А.ТОМ» компанії «Пак-Трейд» (ФОП Томчук А.М.).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено та апробовано прикладну методику технологічного керування розмірними параметрами трубчастих заготовок при деформуючому протягуванні. Методика забезпечує прогнозування і керування осьовою деформацією, зміною зовнішнього і внутрішнього діаметрів та їх пружним відновленням після деформування. Підхід базується на поєднанні імітаційного моделювання напружено-деформованого стану в осередку деформації заготовки з експериментальною верифікацією результатів, що дозволило сформулювати інженерні рекомендації щодо вибору раціональних режимів деформування та геометрії інструменту. Отримані результати дали змогу сформулювати такі основні висновки:

1. Аналіз наукових публікацій з пластичного деформування підтвердив недостатню вивченість об'ємного деформування, особливо товстостінних заготовок. Обґрунтовано доцільність застосування методу скінченних елементів, що дозволить врахувати вплив геометрії інструменту, режимів обробки та товстостінності заготовки, на її формоутворення і використаний ресурс пластичності матеріалу.

2. Розроблено методику скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану в осередку деформації при деформуючому протягуванні у програмному комплексі DEFORM, яка забезпечує комплексну оцінку інтенсивності та компонентів тензорів напружень і деформацій, гідростатичного тиску, показника напруженого стану та використаного ресурсу пластичності матеріалу в будь-якій точці осередку деформації протягом усього циклу обробки.

3. Уточнено відому схему осередку деформації при деформуючому протягуванні, що дозволило встановити наступне:

- у зоні контакту матеріал заготовки перебуває у стані інтенсивного об'ємного стиску ($\eta = -5 \dots -8$), що дозволяє досягнути в ній значних пластичних деформацій, а на зовнішній поверхні напружений стан близький до двовісного розтягнення ($\eta = +2$), що підтверджує і розвиває експериментальні результати Ю.О. Цеханова;

- підтверджено, що при наявності на ділянці контакту критичного контактного тиску ($q = 1100 \dots 1300$ МПа) в позаконтактній зоні перед нею виникає зона локальної пластичної деформації, яка являє собою наплив матеріалу з ділянки контакту і збільшує її протяжність за рахунок зменшення цієї позаконтактної зони;

- встановлено одночасне виникнення зони локальної пластичної деформації за ділянкою контакту, яка обумовлена витіканням оброблюваного матеріалу, під дією критичного контактного тиску, із зони контакту на циліндричну стрічку деформуючого елемента, що призводить до зменшення висоти позаконтактної зони;

- встановлено необхідність враховувати наявність зон локальної пластичної деформації при розрахунку розмірів осередку деформації, використаного ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки та при проектуванні робочого профілю деформуючого елемента.

4. Порівняння результатів числового моделювання та експериментальних даних встановило, що на зміну деформованого стану заготовки ключовий вплив має поява критичного контактного тиску в осередку деформації, який визначає знак і величину осьової деформації.

Розбіжність між результатами скінченно-елементного моделювання та натурального експерименту по визначенню геометричних параметрів осередку деформації не перевищує 10 %, що підтверджує можливість використання розроблених моделей для керування розмірними параметрами деталей.

5. Встановлено, що руйнування заготовки може виникати як на внутрішній, так і на зовнішній поверхні. Руйнування зовнішньої поверхні характерне при деформуванні тонкостінних заготовок зі значними деформаціями отвору, де напружений стан відповідає жорсткій схемі вичерпання ресурсу пластичності – двовісному розтягу. Руйнування (мікрорушення) поверхневого шару отвору характерне для товстостінних заготовок, обумовлено появою зони локальної пластичної деформації за ділянкою контакту. Встановлено, що при виході матеріалу з ділянки контакту напружений стан змінюється від всебічного стиску до двовісного розтягу, при цьому з'являються позитивне значення гідростатичного тиску та осьові розтягуючі напруження. Це створює умови для різкого вичерпання ресурсу пластичності і, незважаючи на незначну окружну деформацію в позаконтактній зоні, призводить через декілька циклів деформації до повного вичерпання ресурсу пластичності і появи руйнування поверхневого шару отвору.

6. Встановлено особливості деформування заготовки при обробці групою деформуючих елементів:

- на внутрішній поверхні накопичена деформація та використана пластичність матеріалу залежать від товстостінності заготовки, сумарної деформації, кількості деформуючих елементів та їх геометрії. Мінімум використання ресурсу пластичності

забезпечується мінімальним числом деформуючих елементів з максимальних натягом на елемент та оптимальним кутом нахилу твірної робочого конуса – $\alpha = 2 \dots 4^\circ$;

- на зовнішній поверхні накопичена деформація та параметр пластичності не залежить від геометрії деформуючих елементів, а визначається лише сумарним натягом і товстостінністю заготовки;

- запропоновані залежності для визначення сумарної інтенсивності деформацій та сумарної використаної пластичності при обробці заготовок групою деформуючих елементів;

- удосконалено відому схему деформування групою деформуючих елементів за рахунок послідовного використання ресурсу пластичності матеріалу спочатку на зовнішній поверхні, а потім на внутрішній. Основну частину деформації отвору доцільно здійснювати групою деформуючих елементів зі значними натягами на елемент $a/d_0 \geq 0,0375$, що дозволяє мінімізувати використання ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки, далі – групою елементів з незначними натягами на елемент $a/d_0 \leq 0,0125$, що забезпечує необхідний використаний ресурс пластичності на внутрішній і зовнішній поверхнях та сприятливо позначається на параметрах якості обробленого поверхневого шару.

7. Розроблено шляхи оптимізації формоутворення заготовок, що полягають у технологічному впливі режимів протягування і геометрії інструменту на розміри зовнішньої й внутрішньої поверхонь, а також на осьовий розмір обробленої заготовки:

- встановлено, що складова тензора окружної деформації e_φ , яка характеризує деформацію зовнішньої поверхні заготовки, практично не залежить від величини кута α і визначається виключно значенням натягу на елемент і товщиною стінки заготовки. Визначено функціональну залежність між окружною деформацією зовнішньої поверхні та сумарним натягом, яка дає змогу визначити величину натягу, що забезпечує задане значення параметра e_φ ;

- удосконалена методика визначення діаметру обробленого отвору за рахунок результатів, отриманих при симулюванні процесу. Отримані розрахункові залежності для визначення параметрів, необхідних для розрахунку діаметру обробленого отвору. Запропоновано інтерполяційну залежність для визначення пружного відновлення отвору. Встановлений зв'язок діаметра обробленого отвору з режимами протягування та товстостінністю заготовки;

- показано необхідність перевірки виконаної деформації зовнішньої та внутрішньої поверхонь деталі після деформування по параметру використаної пластичності;

- показано, що після визначення необхідних окружних деформацій зовнішньої поверхні та отвору слід визначити кут α^* , який забезпечує відсутність осьової деформації. На основі моделювання процесу деформування та порівняння результатів із експериментальними даними та наступною статистичною обробкою отримано аналітичну залежність для визначення кута α^* , який є керувальним параметром для визначення осьової деформації заготовки. Для забезпечення необхідних осьових розмірів обробленої заготовки кут α деформуючого елемента слід обирати з таких

умов: за відсутності зміни довжини $\alpha = \alpha^*$, для отримання укорочення $\alpha < \alpha^*$, а для забезпечення подовження $\alpha > \alpha^*$;

– розроблено схему керованої зміни розмірів циліндричних виробів при їх деформуванні, що дало змогу визначити необхідні режими деформуючого протягування і геометрію інструменту, які забезпечать досягнення заданих розмірів обробленої або відновленої деталі при дотриманні вимог до параметра якості – використаного ресурсу пластичності.

8. Наведені результати апробовані при розробці технологічного процесу виготовлення деталі «втулка», каталожний номер 809/00127, з використанням операції деформуючого протягування, що дає змогу знизити витрату металу на виготовлення цієї деталі до 30%. Розроблений технологічний процес та результати наукового дослідження апробовано в групі «А.ТОМ» компанії «Пак-Трейд» (ФОП Томчук А.М.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

1. Nemyrovskiy Ya. B., Otamanskyi V. V., Melnyk O. L., Shepelenko I. V., Posviatenko N. I. Improving the technology for restoring worn parts based on cold plastic deformation. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29, No 3/113. P. 31–42. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-113-3-31-42> (Здобувачем розроблено методику та виконано комп'ютерне моделювання процесу ДПР, взято участь в аналізі результатів та розробленні схеми технологічного процесу обробки деталей).

2. Отаманський В. В. Управління параметрами формоутворення при деформуючому протягування з наскрізною пластичною деформацією. *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2025. Вип. 82. С. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.82.4> (Стаття є одноосібною. Здобувачем виконано літературний аналіз, проведено моделювання та узагальнено результати).

3. Nemyrovskiy Y. B., Shepelenko I. V., Otamanskyi V. V., Melnyk O. L., Vasylyv T. I. Plasticity of workpieces processed by deforming broaching with through deformations. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. 2025. Vol. 12(2), P. D9–D24. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d2) (*Web of Science*, *фахове видання категорія А*) (Здобувачем розроблено методику та виконано чисельне моделювання процесу ДПР, досліджено вплив технологічних параметрів на НДС і використаний ресурс пластичності матеріалу, отримано розрахункові залежності).

Статті у наукових виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та Web of Science:

4. Nemyrovskiy Y., Otamanskyi V., Melnyk O., Shepelenko I., Nochvai V. Stress-strain state during deforming broaching of plastic materials workpieces. *Advanced Manufacturing Processes VI. InterPartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer. Cham. 2025. P. 545–556. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_48 (*Scopus*) (Здобувачем виконано чисельне моделювання, досліджено НДС заготовки та встановлено вплив технологічних параметрів на осьові розміри виробу).

5. Nemyrovskiy Y., Otamanskyi V., Shepelenko I., Melnyk O., Stepchyn Y. Simulation of the forming scheme during deforming broaching of parts with through deformation. Smart innovations in energy and mechanical systems. SIEMS 2025. Lecture notes in networks and systems. Vol 1480. Springer. Cham. 2025. P. 90–99. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_9 (Scopus) (Здобувачем виконано чисельне моделювання та експериментальні дослідження процесу ДПР, встановлено умови виникнення критичного контактного тиску й зон локальної пластичної деформації).

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу:

6. Otamanskyi V., Nemyrovskiy Y. Formation of local plastic deformation areas in the deformation zone during deforming broaching of workpieces with through deformations. *Annali d'Italia*. 2025. Vol. 74. P. 134–139. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18079376> (Здобувачем виконано чисельні та експериментальні дослідження, уточнено геометричні характеристики осередку деформації та отримано залежність для визначення критичної товщини стінки).

Патенти:

7. Збірна деформуюча протяжка : пат. 161508 Україна : МПК 2025.01, B23D 43/00. № u 2025 02990 ; заявл. 20.06.2025 ; опубл. 10.12.2025, Бюл. № 50, 3 с. (Здобувачем обґрунтовано конструктивні параметри збірної деформуючої протяжки).

Розділи в монографіях:

8. Відновлення деталей комбінованими технологіями на основі пластичного деформування : колективна монографія / за загальною редакцією Немировського Я. Б., Сторчака М. Г., Шейкіна С. Є., Шепеленка І. В. Харків : «Діса плюс», 2025. 673 с. (Здобувачем підготовлено частину 4-го розділу, а саме матеріали щодо дослідження НДС та формоутворення виробу при ДПР).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Немировський Я. Б., Мельник О. Л., Отаманський В. В. Використання методів холодного пластичного деформування для відновлення зношених деталей. Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 9–10 листопада 2023 року. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С.46–49. (Здобувачем виконано аналіз перспектив використання ДПР).

10. Немировський Я. Б., Шепеленко І. В., Отаманський В. В. Новітні технології відновлення деталей автотракторної техніки з використанням пластичного деформування. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції "Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems", 17-19 квітня 2024 року. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. С. 55–57. (Здобувачем отримана залежність окружної деформації зовнішньої поверхні деталі від технологічних параметрів процесу ДПР).

11. Отаманський В. В., Березівська М. Г., Шахов Д. К., Сторчак М. Г. Вплив геометричних параметрів інструменту на формоутворення при деформуючому протягуванні. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 13–17 травня 2024 року. Житомир : «Житомирська політехніка», 2024. С.134–135. (Здобувачем виконано

чисельне моделювання та проаналізовано вплив технологічних параметрів на осьові розміри виробу).

12. Немировський Я. Б., Шепеленко І. В., Отаманський В. В. Управління формоутворенням осесиметричної заготовки при деформуючому протягуванні зі значними деформаціями. Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024): інженерія, матеріали, технології, транспорт : збірник наукових доповідей міжнародної конференції, 14-16 травня 2024 року. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. С. 198–200. (Здобувачем отримана залежність нульової зміни осьового розміру виробу від технологічних параметрів ДПР).

13. Немировський Я. Б., Шепеленко І. В., Отаманський В. В., Шахов Д. К. Використання методу кінцевих елементів для вивчення технологічних процесів на основі холодного пластичного деформування. Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2024). Тези двадцять четвертої міжнародної науково-технічної конференції, 20 – 23 вересня 2024 року. Харків : НТУ "ХПІ", 2024. С.103–105. (Здобувачем розроблено методику комп'ютерного моделювання процесу ДПР).

14. Немировський Я. Б., Отаманський В. В., Цісельський Д. С., Шепеленко І. В. Оптимізація схеми формоутворення при деформуючому протягуванні, як основа відновлення зношених деталей. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: матеріали тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, 11-12 грудня 2024 року. Одеса : Одеський національний морський університет, 2024. С.108–110. (Здобувачем виконано аналіз особливостей формоутворення при ДПР).

15. Немировський Я. Б., Отаманський В. В., Цмех Д. С. Технологія відновлення зношених осесиметричних деталей з застосуванням методів холодного пластичного деформування. Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 25–26 березня 2025 року. Київ : АТМ України; Житомир : ПП "Рута", 2025. С.124–126. (Здобувачем обґрунтовано вибір параметрів ДПР для забезпечення необхідних розмірів відновлених деталей).

16. Василів Т. І., Кудрявцев С. М., Павлюк Я. В., Степанюк Д. В., Отаманський В. В. Технології обробки осесиметричних пустотілих деталей пластичним деформуванням. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 12–17 травня 2025 року. Житомир : «Житомирська політехніка», 2025. С.138. (Здобувачем обґрунтовано доцільність імітаційного моделювання перед впровадженням технології у виробництво).

17. Отаманський В. В., Мельник О. Л., Широбоков В. В., Грева Д. В. Оцінка впливу форми твірної деформуючого елемента на ресурс використаної пластичності матеріалу при деформуючому протягуванні. Збірник наукових праць XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 11–13 листопада 2025 року. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. С.87–90. (Здобувачем проведено імітаційне моделювання і аналіз впливу форми твірної ДЕ на ресурс використаної пластичності матеріалу).

АНОТАЦІЯ

Отаманський В. В. Технологічне забезпечення розмірних параметрів циліндричних виробів деформуючим протягуванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Державний університет «Житомирська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Житомир, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – наукове обґрунтування і забезпечення розмірних параметрів циліндричних виробів при їх деформуючому протягуванні (прошиванні) за рахунок вибору геометрії деформуючого елемента, режимів обробки та товстостінності заготовки.

Виконано комплексний аналіз напружено-деформованого стану заготовок при деформуючому протягуванні з наскрізною пластичною деформацією металу, що дало змогу поглиблено дослідити механіку їх пластичного деформування та виявити чинники, які визначають формування розмірів і вичерпання ресурсу пластичності.

Досліджено особливості деформування заготовок при обробці групою деформуючих елементів. Отримано залежності для визначення сумарної інтенсивності деформацій і ресурсу пластичності при обробці групою деформуючих елементів.

Встановлено зв'язок між окружною деформацією зовнішньої поверхні та сумарним натягом на отвір, та отримано залежність для визначення натягів, необхідних для забезпечення заданої окружної деформації. Удосконалено підхід до визначення діаметра обробленого отвору шляхом використання даних числового моделювання. Розроблено аналітичну залежність для визначення кута нахилу твірної робочого конуса α^* , що забезпечує відсутність осьової деформації. Показано, що за допомогою вибору кута α відносно визначеного раніше кута α^* , можна отримувати подовження або укорочення заготовки під час обробки.

На основі отриманих залежностей розроблено схему технологічного керування формоутворенням циліндричних виробів, який забезпечує вибір раціональних режимних параметрів та геометрії інструменту для досягнення необхідних розмірів нових чи відновлених деталей.

Ключові слова: деформуюче протягування, деформуючий елемент, осередок деформації, пластичне деформування, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, використаний ресурс пластичності.

ABSTRACT

Otamanskyi V. V. Technological assurance of dimensional parameters of cylindrical products by deforming broaching. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

Thesis for a Candidate's Degree in Engineering in Specialty 05.02.08 "Machining Technology". – Zhytomyr Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and technical problem – providing a scientific rationale and ensuring the dimensional parameters of cylindrical components during deforming broaching (burnishing) by selecting the geometry of the deforming element, processing modes, and the wall thickness of the workpiece.

A comprehensive analysis of the stress-strain state of workpieces subjected to deforming broaching with through-thickness plastic deformation of the metal has been carried out. This made it possible to investigate in depth the mechanics of plastic deformation and to identify the factors that determine the dimensional formation and the exhaustion of the available plasticity resource of the material.

The features of workpiece deformation under processing by a group of deforming elements have been investigated. Dependencies have been established for determining the total strain intensity and the plasticity resource when processing with multiple deforming elements.

A relationship between the circumferential strain of the outer surface and the total tension on the hole has been determined, and a dependency for calculating the tensions required to ensure a specified circumferential strain has been obtained. The approach to determining the diameter of the processed hole has been improved by using numerical simulation data. An analytical dependence has been developed to determine the inclination angle of the generatrix of the working cone α^* , which ensures zero axial deformation. It has been shown that by selecting the angle α relative to α^* , either elongation or shortening of the workpiece can be achieved during processing.

Based on the obtained dependencies, an algorithm for technological control of the shape formation of cylindrical parts has been developed. It provides a rational choice of processing parameters and tool geometry to achieve the required dimensions of new or restored parts.

Keywords: deforming broaching, deforming element, deformation zone, plastic deformation, finite element method, stress-strain state, plasticity resource.

Підписано до друку 23.06.2026 р. Формат 60х90 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. аркушів 1,4. Наклад 100 прим.

Віддруковано з готових оригіналів-макетів автора
у Державному університеті «Житомирська політехніка»
10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103