

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОТАМАНСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 621.787.4

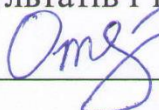
ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.02.08 – Технологія машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 В.В. Отаманський

Науковий керівник: Немировський Яків Борисович, д.т.н., доцент

Житомир – 2026

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 деформуючим протягуванням за рахунок вибору геометрії деформуючого елемента, режимів обробки та товстостінності заготовки.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, в яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи, що отримані при комп'ютерному моделюванні та експериментальних дослідженнях процесу деформуючого протягування заготовок з наскрізною пластичною деформацією.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, гіпотезу, об'єкт та предмет дослідження, визначено основні завдання роботи. Подано відомості про наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробацію, а також наведено перелік наукових публікації за тематикою дисертаційного дослідження.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан досліджень формоутворення заготовок деформуючим протягуванням. Встановлено, що різні автори пропонують експериментально отримані залежності для визначення розмірів виробів після деформуючого протягування, але вони мають певні протиріччя і не завжди узгоджуються з фактичними розмірами

оброблених заготовок у реальних умовах виробництва. Відома теоретична модель, побудована на варіаційних принципах, адекватно описує процес деформування тонкостінних заготовок, проте демонструє суттєві розбіжності з експериментальними даними при деформуванні товстостінних заготовок. Встановлено, що в більшості робіт автори відзначають наявність осьових деформацій укорочення, хоча існують дані про наявність осьових деформацій подовження. Аналіз наукових джерел показав, що для процесів деформуючого протягування циліндричних заготовок із кінцевою товщиною стінки та наскрізною пластичною деформацією металу відсутній єдиний цілісний підхід до технологічного забезпечення необхідних розмірів.

Виявлено, що використаний ресурс пластичності є ключовим фактором забезпечення бездефектної зміни розмірів, однак точність відомих експериментально-розрахункових методик є недостатньою для надійної оцінки його залежності від технологічних параметрів. Показано доцільність дослідження механіки пластичного деформування заготовок із застосуванням методу скінченних елементів, який демонструє високу ефективність у задачах подібного типу та створює передумови для подальшого формування аналітичних моделей процесу деформуючого протягування.

У другому розділі для вивчення процесу деформуючого протягування з наскрізною пластичною деформацією обґрунтовано вибір матеріалу заготовки, а саме сталі 12ХН3А. Для мінімізації обсягу досліджень сформовано раціональний підхід до вибору геометричних параметрів заготовок на основі теорії подібності, що дає можливість отримувати результати у безрозмірному вигляді та забезпечує їх відтворюваність при великому різноманітті розмірів виробів. Крім того, визначено напрями уточнення фізико-механічних характеристик матеріалу, що необхідно для

імітаційного моделювання процесу деформуючого протягування та розрахунку використаного ресурсу пластичності матеріалу.

Розроблено методику дослідження осередку деформації із застосуванням методу скінченних елементів у програмному комплексі DEFORM 2D/3D. На основі результатів моделювання сформовано методику визначення геометричних характеристик осередку деформації, що дозволяє оцінювати довжину контакту, протяжність та висоту позаконтактної зони, величину пружної усадки отвору після обробки.

У третьому розділі на основі методу скінченних елементів виконано комплексний аналіз напружено-деформованого стану заготовок зі кінцевою товщиною стінки при деформуючому протягуванні, що дало змогу поглиблено дослідити механіку їх пластичного деформування та виявити чинники, які визначають формування розмірів і вичерпання ресурсу пластичності матеріалу. Встановлено, що напружено-деформований стан таких заготовок має складний характер: матеріал у зоні контакту перебуває в умовах інтенсивного об'ємного стиску, тоді як на зовнішній поверхні домінує двовісний розтяг, що зумовлює руйнування як на внутрішній, так і на зовнішній поверхні.

Уточнено відому схему осередку деформації за рахунок виявлення двох характерних зон локальної пластичної деформації, що виникають на межах контактної та позаконтактних ділянок за наявності критичного контактного тиску. Показано їх вплив на формування геометрії осередку деформації, накопичення пошкоджень та проєктування інструменту. Встановлено умови, за яких виникає руйнування внутрішньої поверхні у вигляді мікрорушення. Воно пов'язане з появою осьових розтягуючих напружень у зоні виходу металу з ділянки контакту.

Досліджено особливості деформування заготовок при обробці групою деформуючих елементів. Показано, що накопичення деформацій і використання ресурсу пластичності на внутрішній поверхні визначається

геометрією інструменту, товстостінністю заготовки, сумарною деформацією та кількістю елементів, тоді як на зовнішній поверхні ці параметри залежать переважно від натягу та товстостінності. Отримано залежності для визначення сумарної інтенсивності деформацій і використаного ресурсу пластичності при обробці групою деформуючих елементів.

Удосконалено схему деформування заготовок групою елементів шляхом послідовного використання ресурсу пластичності: спочатку на зовнішній, а потім на внутрішній поверхні оброблюваних заготовок. На цій основі розроблено рекомендації для проєктування інструменту для чорнкової обробки, що передбачають застосування першої групи деформуючих елементів зі значними натягами для формоутворення діаметру зовнішньої поверхні та отвору при мінімальному вичерпанні ресурсу пластичності і подальшу обробку групою деформуючих елементів із малими натягами для забезпечення параметрів якості внутрішньої поверхні.

У четвертому розділі показано, що керування схемою формоутворення є ключовим фактором забезпечення необхідних розмірів деталей як при виготовленні нових виробів, так і при відновленні зношених. Це дає змогу формувати припуски на подальшу механічну обробку або компенсувати знос поверхонь, забезпечуючи задані геометричні параметри. Більш того, ці дані можуть бути використані для вибору заготовки, деформування якої наблизить її розміри до розмірів деталі.

Оригінальність розробленого підходу полягає в тому, що зміна режиму деформування в осередку деформації пов'язана з досягненням критичного контактного тиску. Показано, що на його появу визначально впливають натяг, геометрія інструмента та товстостінність заготовки.

Встановлено функціональний зв'язок між окружною деформацією зовнішньої поверхні та сумарним натягом на отвір, який не залежить від кута робочого конуса, а визначається лише товстостінністю заготовки та

величиною натягу. На основі цього отримано залежність для визначення натягів, необхідних для забезпечення заданої окружної деформації.

Удосконалено підхід до визначення діаметра обробленого отвору шляхом використання даних числового моделювання. Отримані розрахункові залежності дозволяють враховувати вплив режимів протягування й товстостінності заготовки для більш точного прогнозування кінцевого діаметра.

За результатами моделювання отримано 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. Нульова зміна довжини забезпечується визначеним кутом α^* .

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

Проведено апробацію результатів досліджень в групі «А.ТОМ» компанії «Пак-Трейд» (ФОП Томчук А.М.). Показано, що за допомогою використання деформуючого протягування можна скоротити металоємність заготовок для виготовлення деталей типу «втулка» з каталожним номером 809/00127, яка використовується у шарнірах штока гідроциліндра задньої стріли екскаваторів-навантажувачів до 30%.

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.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.02.08 «Mechanical engineering 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 – scientific justification and ensuring the dimensional parameters of cylindrical products by deforming broaching through the selection of the deforming element geometry, processing modes, and wall thickness of the workpiece.

The content of the dissertation research is presented in four chapters, which present and substantiate the main results of the paper obtained through computer simulation and experimental studies of deforming broaching process of workpieces with through plastic deformation.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the aim, hypothesis, object, and subject of the study, and defines the main tasks of the paper. It provides information about the scientific novelty and practical significance of the obtained results, their testing, and lists scientific publications on the topic of the dissertation research.

The first chapter analyzes the current state of research on the shaping of workpieces by deforming broaching. It has been established that various authors propose experimentally obtained dependencies for determining the dimensions of products after deforming broaching, but they have certain contradictions and do not always agree with the actual dimensions of processed workpieces in real production conditions. A well-known theoretical model based on variational

principles adequately describes the deformation process of thin-walled workpieces, but shows significant discrepancies with experimental data when deforming thick-walled workpieces. It has been established that in most works, authors note the presence of axial shortening strains, although there are data on the presence of axial elongation strains. An analysis of scientific sources has shown that for the deforming broaching processes of cylindrical workpieces with finite wall thickness and through plastic deformation of metal, there is no single comprehensive approach to the technological provision of the required dimensions.

It has been found that the used plasticity resource is a key factor in ensuring defect-free dimensional changes, but the accuracy of known experimental and computational methods is insufficient for a reliable assessment of its dependence on technological parameters. The expediency of studying the mechanics of plastic deformation of workpieces using the finite element method, which demonstrates high efficiency in tasks of this type and creates prerequisites for the further formation of analytical models of the deforming broaching process, is shown.

In the second chapter, to study the process of deforming broaching with through plastic deformation, the choice of workpiece material, namely 12HN3A steel, is justified. To minimize the scope of research, a rational approach to the selection of geometric parameters of workpieces has been developed based on the similarity theory, which makes it possible to obtain results in a dimensionless form and ensures their reproducibility for a wide variety of product sizes. In addition, directions for refining the physical and mechanical characteristics of the material have been determined, which is necessary for simulation modeling of the deforming broaching process and calculation of the resource of the used plasticity of the material.

A method for studying deformation zone using the finite element method in the DEFORM 2D/3D software package has been developed. Based on the simulation results, a method for determining the geometric characteristics of the

deformation zone has been developed, which allows estimating the contact length, the extension and height of the non-contact zone, and the amount of elastic shrinkage of the hole after processing.

In the third chapter, based on the finite element method, a comprehensive analysis of the stress-strain state of workpieces with finite wall thickness during deforming broaching was performed, which made it possible to thoroughly investigate the mechanics of their plastic deformation and identify the factors that determine the formation of dimensions and the exhaustion of the material's plasticity resource. It has been established that the stress-strain state of such workpieces is complex: the material in the contact zone is under intense volumetric compression, while biaxial tension dominates on the outer surface, causing destruction on both the inner and outer surfaces.

The known deformation zone scheme has been refined by identifying two characteristic areas of local plastic deformation that arise at the boundaries of contact and non-contact areas in the presence of critical contact pressure. Their influence on the formation of the deformation zone geometry, damage accumulation, and tool design has been shown. The conditions under which the inner surface is destroyed in the form of micro-peeling have been established. This is associated with the appearance of axial tensile stresses in the zone where the metal exits the contact area.

The peculiarities of workpiece deformation during processing by a group of deforming elements have been investigated. It has been shown that the accumulation of strains and plasticity resource on the inner surface is determined by the tool geometry, workpiece wall thickness, total strain, and number of elements, while on the outer surface these parameters depend mainly on tension and wall thickness. Dependencies have been obtained for determining the total strain intensity and resource of used plasticity during processing by a group of deforming elements.

The scheme for deforming workpieces by a group of elements has been improved by the sequential use of plasticity resources: first on the outer surface, then on the inner surface of the processed workpieces. On this basis, recommendations have been developed for the design of roughing tools, which provide for the use of the first group of deforming elements with significant tensions for forming the diameter of the outer surface and the hole with minimal exhaustion of the plasticity resource, and further processing by a group of deforming elements with small tensions to ensure the quality parameters of the inner surface.

The fourth chapter shows that controlling the forming process scheme is a key factor in ensuring the required dimensions of parts, both in the manufacture of new products and in the restoration of worn ones. This makes it possible to form allowances for further machining or to compensate for surface wear, ensuring the specified geometric parameters. Moreover, these data can be used to select a workpiece whose deformation will bring its dimensions closer to the dimensions of the part.

The originality of the developed approach lies in the fact that the change of the deformation mode in the deformation zone is associated with the achievement of critical contact pressure. It is shown that its occurrence is significantly influenced by the tension, the tool geometry, and the wall thickness of the workpiece.

A functional connection has been established between the circumferential strain of the outer surface and the total tension on the hole, which does not depend on the working cone angle, but is determined only by the wall thickness of the workpiece and the tension value. Based on this, a dependence has been obtained for determining the tensions required to ensure the specified circumferential strain.

The approach to determining the diameter of the machined hole has been improved by using numerical simulation data. The obtained calculated

dependencies allow taking into account the influence of broaching modes and workpiece wall thickness for more accurate prediction of the final diameter.

Based on the simulation results, an analytical dependence was obtained for determining the inclination angle of the working cone generatrix α^* , which ensures the absence of axial strain. It is shown that by selecting the angle α relative to the previously determined angle α^* , it is possible to obtain elongation or shortening of the workpiece during processing. Zero change in length is ensured by a defined angle α^* .

Based on the obtained dependencies, a scheme for technological control of hollow axisymmetric parts forming has been developed, which ensures the selection of rational operating parameters and tool geometry to achieve the required dimensions of new or restored parts.

The research results were tested at the «A.TOM» group of the «Pack-Trade» company (IE Tomchuk A.M.). It was shown that through the use of deforming broaching, it is possible to reduce the metal consumption of workpieces for the manufacture of “bushing” type parts with catalog number 809/00127, which are used in the joints of the hydraulic cylinder rod of the backhoe loader's rear boom, by up to 30%.

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

Список публікацій здобувача

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. № и 2025 02990 ; заявл. 20.06.2025 ; опубл. 10.12.2025, Бюл. № 50, 3 с. (Здобувачем обґрунтовано конструктивні параметри збірної деформуючої протяжки).

Монографії:

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 елементу 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).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННЮ	33
1.1 Деформуюче протягування, як процес холодного пластичного деформування	33
1.2. Формоутворення заготовок, оброблених деформуючим протягуванням	39
1.3. Осередок деформації при ДПР, його кінематичні та геометричні параметри.....	45
1.3.1. Схема осередку деформації.....	45
1.3.2. Розміри та особливості складових осередку деформації, довжини контакту та позаконтактних зон	48
1.4. Напружено-деформований стан при ДПР	54
1.4.1. Напружений стан при ДПР	55
1.4.2. Деформований стан при ДПР	59
1.5. Пластичність при ДПР	62
1.5.1. Експериментальні методи визначення граничної деформації до руйнування при різних напружених станах.....	72
1.6. Висновки за розділом 1	76
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, УСТАТКУВАННЯ ТА АПАРАТУРА	78
2.1. Обґрунтування вибору матеріалу для проведення досліджень	78
2.2. Обґрунтування вибору розмірів досліджуваних заготовок та планування експериментів.....	80
2.3. Обладнання та інструмент для проведення досліджень	84

2.4. Методика визначення розмірів оброблюваної заготовки.....	85
2.5. Методика визначення осьових деформацій оброблюваної заготовки	86
2.6. Експериментальна методика визначення фактичної довжини контакту інструмента з оброблюваною поверхнею	88
2.7. Методики визначення фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу	90
2.7.1. Методика побудови кривої течії при стисненні та розтягуванні зразків досліджуваних матеріалів	90
2.7.2. Методика визначення граничної деформації до руйнування при рівномірному двохосьовому розтягуванні.....	93
2.7.3. Методика визначення деформації до руйнування при деформуванні зразків з обмеженням окружної деформації при значних від'ємних показниках напруженого стану	95
2.7.4. Методика побудови діаграми пластичності.....	97
2.8. Методика імітаційного моделювання схеми осередку деформації та визначення напружено-деформованого стану при ДПР заготовок із пластичних матеріалів програмним комплексом «DEFORM»	97
2.8.1. Визначення довжини контактної зони	101
2.8.2. Визначення висоти позаконтактної хвилі та довжини l_2	101
2.9. Методика визначення використаного ресурсу пластичності під час ДПР	104
2.10. Висновки за розділом 2	105
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАГОТОВОК ТА ОЦІНКА ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ	
3.1. Уточнення схеми взаємодії інструмента з заготовкою при ДПР....	106

3.1.1. Особливості схеми осередку деформації при зміні товстостінності заготовки	106
3.1.2. Варіанти схеми осередку деформації при зміні товстостінності заготовки.....	110
3.1.3. Критична товщина стінки і її вплив на осередок деформації ..	113
3.2. Напружено-деформований стан при деформуючому протягуванні заготовок із пластичних металів.....	116
3.2.1. Вплив товстостінності заготовки на НДС.....	119
3.2.2. Вплив товстостінності заготовки на деформований стан при ДПР	125
3.3. Пластичність матеріалу заготовок, оброблених деформуючим протягуванням та вплив на неї технологічних факторів процесу	131
3.3.1. Історія деформування матеріалу на внутрішній та зовнішній поверхні заготовки при ДПР.....	131
3.3.2. Уточнення діаграми пластичності матеріалу для сталі 12ХН3А	136
3.3.3. Приріст використання ресурсу пластичності.....	143
3.3.4. Вплив кількості деформуючих елементів, на використання ресурсу пластичності матеріалу	145
3.3.5. Причини руйнування матеріалу на внутрішній поверхні обробленої заготовки	150
3.3.6. Вплив геометрії деформуючого елемента на використання ресурс пластичності матеріалу оброблених поверхонь	153
3.3.7. Вплив форми твірної деформуючого елемента на пластичність обробленої поверхні	159
3.3.8. Шляхи управління використанням ресурсу пластичності матеріалу при ДПР	160
3.4. Висновки за розділом 3	164

РОЗДІЛ 4. КЕРУВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯМ ПРИ	
ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ ЗАГОТОВОК З КІНЦЕВОЮ	
ТОВЩИНОЮ СТІНКИ ІЗ ПЛАСТИЧНИХ МЕТАЛІВ.....	167
4.1. Деформації заготовки під час обробки деформуючим протягуванням	
та їх вплив на формоутворення	167
4.2. Деформації на зовнішній поверхні оброблених заготовок та	
забезпечення її розміру	169
4.3. Деформації на внутрішній поверхні оброблених заготовок та	
забезпечення її розміру	171
4.4. Осьові деформації та формоутворення довжини заготовки	178
4.5. Розробка технологічного процесу обробки деталі «втулка» з	
використанням деформуючого протягування	182
4.6. Висновки за розділом 4	189
ВИСНОВКИ	191
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	196
ДОДАТКИ	215

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Позначення	Пояснення
<i>Перелік скорочень термінів:</i>	
ДПР	деформуюче протягування
ХПД	холодне пластичне деформування
НДС	напружено-деформований стан
ДЕ	деформуючий елемент
МСЕ	метод скінченних елементів
<i>Геометричні й технологічні параметри процесу:</i>	
d_d	діаметр по стрічці деформуючого елемента, мм
b_d	ширина стрічки деформуючого елемента, мм
α	кут нахилу твірної робочого конуса деформуючого елемента, град
α_1	кут нахилу твірної зворотного конуса, град
ϑ_d	швидкість протягування м/с
a	натяг на деформуючий елемент, мм
$\sum a_i$	сумарний номінальний натяг, мм
a/d_0	відносний натяг
d_0	початковий внутрішній діаметр заготовки, мм
d	кінцевий внутрішній діаметр заготовки, мм
D_0	початковий зовнішній діаметр заготовки, мм
D	кінцевий зовнішній діаметр заготовки, мм
t_0	початкова товщина стінки заготовки, мм
t	кінцева товщина стінки заготовки, мм
L_0	початкова довжина заготовки, мм
L	кінцева довжина заготовки, мм
Δ	пружна усадка обробленого отвору, мм

Δ_1	пружна розбивка обробленого отвору, мм
l_0	геометрична довжина контакту, мм
l_4	повна довжина позаконтактної зони після ділянки контакту, мм
l_k	довжина контакту, мм
l_1	довжина позаконтактної зони перед ділянкою контакту, мм
l_3	довжина пластичної ділянки позаконтактної зони після ділянки контакту, мм
$h_{в.з.}$	висота позаконтактної зони перед ділянкою контакту, мм
h_2	висота позаконтактної зони за ділянкою контакту, мм
<i>Параметри напружено-деформованого стану:</i>	
σ_0	інтенсивність напружень, МПа
$\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\varphi$	радіальні, осьові і окружні напруження, МПа
σ	гідростатичний тиск, МПа
σ_T	границя текучості, МПа
σ_{rz}	тангенціальні напруження, МПа
ε_0	інтенсивність деформації
$\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\varphi$	радіальні, осьові і окружні деформації
ε_θ	швидкість деформації, 1/с.
E	модуль Юнга, ГПа
μ	коефіцієнт Пуассона
η	коефіцієнт жорсткості напруженого стану
$e_{пр}, (\eta)$	гранична деформація матеріалу при заданому η

ВСТУП

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 [1, 2]. 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 [3–9] та експериментальні дослідження [3, 10–13, 21–33] здебільшого орієнтовані або на тонкостінні, або на заготовки з безкінечною товщиною стінки [3], 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 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 осової 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.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННЮ

1.1 Деформуюче протягування, як процес холодного пластичного деформування

Відомо, що деформуюче протягування (прошивання) (ДПР) – це процес холодного пластичного деформування (ХПД), при якому деформуючі елементи (ДЕ) інструменту переміщуються з натягом уздовж твірної оброблюваного отвору з ковзанням по його поверхні. В залежності від пластичного деформування деформуюче протягування згідно матеріалів [1, 3, 12] поділяють на декілька основних видів: вигладжуюче (зменшення вихідної шорсткості поверхні отвору); калібруюче, зміцнююче (підвищення фізико-механічних характеристик металу оброблюваної заготовки); формоутворююче (профілююча формоутворююча обробка отворів, що характеризується значними наскрізними деформаціями заготовки). Під час обробки можуть застосовувати поверхневе деформування, при якому пластичні деформації виникають тільки на внутрішній поверхні заготовки, а зовнішня залишається без змін, та об'ємне – при якому пластично деформується весь переріз заготовки і змінюються всі її розміри. Розрізняють процеси вільного деформуючого протягування, при якому відсутні обмеження деформацій зовнішньої поверхні, та заневоленого – виконується в жорстких або пружних обоймах, які обмежують деформацію зовнішньої поверхні [1, 3, 12].

Деформуюче протягування має вагомий ряд переваг у порівнянні з іншими методами обробки отворів [1, 3, 14, 15]:

- простота виконання самого процесу, а також конструкції інструменту;

- збереження суцільності матеріалу при відновлені спрацьованих деталей завдяки перерозподілу матеріалу виробу на зношені ділянки;
- підвищення фізико-механічних властивостей матеріалу оброблюваного виробу;
- деформуюче протягування дозволяє скоротити час протікання наступних термічних та хіміко-термічних операцій за рахунок подрібнення структури металу;
- поліпшена технологічна спадковість дає змогу зберегти параметри якості деталей, навіть у разі використання додаткових фінішних операцій;
- забезпечення відсутності негативного впливу процесу на навколишнє середовище;
- можливість автоматизації процесу, що забезпечує застосування ХПД в умовах масового виробництва.

Даний процес є високопродуктивним і дозволяє за один прохід отримувати отвори точністю 6-9-го квалітетів з шорсткістю $Ra = 0,08-0,32$ мкм, з можливістю зміцнення обробленої поверхні до 30% в порівнянні з вихідною твердістю, причому глибина наклепу поверхневого шару досить значна і досягає до 0,2 мм [1, 8, 16].

Деформування заготовки може здійснюватися на горизонтально-протяжних верстатах, де тягова сила прикладається до інструменту перед деформуючими елементами, такі інструменти називаються деформуючими протяжками (рис. 1.1, а). Або ж процес може виконуватися на пресовому обладнанні, де сила штовхання прикладається за деформуючими елементами, у цьому випадку інструменти називають деформуючими прошивками (рис. 1.1, б). При цьому характер перебігу процесу деформування залишається однаковим і не залежить від обраного методу обробки [1, 17]. В обох випадках використовується інструмент простої конструкції, до якої входять сталний загартований стержень, на який насаджені декілька робочих твердосплавних деформуючих елементів

конічної форми, діаметри яких поступово збільшуються і перевищують вихідний діаметр заготовки на величину натягу.

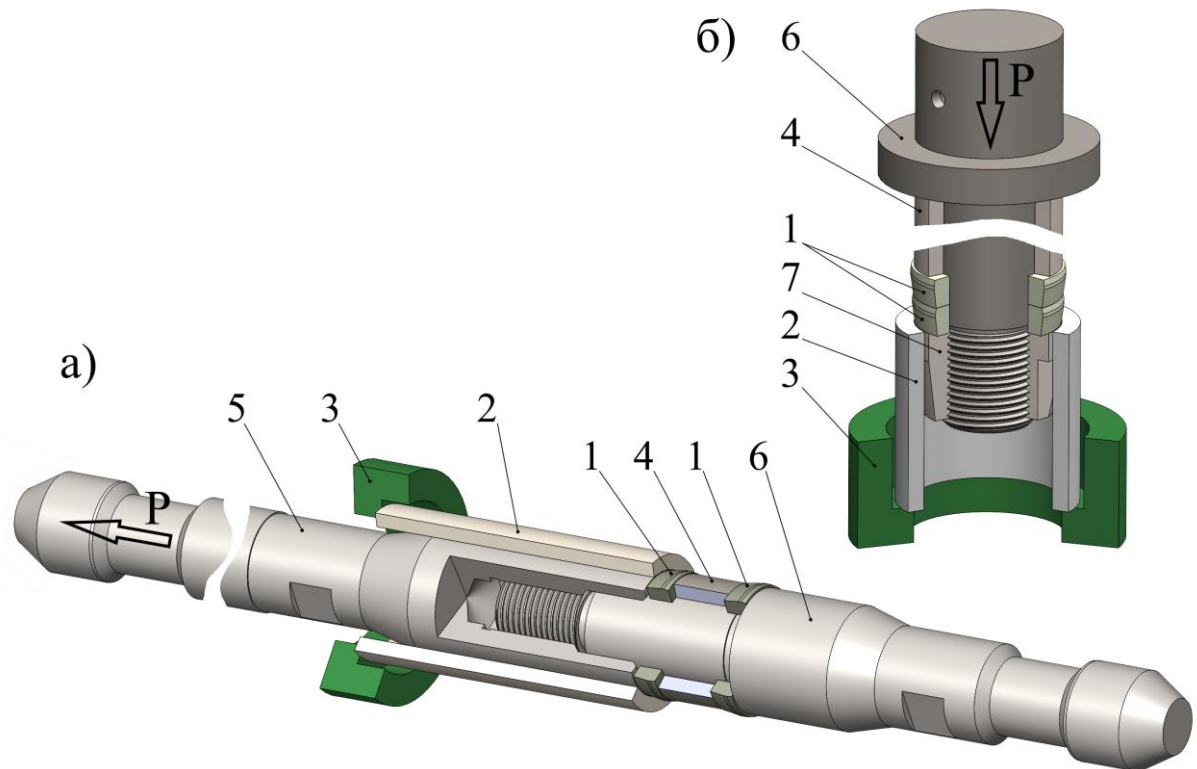


Рисунок 1.1 – Схема обробки: а) деформуюче протягування;
б) деформуюче прошивання

1 – деформуючі елементи, 2 – деталь, 3 – опора, 4 – дистанційна втулка,
5 – передній хвостовик, 6 – оправка, 7 – гайка

Деформуючий елемент має такі основні геометричні параметри: d_d – діаметр циліндричної ділянки деформуючого елемента, b_d – ширина циліндричної ділянки ДЕ, α – кут нахилу твірної робочого конуса, α_1 – кут нахилу твірної зворотного конуса (рис. 1.2).

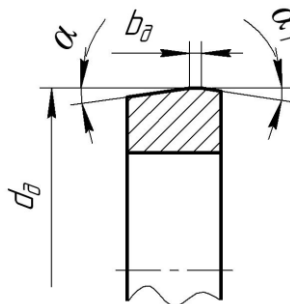


Рисунок 1.2 – Основні геометричні параметри деформуючого елемента

До основних параметрів процесу деформуючого протягування (прошивання) відносять: швидкість переміщення інструменту відносно заготовки – v_d , м/хв.; натяг – a , мм, який визначається різницею діаметра циліндричної ділянки деформуючого елемента і вихідного отвору ($a = d_d - d$); відносний натяг – a/d_0 , який є відношенням натягу до розміру вихідного отвору. Крім того, важливим параметром деформуючого протягування є сумарний номінальний натяг $\sum a_i$, показник загальної номінальної пластичної деформації заготовки при деформуючому протягуванні, що визначається зміною її геометричних параметрів після проходження через один або кілька ДЕ. Якщо деформація відносна, то вона представляється як $\sum a/d_0$. Важливим геометричним параметром процесу ДПР є кут нахилу твірної робочого конуса деформуючого елемента α .

Аналіз публікацій дозволяє виділити декілька напрямків досліджень у галузі пластичного деформуючого протягування (прошивання) отворів.

У роботах Wan N. та ін. [18, 19], Fu Y. та ін. [20] проведено узагальнення відомостей щодо процесів пластичного деформування при прошиванні деформуючого інструменту (оправок, дорнів, куль, кілець) через отвори кріпильних елементів. Авторами проаналізовано механізми формування залишкових напружень, їх вплив на втомну довговічність деталей, а також сучасні технологічні схеми ХПД отворів. Експериментальні дослідження, наведені в роботах [21–24], підтверджують ефективність ХПД щодо підвищення втомної міцності алюмінієвих, титанових та високоміцних сталевих сплавів.

Вплив геометричних параметрів інструменту (кута конуса ДЕ, ширини циліндричної стрічки ДЕ, величини натягу) на НДС заготовки аналізується у дослідженнях Calaf-Chica J. та ін. [25], Baltach A. та ін. [26]. Автори пропонують оптимізацію конусності оправок для вирівнювання залишкових напружень по товщині деталі. З метою зменшення неоднорідності зміцнення Curto-Cárdenas D. та ін. [27], Su M. та ін. [28]

дослідили схеми послідовного деформування кількома кулями або дворазового прошивання конічним елементом, що дозволяє мінімізувати шкідливі зони розтягуючих напружень та покращити втомну довговічність матеріалу.

Дослідженню напружено-деформованого стану за допомогою тривимірного МСЕ присвячено роботи [29–33]. Автори детально аналізують кінематику пластичної течії металу, встановлюючи, що найбільш чутливою до тертя та нерівномірності деформацій є торцева зона входу оправки.

Практично всі представлені закордонні роботи [18–33] присвячені локальному зміцненню отворів у пластинах для підвищення втомної довговічності. Питання формування кінцевих розмірів деталей, їх геометричної точності, допусків та керування розмірними параметрами виробів дослідниками не аналізуються. Напружено-деформований стан розглядається як локальний (в умовах площини з отвором). Схеми наскрізної пластичної деформації стінки заготовки вздовж усієї її довжини, що є характерним для деформуючого протягування труб та втулок, у цих роботах не представлені.

Також слід зазначити, що переважна більшість робіт [25–33] орієнтована на застосування складних чисельних методів (FEM) та експериментів. При цьому практично відсутні прості аналітичні моделі та інженерні методики, які дозволяли б аналітично прогнозувати та розраховувати кінцеві геометричні розміри циліндричного виробу після деформуючого протягування.

Сучасні підходи до холодного формоутворення отворів у трубчастих заготовках дедалі більше орієнтовані на встановлення керованого зв'язку між технологічними параметрами, локальним напружено-деформованим станом в осередку деформації та кінцевою геометрією виробу після розвантаження, виходячи за межі звичайного опису ступеня деформування. У зв'язку з цим у дослідженнях останніх років, з одного боку, активно

розвиваються статистичні та оптимізаційні підходи, які переводять геометричні вимоги до виробу в систему керування технологічними факторами, забезпечуючи інженера правилами призначення режимів [34, 35]. З іншого боку, активно досліджують технологічні модифікації протягування, у яких завдяки геометрії інструмента та обраній схемі деформування можна цілеспрямовано перерозподіляти деформації [36]. Важливим кроком у цьому напрям і стало впровадження критеріїв, що пов'язують режими протягування та геометрію інструменту з рівнем контактних напружень та запасом пластичності поверхневого шару [37]. Для надійного прогнозування формозміни застосовують ідентифіковані конститутивні моделі тертя, а також експериментально підтверджені оцінки впливу конструкції інструменту та мастильного середовища на умови контактної взаємодії та осьове зусилля [38, 39]. Аналогічну методологію демонструють дослідження холодного деформування отворів, де параметричний аналіз геометрії інструменту та натягу поєднано з числовим моделюванням залишкових напружень. Використання багатоступеневих інструментальних схем у таких роботах дозволяє прогнозувати кінцевий діаметр та оцінити пружне відновлення після останнього проходу [25, 27]. Окремий напрям створюють праці, що деталізують механізми зниження тертя, зокрема через мікротекстурування інструмента, і систематизують фактори, які визначають залишкові напруження після деформаційних операцій, формуючи для технолога практичну карту керування процесом [40–43].

При проєктуванні процесу протягування та конструювання інструменту необхідно знати можливість цього процесу для забезпечення показників якості обробленої заготовки.

Експериментальні дослідження процесу деформуючого протягування відображені в працях багатьох авторів, серед яких Бусел Ю.Ф., Гриценко Е.І., Кривошея В.В., Кузнєцов А.М., Монченко В.П.,

Проскуряков Ю.Г., Чернявський О.В., Benseddiq N., Calaf-Chica J., Creager M., Curto-Cardenas D., Davidson T.E., Kendall D.P., Phillips J.L., Rodman G.A.. В той же час автори Грушко О.В., Немировський Я.Б., Огородніков В.А., Посвятенко Е.К., Розенберг О.М., Розенберг О.О., Цеханов Ю.О., Шейкін С.Є., Шепеленко І.В., Gibson M.C., Li J., Liu C., Yue Z. розглядали різні аспекти деформуючого протягування, застосовуючи наряду з експериментами – аналітичні рішення. В даний час з позицій механіки пластичного деформування сформульовані наукові основи технологічного управління мікрорельєфом та параметрами шорсткості обробленої поверхні [1, 46], забезпечення точності оброблених деталей [1, 14], мікрорельєфу та параметрів шорсткості, а також зміцнення поверхневого шару при деформуючому протягуванні [1, 11, 40–43, 46–48], встановлення впливу антифрикційних покриттів на процес протягування [44, 45, 49].

1.2. Формоутворення заготовок, оброблених деформуючим протягуванням

Одним із найменш вивчених параметрів якості є формоутворення заготовок, оброблених деформуючим протягуванням (прошиванням), яке полягає в отриманні необхідних розмірів при наскрізній деформації, а саме діаметрів обробленого отвору і зовнішньої поверхні та осьового розміру, що в подальшому визначає припуск під наступну механічну обробку.

У більшості ранніх робіт, що стосуються визначення розмірів обробленої заготовки [3, 17, 50–52], розглядалося тільки статистичне опрацювання експериментальних даних.

Історія розвитку деформуючого протягування показує, що спочатку питання визначення параметрів формоутворення, а відповідно й самої схеми формоутворення заготовки, не було актуальним. Це пов'язано з тим, що

процес здійснювався за допомогою деформуючих елементів із загартованих інструментальних сталей. В результаті виникали лише незначні поверхневі пластичні деформації отвору, що дозволяло тільки зменшити шорсткість поверхні та підвищити її твердість [11]. Стійкість таких елементів була обмеженою (десятки погонних метрів труб). Можливості деформуючого протягування були обмежені і його використовували для обробки з малими поверхневими пластичними деформаціями, наприклад, виготовлення маловідповідальних деталей, таких як втулки сільськогосподарських машин [1, 11, 17].

Із широким впровадженням у виробництво алмазного інструменту з'являється можливість виготовлення й використання твёрдосплавних деформуючих елементів [1, 17, 53]. Удосконалення їх конструкцій [1, 53–55] на основі експериментального вивчення схеми взаємодії інструменту з деталлю [3] і технології їх виготовлення, розширили сфери використання ДПР. З'явилася можливість виконувати значні (наскрізні) пластичні деформації, які суттєво змінювали розміри оброблюваних заготовок. Почали обробляти товстостінні деталі з важкооброблюваних матеріалів при значних силових навантаженнях. Висока зносостійкість і міцність твёрдосплавних деформуючих елементів давала змогу обробляти десятки кілометрів труб без помітного зносу [1, 11, 17, 46, 53]. Це значно покращувало продуктивність обробки і точність оброблюваних виробів.

Обробка заготовок трубного виробництва чорною деформуючою протяжкою зі значними наскрізними деформаціями призводить до істотної пластичної зміни геометричних розмірів трубчастої заготовки без зняття стружки. Це забезпечує зниження некруглості отвору заготовки на 1-2 порядки та локалізацію її поверхневого дефектного шару металургійного походження, що включає збіднений вуглецем метал, раковини, поверхнєве відшарування тощо [1, 3, 11, 47]. При цьому розміри заготовки за рахунок її пластичної деформації змінюються і наближаються до необхідних розмірів

деталі. Зазначене дає змогу віднести цей технологічний процес до ресурсозберігаючих за металом, продуктивністю та енергозбереженням [1–3, 11, 17, 56].

Використання ДПР для чорнової обробки глибоких отворів у деталях значної довжини ($l/d > 10$) та діаметрів таких як: гідроциліндрів та пневмоциліндрів, циліндри амортизаторів і нафтових насосів, шахтних стійок, карданних валів, камер спеціального призначення, корпусів заглибних насосів тощо, стримується не тільки підвищеними вимогами до точності форми обробленого отвору, а й визначенням параметрів формоутворення при деформуючому протягуванні [1–3, 17, 31, 56].

У науковій літературі відомо декілька підходів до опису формоутворення заготовок при деформуючому протягуванні. За даними, що наведені в роботі [1], відомо, що запропоновані формули В.П. Монченка для розрахунку зміни товщини стінки та укорочення заготовки після ДПР враховують конструкцію деталі, схему обробки та ступінь деформації, проте не відображають вплив кута α і умов тертя, що не завжди призводить до відповідності розрахункових результатів з експериментальними даними.

Рівняння (1.1, 1.2, 1.3), запропоновані Ю.Г. Проскуряковим [12], забезпечують задовільну відповідність даним для товстостінних заготовок, але, як показують результати інших авторів [3, 10], їх застосування до тонкостінних заготовок дає значні розбіжності.

$$t = t_0 - 0,5 \cdot a \cdot \left[1 - m \cdot \left(1 - \frac{\ln m}{2 - k_\sigma} \right)^3 \right], \quad (1.1)$$

$$D = d + 2 \cdot t, \quad (1.2)$$

$$L = L_0 \cdot \left[1 - \frac{a \cdot (1 - 2 \cdot \ln m - k_\sigma)}{d_0 \cdot (2 - \ln m - k_\sigma)} \right], \quad (1.3)$$

де: t_0 – товщина стінки заготовки, мм;

d_0 – діаметр отвору заготовки, мм;

a – натяг, мм

$m = D_0/d_0$ – відносна товщина стінки;

k_σ – коефіцієнт осевих напружень;

d – діаметр отвору після ДПР, мм;

t – товщина стінки після ДПР, мм.

З метою підвищення достовірності розрахунків у ряді робіт [3, 17] запропоновано використовувати експериментально встановлені залежності (1.4, 1.5, 1.6) формозміни. Проте вони отримані для фіксованого кута $\alpha = 4^\circ$ і відображають характерні зміни розмірів: зменшення товщини стінки, збільшення зовнішнього діаметра та укорочення заготовки.

$$\frac{t}{t_0} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{d}{d_0}, \quad (1.4)$$

$$D - D_0 = (d - d_0) \cdot \left(1 - \frac{t_0}{d_0}\right), \quad (1.5)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\frac{d}{d_0} + \frac{t_0}{d_0} \cdot \left(1,5 - 0,5 \cdot \frac{d}{d_0}\right)}{1 + \frac{t_0}{d_0}} \cdot \left(1,5 - 0,5 \cdot \frac{d}{d_0}\right), \quad (1.6)$$

Подальші дослідження [5, 13, 57–60, 62] продемонстрували, що кут α чинить істотний вплив на закономірності формоутворення, особливо на осеві розміри. Так, за даними [57], при кутах $\alpha > 6^\circ$ навіть у випадку роздавання за схемою стиснення може спостерігатися подовження заготовки, що суперечить загальноприйнятим уявленням про її укорочення.

Наведені дані вказують, що до завдань формоутворення заготовок при деформуючому протягуванні належить не тільки визначення інтегрального параметра, до якого належать отримані розміри заготовок після її протягування зі значними наскрізними пластичними деформаціями, а і управління процесом отримання необхідних розмірів за рахунок вибору режимів протягування, геометрії інструменту та товстостінності заготовки. Ці розміри, як зазначалось вище, характеризуються збільшенням внутрішнього і зовнішнього діаметрів, потоншенням товщини стінки обробленої заготовки. Що стосується осевого розміру заготовки, тобто

осьового компонента тензора деформації, то, на думку більшості авторів [3, 12, 17, 50, 51, 61], має місце укорочення деталі, тобто зменшення її вихідної довжини. Однак, як відзначалося вище, автори робіт [5, 13, 57–60] експериментально показали, що в деяких випадках може мати місце подовження деталі.

Наведені протиріччя не дають можливість чітко сформулювати схему управління формоутворенням заготовки, тобто здійснити отримання необхідного окружного та осьового розмірів після її деформування.

Як приклад, важливості формоутворення, при відновленні зношеної деталі, розглянемо розроблений в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України вискоєфективний технологічний процес відновлення поршневих пальців на основі деформуючого протягування [1, 59, 63].

Усі пальці, незалежно від їхніх розмірів, мають однакову конструкцію у вигляді осесиметричного циліндра з отвором та фасками (рис. 1.3). Зовнішня поверхня пальця піддається загартуванню до твердості HRC 60 – 62, що забезпечує високу зносостійкість, тоді як серцевина зберігає достатню пластичність [64].

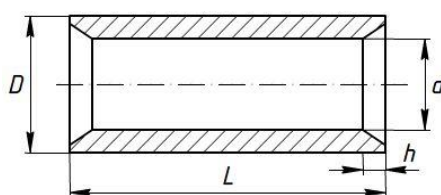


Рисунок 1.3 – Типова конструкція поршневого пальця

Однією з основних вимог при виборі технології відновлення є забезпечення параметрів якості відновленої деталі на рівні не нижче нової [56, 65]. При відновленні зношених поршневих пальців особливо важливо отримання необхідного осьового розміру [59].

Аналіз відомих методів відновлення поршневих пальців (шліфування в ремонтний розмір, залізнення, термопластична та електрогідравлічна

роздача, електроконтактне нагрівання з комбінованим розпилювальним охолодженням) показав наявність істотних недоліків [66–69]. Зокрема, методи на основі термічних деформацій призводять до утворення небажаної мікроструктури цементованого шару (мартенсит із включенням цементиту, залишкового аустеніту й трооститу), що свідчить про порушення вимог технології термообробки цементованих сталей [59]. Це зумовлює появу бракувальних ознак – залишкового аустеніту, зон зі зниженою твердістю, тріщин у цементованому шарі.

Крім того, зазначені методи не забезпечують достатнього припуску під подальшу механічну обробку, характеризуються високою енергоємністю, потребують спеціального обладнання і не відповідають сучасним екологічним вимогам. Усе це знижує стабільність експлуатаційних характеристик відновлених поршневих пальців і обмежує застосування традиційних підходів.

Застосування технології деформуючого протягування для відновлення поршневих пальців [1, 3, 59, 63] забезпечує необхідну пластичну течію матеріалу у напрямку до зношених ділянок, що дозволяє компенсувати знос і сформувати припуск під подальшу механічну обробку. На основі експериментальних досліджень авторами [1, 59, 63] було досягнуто вирішення проблеми забезпечення розмірної точності зовнішньої поверхні пальця шляхом використання схема деформації пальця зі зміною опорного торця [70]. Також проведені експериментальні дослідження, на основі яких був вибраний необхідний геометричний параметр інструменту [59, 63].

Разом з тим, залишаються невирішеними питання встановлення зв'язку між деформацією отвору пальця та зміною його зовнішньої поверхні. Відсутність такої залежності обмежує можливості оптимізації схеми формоутворення заготовки шляхом вибору раціональних режимів протягування і геометричних параметрів інструменту.

Для детального вивчення цих питань необхідно проаналізувати процеси, які мають місце в осередку деформації та більш поглиблено розглянути осередок деформації при деформуючому протягуванні.

1.3. Осередок деформації при ДПР, його кінематичні та геометричні параметри

1.3.1. Схема осередку деформації

Як зазначено вище, схема осередку деформації є ключовим аспектом при вивченні схеми формоутворення заготовки, а також при управлінні напружено-деформованим станом при ДПР. Кінематичні, геометричні та енергетичні параметри осередку визначають форму та розміри обробленої деталі, енерговитрати на процес та параметри якості оброблених виробів.

У науковій літературі подано різні схеми осередку деформації при деформуючому протягуванні. У працях технологічного напрямку Проскуряков Ю.Г., Schwenzfeier W.F. та ін. [12, 50] автори зазначають, що ДЕ контактує з оброблюваною поверхнею заготовки по робочому конусу, циліндричній стрічці та зворотному конусу. Зауважуючи, що така схема адекватна переважно для обробки за малих натягів.

В подальшому автори досліджень [12] допускають виникнення позаконтактних зон пластичної деформації, які виникають при великих натягах та залежать від схеми деформування й від кута робочого конуса ДЕ. Автори підкреслюють, що для покращення якості обробки важливо уникати режимів деформування, які можуть спричинити виникнення позаконтактних зон. Вони наголошують про необхідність ретельного вибору параметрів обробки для досягнення оптимальних механічних властивостей труб і запобігання негативних режимів їх обробки.

В роботах з обробки металів тиском та близьких за змістом до ДПР – волочіння труб на короткій оправці, осесиметричне штампування, прокат, приймають іншу схему, яка включає контактну зону та дві позаконтактні – передня і задня [61, 71, 72]. Експерименти Чепурка М.І. [61] показують, що істотна позаконтактна деформація виникає і до, і після ДЕ навіть для товстостінних труб, при цьому зазначається неможливість визначення граничних умов осередку деформації.

Розв’язання задачі, виконане Б. Авицуром [52] методом верхніх оцінок із використанням геометричних припущень безмоментної теорії оболонок (точне прилягання оброблюваних поверхонь заготовки до інструмента та «різкий» перехід від конуса до циліндра), також не відтворює реальну картину роздачі та стиснення і приводить до якісно некоректних висновків, зокрема до прогнозування потовщення стінки замість характерного для процесу її стоншення.

Найбільш детально осередок деформації при ДПР експериментально вивчався в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України. Результати його вивчення відображені в роботах [3, 11, 17]. Вона подібна до схем, застосованих у більшості робіт, що відносяться до області обробки металів тиском. Схема осередку деформації представлена на рисунку 1.4.

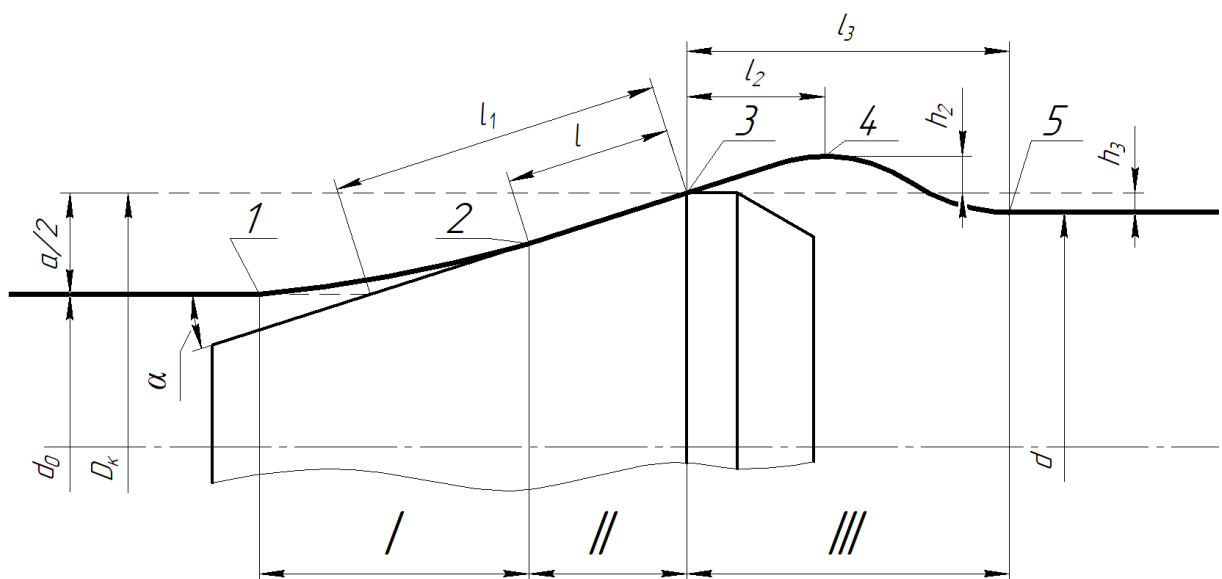


Рисунок 1.4 – Схема осередку деформації [3]

Запропонована схема свідчить про наявність контактної зони II, перед якою є позаконтактна зона I, та після якої слідує позаконтактна зона III. Слід зазначити, що деформування в різних зонах осередку деформації є єдиним процесом пластичного формоутворення заготовки і одночасно на всіх трьох ділянках визначає напружено-деформований стан (НДС) деталі і параметри, що від нього залежать.

Перша зона виникає внаслідок пластично-пружних радіальних деформацій і повороту поперечного перерізу на деякий кут, який поступово збільшується від нуля в точці 1 до свого максимуму в точці початку контакту з конічною поверхнею – 2. Автори роботи [3] зазначають, що за рахунок даного явища реальна довжина контакту – l є меншою за геометричну довжину контакту – l_2 , але при цьому вказують, що в деяких випадках може виникати перевищення довжини $l > l_2$ за рахунок можливого утворення напливу матеріалу з зони контакту на конічній поверхні інструменту.

Автор роботи [73] має іншу думку стосовно геометрії першої неконтактної зони. Він вважає, що максимальні напруги виникають в місці, що відповідає максимальному радіусу ділянки контакту. Але результати досліджень Цеханова Ю.А. [8], які отримані методом ділильних сіток, однозначно не підтверджують даної думки.

При переході позаконтактної зони деформації у контактну (точка 2 рис. 1.4) матеріал починає контактувати з конічною поверхнею інструменту (зона контакту II) аж доки не дійде її кінця – точки 3.

На початку III-ї позаконтактної зони матеріал продовжує пластично деформуватись і у точці 4 на відстані l_2 від зони контакту спостерігається вершина позаконтактної зони. Після цього відбувається пружне розвантаження. Як зазначено у роботі [3], якщо величина пружного розвантаження буде більшою за висоту позаконтактної зони, то діаметр обробленого отвору (точка 5 рис. 1.4) стане меншим за діаметр

деформуючого елемента. При значних натягах висота позаконтактної зони може бути більшою за величину пружного розвантаження, тоді діаметр обробленого отвору стає більшим за діаметр деформуючого елемента. Таким чином автор робить висновок, що висота позаконтактної зони III в значній мірі визначає діаметр обробленого отвору.

У роботі [9] досліджується деформований стан у позаконтактних зонах осередку деформації, визначаючи їх форму та розміри за умовою мінімуму потужності пластичної формозміни. Автори підтверджують, що деформований стан змінюється в межах сполучення контактної ділянки з позаконтактними зонами. Однак аналіз тільки позаконтактних зон не дає змоги повністю визначити кінематичні та геометричні параметри всього осередку деформації.

У результаті проведеного аналізу та подальшого розвитку експериментальних досліджень О.А. Розенберг [3] сформулював низку важливих висновків, які стосуються особливостей формування осередку деформації.

- довжина контакту при обробці заготовок із кінцевою товщиною стінки не залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу, а її залежність від товщини стінки має екстремальний характер;

- зміна висоти позаконтактної зони в залежності від товщини стінки також має немонотонний характер.

1.3.2. Розміри та особливості складових осередку деформації, довжини контакту та позаконтактних зон

Проведений вище аналіз показав, що найбільш об'єктивною схемою осередку деформації є схема, згідно якої осередок деформації складається з трьох ділянок: ділянки контакту та двох позаконтактних зон, сполучених з нею. Всі ці ділянки осередку деформації пов'язані між собою, залежать одна

від одної і утворюють єдиний процес формозміни заготовки. Так автори [3] вказують, що довжина контактної ділянки визначається довжиною позаконтактної зони перед інструментом, які залежать від геометричних параметрів інструмента та режимів протягування. А довжина і висота позаконтактної зони після проходження інструменту визначається процесами, які відбуваються у контактній зоні. Варто зазначити, що процеси, які відбуваються в контактній зоні, в свою чергу, також залежать від геометрії інструменту, режимів протягування та товстостінності заготовки.

Разом з тим, вивчення розмірів та особливостей деформування в осередку деформації, довжини контакту та позаконтактних зон є важливим питанням. Саме вони визначають протяжність контактної зони, контактний тиск і напряму впливають на показники якості обробленої поверхні заготовки [1, 3, 11, 17]: шорсткість та мікрорельєф обробленої поверхні, її зміцнення та глибину зміцнення, точність форми та розміри обробленої заготовки, залишкові напруження. Тобто знання умов деформування в осередку деформації дасть можливість обрати необхідну геометрію інструменту та режими обробки для досягнення необхідного параметра якості.

Визначення довжини контакту та параметрів позаконтактних зон експериментальними методами було проведено в роботах [3, 74, 75]. Автори цих робіт експериментально визначили протяжність контактної ділянки, форму, висоту та протяжність позаконтактних зон. Ними було виконано поділ заготовок на три групи згідно їх товстостінності. Перша група – це заготовки оболонкового типу з товстостінністю $t_0/d_0 < 0,05$. Друга група – це заготовки з кінцевою товщиною стінки, їх товстостінність $t_0/d_0 < 1$. І третя група – це заготовки з так званою безкінечною товщиною стінки, товстостінність їх $t_0/d_0 > 1$. Напружений стан кожної групи має певні відмінності.

Форма та розміри позаконтактних зон за ділянкою контакту встановлювалися з використанням оригінальних методик, розроблених в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України [1, 3], які базуються на застосуванні тензOMETричних пристроїв для реєстрації геометричних параметрів позаконтактної зони за ділянкою контакту. Осцилограми, отримані за зазначеною методикою, свідчать про те, що позаконтактна зона має характерні геометричні параметри (рис. 1.5): при значній довжині — як загальній l_4 , так і до точки максимуму (пластичної частини зони) — l_3 , що досягає кількох десятків міліметрів, висота відповідної хвилі залишається незначною і становить лише десяті частки міліметра.

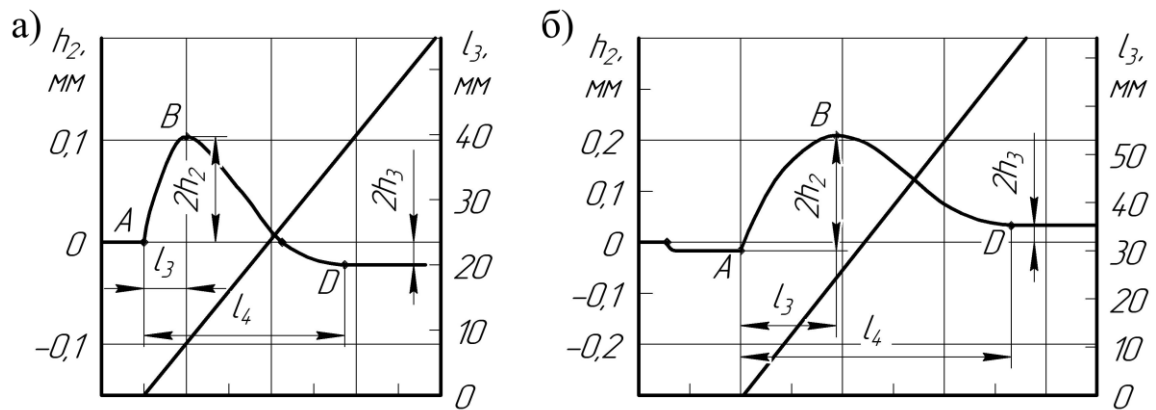


Рисунок 1.5 – Осцилограми позаконтактної зони за деформуючим елементом при обробці сплаву АК6 [3]:

- а) $d_0 = 64$ мм, $t_0 = 6,6$ мм, $a = 0,92$ мм, $\alpha = 4^\circ$, $2h_3$ – усадка отвору;
 б) $d_0 = 114,5$ мм, $t_0 = 15,85$ мм, $a = 1,91$ мм, $\alpha = 4^\circ$, $2h_3$ – розбивка отвору

У роботі [12] автори стверджують, що довжина контакту на робочому конусі менша за геометричну довжину на величину пружної деформації. Вони наводять розрахункові залежності визначення довжини позаконтактної зони від відносної товщини стінки D/d та від радіуса заготовки r_1 , та роблять висновок, що точка контакту з конічною поверхнею інструменту залежить від жорсткості деталі, зі збільшенням діаметру отвору заготовки та при незмінній товщині стінки довжина та висота ділянки перед контактом збільшується.

Позаконтактній зоні після сходження матеріалу з конічної поверхні автори [12] приділяють малу увагу, наголошуючи на тому, що схема деформації подібна тій, що відбувається у першій неконтактній зоні, за винятком точки переходу з пластичної деформації у пружну, у якій відбувається перенавантаження.

Дослідження О.О. Розенберга та О.М. Розенберга [3] при обробці втулок зі сплаву АК-6, сталі 10, сталі 20, сталі 38ХМЮА різної товстостінності, деформуючим елементом з кутом $\alpha = 4^\circ$ та різними натягами показують, що на довжину контактної та позаконтактної зони матеріал майже не впливає. Залежність висоти позаконтактної зони від товщини стінки носить екстремальний характер. Збільшення товщини стінки призводить спочатку до збільшення висоти позаконтактної зони до певного максимуму, після чого вона починає зменшуватися.

Подальше уточнення схеми осередку деформації виконувалось авторами робіт [4, 6], в яких описано теоретичну модель осередку деформації для роздачі тонкостінних заготовок оболонкового типу $t_0/r_0 \leq 0,1$, де t_0 і r_0 – відповідно товщина стінки та радіус отвору заготовки. Ця модель, побудована з використанням варіаційних принципів [76], дозволила визначити геометричні параметри осередку деформації, а саме: протяжність ділянок I, II та III (рис. 1.4).

Автори порівнюють отримані розрахункові значення з експериментальними даними отриманими у роботі [3] (рис. 1.6).

Як видно з графіків зі збільшенням товщини стінки осьові розміри позаконтактних зон (криві 2 та 3) монотонно зростають і добре співпадають зі значеннями експериментальних даних (тички $\circ$, Δ , ∇ , $\bullet$, $\times$). Причому це співпадіння спостерігається навіть при значних товщинах стінки ($t_0/r_0 > 0,5$).

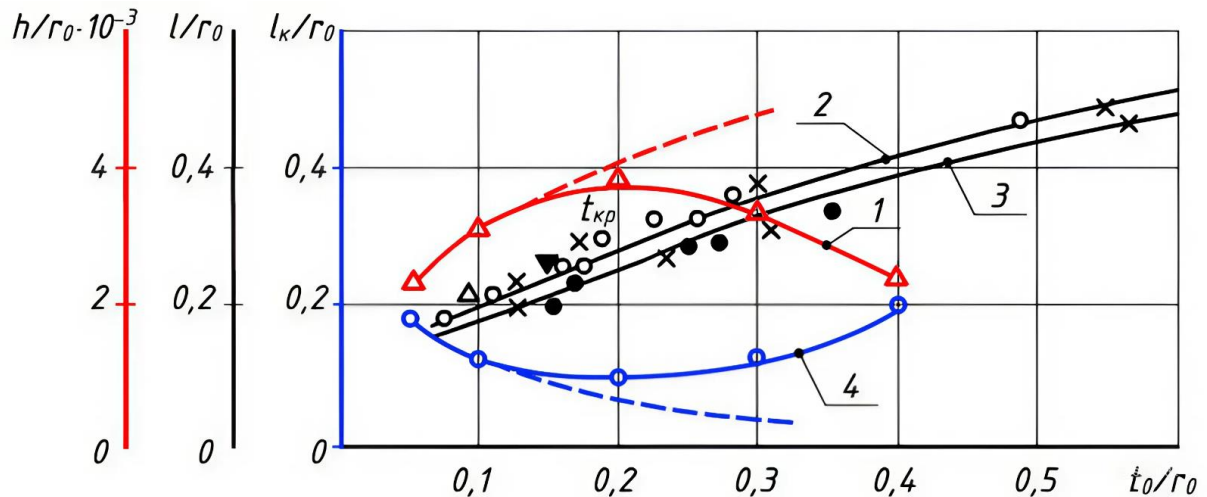


Рисунок 1.6 – Залежність висоти позаконтактної зони (h/r_0) за ділянкою контакту (крива 1); довжини позаконтактних зон: за ділянкою контакту (l_3/r_0) (крива 2), перед ділянкою контакту (l_2/r_0) (крива 3); довжини контактної зони (l_k/r_0) (крива 4) від товстостінності заготовки при використанні деформуючих елементів з кутами $\alpha = 2^\circ\text{--}12^\circ$, натягів на елемент $a/r_0 = 0,025\text{--}0,075$ [4]; дані експерименту [3]: $\circ$ – сталь 20; Δ – сталь 10; $\blacktriangledown$ – Ст3; $\bullet$ – сталь 30ХНМА; $\times$ – сплав АК6

Дещо інший характер має залежність зміни протяжності контактної зони та висоти позаконтактних зон залежно від товстостінності заготовки (рис. 1.6, криві 1, 4).

Як показали експерименти щодо визначення довжини контактної зони та висоти позаконтактної зони за ділянкою контакту (рис. 1.6), добре співпадіння розрахункових та експериментальних результатів спостерігається тільки для випадку обробки тонкостінних заготовок. При збільшенні товщини стінки експериментальні результати докорінно відрізняються від розрахункових, тобто розрахункова модель дає достовірні результати до деякої товщини стінки. Цю товщину стінки автори роботи [3] називають критичною товщиною стінки, вона забезпечує появу в зоні контакту критичного контактного тиску. Критичний контактний тиск за твердженням авторів [3, 10] є механічною характеристикою оброблюваного

матеріалу і відповідає істинному напруженню в шийці розірваного розтягом зразка із досліджуваного матеріалу. При цьому, згідно даних [1, 3], значення цієї критичної товщини стінки залежить від факторів, що впливають на контактний тиск, а саме кута нахилу твірної робочого елементу α , натягу на елемент, сумарного натягу та товстостінності заготовки.

Зміна монотонності функції довжини контакту від товстостінності (рис. 1.6, крива 4) заготовки автори [3] допускають з появою в зоні контакту критичного контактного тиску, який призводить до утворення зони локального пластичного деформування у вигляді напливу, що знаходиться в точці сполучення позаконтактної зони перед ділянкою контакту та самою ділянкою контакту.

Що стосується висоти позаконтактної зони за ділянкою контакту, то експерименти показали, що вона також має екстремальний характер (рис. 1.6, крива 1), але причини появи екстремальності відсутні.

Наявність таких невідповідностей розрахункових та експериментальних даних не дозволяє використовувати розроблену теоретичну модель осередку деформації при розрахунку геометричних характеристик осередку деформації у широкому діапазоні зміни товстостінності заготовки.

Таким чином, виконаний аналіз показав, що розроблена теоретична модель дозволяє розраховувати параметри осередку деформації тільки для тонкостінних заготовок, хоча осьові розміри позаконтактних зон можна розраховувати згідно з розробленою моделлю і для товстостінних заготовок. Щодо деформування деталей зі значною товщиною стінки, тобто за наявності в зоні контакту критичного контактного тиску, процес вимагає додаткового вивчення з наступним аналізом.

1.4. Напружено-деформований стан при ДПР

Напружено-деформований стан (НДС) в осередку деформації визначає не тільки силові навантаження, які виникають в процесі деформування, а і вихідні показники якості обробленої деталі. До них, згідно даних [1, 11, 17], як зазначалось вище, відносять: параметри шорсткості та мікрорельєф обробленої поверхні, її зміцнення та глибину зміцнення, точність форми та розміри обробленої заготовки, залишкові напруження. Тому вивченню НДС присвячено багато робіт не тільки в області деформуючого протягування, але і для операцій подібних з ДПР, наприклад, волочіння труб на коротких оправках, ротаційне обтискання труб, редукування.

Напружено-деформований стан заготовок при ДПР є одним з головних питань, яке досліджується багатьма авторами, адже саме він визначає компоненти тензора напружень і деформації заготовки, а також впливає на параметри якості оброблених деталей. Одним із найважливіших аспектів, які необхідні для об'єктивного аналізу НДС заготовок є схема взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею деталі, яка визначає осередок деформації.

На практиці деформуюче протягування виконують одним, або декількома деформуючими елементами. У теоретичних дослідженнях зазвичай розглядають напружено-деформований стан оброблюваної заготовки при деформуючому протягуванні одним елементом [3], допускаючи, що обробка з декількома елементами буде рівноцінною обробці декількома проходками одного елемента, хоча на думку авторів [1, 3, 8] це не є дійсністю. Розглянемо питання вивчення напруженого і деформованого стану в доступній літературі.

1.4.1. Напружений стан при ДПР

В даний час достатньо точні рішення по визначенню НДС в літературі відсутні, що пояснюється складним характером НДС по всьому об'єму заготовки. Ускладнює цю задачу наявність в осередку деформації зон позаконтактної деформації перед і за контактною ділянкою, що не дає можливість визначити граничні умови деформування.

Автори роботи [12] стверджують, що при наскрізному деформуванні заготовок окружне напруження має позитивне значення по всій товщині стінки та плавно збільшується від внутрішньої поверхні до зовнішньої. Але використання такої схеми деформування подібної до автофретирування, тобто роздачі отвору заготовки внутрішнім рівномірним тиском, призводить до того, що при цьому пластично деформується вся товщина стінки заготовки. Однак використання такої схеми деформування приводить до того, що значення контактних навантажень, розраховані згідно з цією моделлю, істотно нижчі за експериментальні значення, отримані О.М. Розенбергом [3].

В роботі [77] запропоновано експериментально-розрахункову методику і наведено результати досліджень НДС у пластичній контактній зоні матеріалу заготовки з деформуючим елементом. Ця методика розроблена завдяки поєднанню методів вимірювання твердості з методом ділильних сіток [78]. У цих роботах отримано розподіл напружень по радіусу досліджуваного зразка в кінці контактної зони. При цьому автори стверджують, що всі нормальні напруження поблизу оброблюваної поверхні є стискаючими, а напружений стан у зоні контакту близький до всебічного стиснення. Тобто автори роботи [77] своїми дослідженнями по визначенню напруженого стану вказують, що експерименти не підтвердили подібність напруженого стану при ДПР зі схемою роздачі труби рівномірним тиском і знаходяться в протиріччі з даними роботи [12].

Також НДС при ДПР досліджували автори робіт [79, 80], проте вони здебільшого вивчали вплив НДС на зміцнення обробленої поверхні, а також на вибір оптимального критерію щодо визначення пластичності обробленої заготовки.

Найбільш ґрунтовно вивчали НДС при ДПР автори роботи [8], однак ці дослідження стосувалися оброблення заготовок із нескінченною товщиною стінки [3], тобто заготовки зі співвідношенням $t_0/d_0 > 1$. У цьому разі деформування такої заготовки при збільшенні натягу не викликає пластичної деформації зовнішньої поверхні заготовки.

НДС заготовок зі скінченною товщиною стінки [3], у якої $t_0/d_0 > 1$, у роботах [8, 81] досліджували експериментальними методами отриманням лінії течії за допомогою слоїстих моделей і по волокнистій макроструктурі з подальшим аналітичним визначенням швидкостей течії деформування за отриманими лініями течії. Автори отримали нові дані про незалежність кінематики ДПР від матеріалу заготовки, що підтверджується експериментальними даними Розенберга О.О. [3], наведеними вище, про незалежність протяжності контактної зони від матеріалу заготовки. Також автори [8, 81] роблять висновки, що напруження, віднесені до інтенсивності напружень на зовнішній поверхні, також не залежать від властивостей матеріалу. Крім того, вони зазначають, що в контактній зоні матеріал перебуває в умовах, близьких до всебічного стиснення, і використовувати схему автофретування для опису процесу ДПР некоректно.

Однак недостатня точність визначення НДС по волокнистій макроструктурі є основним недоліком цієї методики, який не дав змоги дослідити вплив технологічних параметрів процесу деформуючого протягування на НДС заготовки та здійснити їхню оптимізацію виходячи з отриманих даних по визначенню напружено-деформованого стану.

Автори роботи [37] застосовували методи моделювання з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3DTMV 11.0 [82].

Розроблену FEM-Model використано для дослідження НДС кожної з ділянок осередку деформації при моделюванні ДПР заготовки з малопластичного матеріалу. Як досліджуваний малопластичний матеріал обрано сірий чавун СЧ20.

Як відомо [73, 83], обробка чавуну деформуючим протягуванням відбувається з малими натягами та незначними пластичними деформаціями, причому ні в якому разі пластична деформація не повинна вийти на зовнішню поверхню заготовки. Тому автори моделювали деформування заготовки тільки в поверхневому шарі отвору. Це звужує обсяг необхідних досліджень для вивчення НДС і не дає змоги забезпечити зв'язок НДС обробленої заготовки з технологічними параметрами обробки.

Проте не менш цікавим є те, що моделювання НДС для цього випадку показує, що оброблювальний матеріал на внутрішній поверхні отвору в осередку деформації при переході з позаконтактної зони у контакту і при виході з неї у другу позаконтактну зону, тобто на контактній ділянці знаходиться в умовах всебічного об'ємного стиску, що узгоджується з результатами робіт [8, 81]. Про це свідчать результати зміни гідростатичного тиску та коефіцієнта жорсткості напруженого стану на внутрішній поверхні вздовж осередку деформації (рис. 1.7, а, б), які отримані моделюванням.

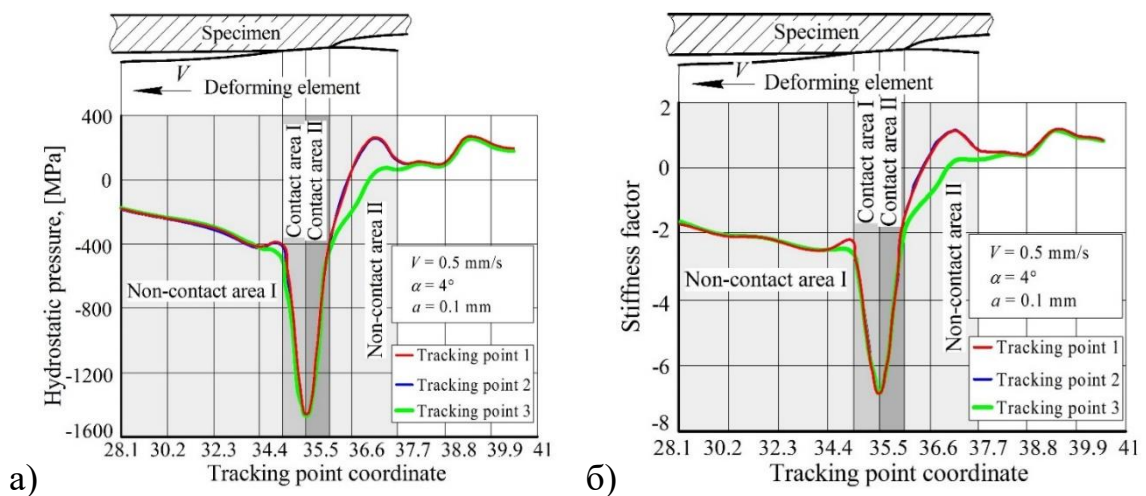


Рисунок 1.7 – Зміна гідростатичного тиску σ та коефіцієнта жорсткості напруженого стану η за координатою відстежуваних точок [37]

Останнім часом все більшого поширення набуває успішне вивчення НДС під час виконання різних операцій подібних з ДПР за допомогою метода скінченних елементів у різних програмних продуктах. Про це свідчить велика кількість публікацій у світових виданнях авторів: 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. В ряді робіт [84-91] присвячених радіальному обтисканню трубних заготовок, операції яка подібна до ДПР, вивчався НДС за допомогою програмного забезпечення ABAQUS та AFDEX.

В роботі [84] досліджувалась течія матеріалів в сталевих трубних заготовках з різною товстостінністю при ротаційному обтисканні труб з осьовою подачею без оправки. Тобто реалізувався процес редукування трубної заготовки через штамп, який виконує радіальний обтиск. Дослідження проводили у програмному забезпеченні ABAQUS на основі створеної в 2D осиметричній моделі скінченних елементів. Процес має схожий характер з деформуючим протягуванням. Більш того, автори роботи також виявили наявність зон локального пластичного деформування на виході і на виході із зони редукування (рис. 1.8). Вони зазначили, що деформація труби як зовнішньої так і внутрішньої поверхні залежить від товстостінності заготовки та коефіцієнта тертя.

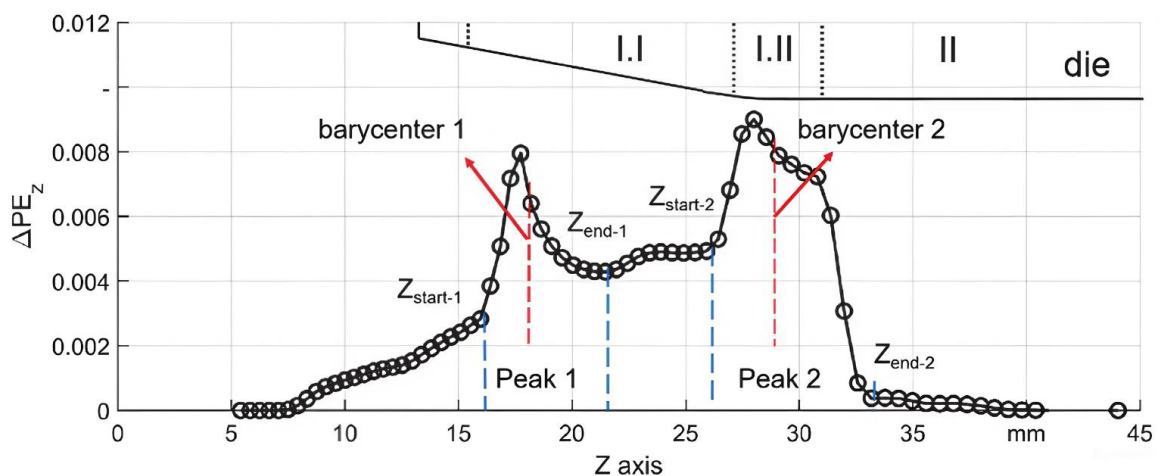


Рисунок 1.8 – Компонента пластичної деформації ΔPE_z [84]

Результати скінчено елементного аналізу зовнішнього обтискання труби без оправки проведеного у роботі [85] порівнювалися з експериментальними даними, і показали гарну відповідність. В ній автори рекомендують проводити операцію без оправки, особливо в тих випадках, коли внутрішня поверхня труби буде піддаватися наступній обробці. Але при цьому слід звернути увагу, що осьові напруження розтягу на внутрішній поверхні труби можуть призвести до утворення тріщин, при чому ймовірність виникнення тріщин у тонких трубах менша, ніж у товстих.

В цілому до недоліків робіт [84-91] по вивченню НДС при ротаційному обтисканні можна віднести те, що автори не звертають увагу на визначення схеми осередку деформації та її складових, тобто контактної ділянки та позаконтактних зон. Це не дає їм можливості в повному обсязі пояснити появу зон локального деформування та виявити ті технологічні фактори, які впливають на формоутворення заготовки та оптимізувати процес.

1.4.2. Деформований стан при ДПР

Як вказувалося вище, в роботах [3, 12, 17, 50, 51, 61] існує ряд експериментально-аналітичних залежностей зміни розмірів при ДПР, які в основному відносилися при деформуванні з використанням кута $\alpha = 4^\circ$. Згідно цих залежностей зміна розмірів деформованої заготовки відбувається за рахунок збільшення зовнішнього діаметра, потоншення стінки та укорочення довжини деталі.

Згодом у більш пізніших роботах [13, 57–60] автори наводять результати досліджень, які свідчать про істотний вплив кута α на характер зміни розмірів, які виражаються у можливості подовження заготовки. Так, наприклад, у роботах В.В. Кривошеї [13, 57], у яких при використанні кутів

$\alpha > 6^\circ$, навіть при роздачі за схемою стиснення спостерігалось подовження заготовки, замість загально прийнятого укорочення.

Немировський Я.Б., при вивченні деформованого стану при роздачі заготовок оболонкового типу, розробив теоретичну модель осередку деформації при ДПР [6, 60], яка дозволяє розрахувати інтегральні характеристики формозміни для тонкостінних заготовок: e_r, e_φ, e_z і порівняв розрахункові значення з експериментальним. Порівняння показало, що цю модель можна використати для визначення деформацій, але тільки при обробці деталей з товстостінністю $t_0/d_0 < 0,05$, тобто товщина стінки цих заготовок менше критичної товщини стінки.

Також у роботі [60] ним наведені експериментальні дані по визначенню сумарної осьової деформації при обробці заготовок з кінцевою товщиною стінки за схемами розтягнення та стиснення (рис. 1.9).

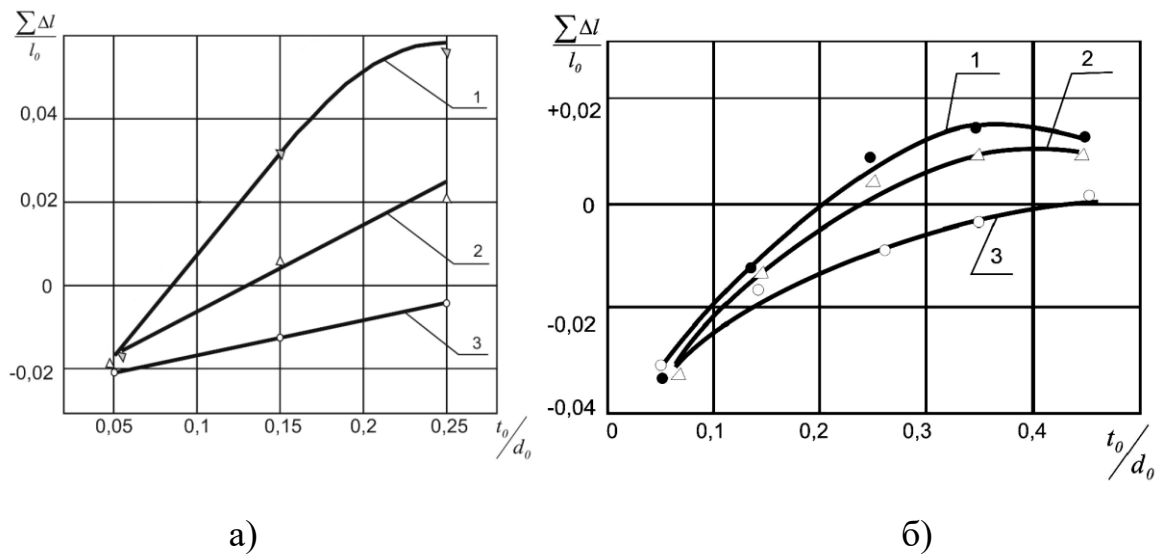


Рисунок 1.9 – Залежність осьової деформації від відносної товщини стінки: $d_0 = 40$ мм; $a/d_0 = 0,025$; $\sum a/d_0 = 0,075$, кут α : 1 – 8° ; 2 – 4° ; 3 – 2° : а) за схемою розтягу, матеріал заготовки сталь 20; б) за схемою стиснення, матеріал сталь 12ХН3А [60]

Результати експериментів показують [60], що в залежності від товстостінності заготовки та кута нахилу твірної робочого конуса при

обробці ДПР може мати місце не тільки укорочення деталі, але і відсутність осьової деформації або наявність її подовження, причому при використанні схеми розтягнення деформація може сягати 10% від вихідної довжини заготовки (рис. 1.9, а). Обробка за схемою стиснення також показує, що може утворюватися подовження, але з дещо меншою деформацією – 4% (рис. 1.9, б).

У роботі [88], присвяченій ротаційному обтиску труб, за допомогою методу скінченних елементів у програмі ABAQUS досліджували течію матеріалу. При цьому вивчали історію зміни компонентів пластичної деформації у різних напрямках. На основі результатів досліджень автори стверджують, що течію матеріалу можна контролювати через зміну умов тертя. Зазначено, що найактивніші зони деформації знаходяться на початку і в кінці зони редукування, а матеріал в радіальному напрямку деформується нерівномірно.

Також розрахунок зон деформації для процесу радіального деформування труби виконувався з використанням методу скінченних елементів у роботі [89]. Під час аналізу результатів автори використовують коефіцієнт неоднорідності деформації матеріалу (IF), який визначається співвідношенням:

$$IF = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{min}}, \quad (1.7)$$

Надлишкова деформація може впливати на поведінку та властивості металу під час подальшої термообробки, впливаючи на кінетику рекристалізації, а також на кінцевий розмір зерна, дифузійні процеси та текстуру [92]. Неоднорідна мікроструктура призводить до неоднорідних фізичних та механічних властивостей готового виробу.

Крім того, автори [89] проводили дослідження з різними формами деформуючих матриць (рис. 1.10), визначаючи їх вплив на НДС обробленої заготовки.

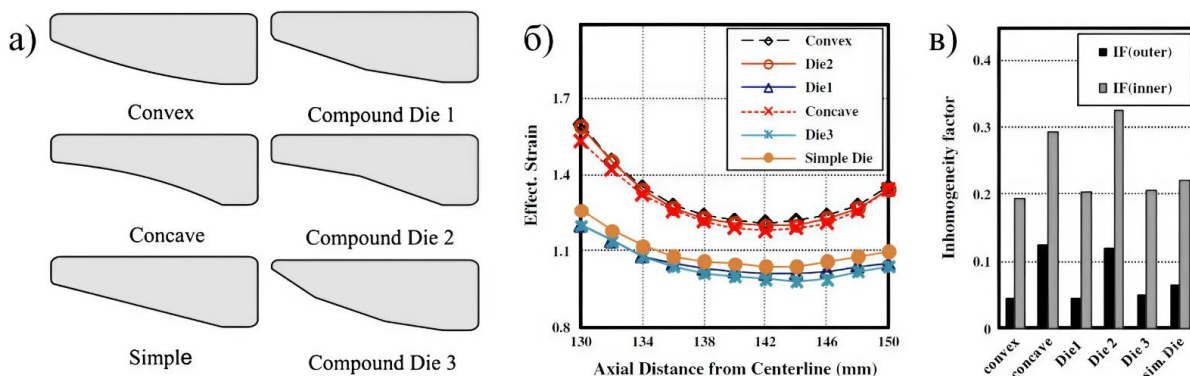


Рисунок 1.10 – Вплив форми матриці при радіальному куванні труби:

- а) форми матриць; б) розподіл деформації в радіальному напрямку;
в) коефіцієнти неоднорідності [89]

На основі результатів (рис. 1.10) автори роблять висновок, що для обробки деталі з мінімальною неоднорідністю деформації необхідно обирати опуклу форму матриці або штамп з трьома похилими гранями. Найгірший варіант спостерігається при використанні матриць з увігнутою формою.

Отже, аналіз робіт, присвячених деформуючому протягуванню [3, 12, 13, 17, 50, 51, 57–61], показав, що в даний час використати дані напружено-деформованого стану для оптимізації формоутворення заготовки не представляється можливим.

1.5. Пластичність при ДПР

Одним із основних завдань формоутворення заготовки є визначення технологічної можливості отримання деталей заданих розмірів та точності шляхом раціонального вибору технологічних факторів, а саме режимів протягування та геометрії інструменту. Застосування операції формоутворення передбачає значні наскрізні пластичні деформації заготовки, при яких підлягають деформації як внутрішня, так і зовнішня поверхні. Наявність таких наскрізних деформацій може призвести до

руйнування заготовки, тому під час виконання операції виникає питання визначення гранично допустимих деформацій матеріалу, тобто оцінки використаного ресурсу пластичності матеріалу.

Пластичність матеріалу в умовах деформуючого протягування визначає його здатність до безруйнівного формоутворення. Для кількісної оцінки якості виробів, що обробляються пластичною деформацією, застосовується параметр, що характеризує дефектність матеріалу – використаний ресурс пластичності (ψ). Величина ψ суттєво залежить від умов обробки, до яких належать схема навантаження, температура, швидкість деформації, характер напружено-деформованого стану, а також інші технологічні параметри. У випадку холодного пластичного деформування при низьких швидкостях (що характерно для багатьох операцій ДПР) ресурс ψ визначається переважно механічними властивостями матеріалу та особливостями напружено-деформованого стану.

Для визначення використаного ресурсу пластичності різні автори [93–98] пропонують залежності, в основі яких закладено принцип, який полягає в тому, що процес деформування відбувається без руйнування, якщо параметр:

$$\psi \leq 1, \quad (1.8)$$

Слід звернути увагу, що параметр ψ є одним із найважливіших показників якості оброблених виробів, особливо для деталей, що працюють у режимах циклічних навантажень. Оцінка ступеня використання пластичності важлива також у разі подальшої термічної або хіміко-термічної обробки, оскільки властивості попередньо деформованого матеріалу істотно залежать від величини накопиченого ресурсу пластичності. Попередня пластична деформація сприяє утворенню дрібнозернистої структури, що поліпшує дифузійні процеси під час хіміко-термічної обробки та знижує час протікання операції, водночас надмірне

використання ресурсу пластичності може призвести до небажаних ефектів і зниження кінцевих експлуатаційних властивостей [95, 96, 99, 100, 101].

З досліджень пластичності 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. Відтак у ряді робіт [101, 104, 105] запропоновано обмеження щодо допустимого значення використаного ресурсу пластичності матеріалу:

$$\psi_{max} \leq [\psi]^*, \quad (1.9)$$

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.

Другий аспект полягає в оцінці використаної або залишкової пластичності обробленої деталі. Це необхідно для з'ясування можливості реалізації задачі, пов'язаної з пластичним деформуванням деталі. Якщо ДПР є кінцевою операцією, то залишкова пластичність обробленої деталі характеризує параметр якості деталі, який впливає на її міцність під час роботи в умовах циклічних навантажень.

Тому вивчення пластичності, як параметру якості для деталей, оброблених ДПР, дуже важливе і пов'язане з можливістю прогнозування і забезпечення якості обробленої деталі при різноманітних технологічних процесах на основі ДПР.

Багато авторів, які працюють в області деформування, тобто деформуюче протягування і процесів подібних з ним, звертали увагу на визначення ресурсу пластичності, що свідчить про його важливість.

У роботах [84, 85], які вже згадувались раніше, присвячених редукуванню труб без оправки, автори відзначають залежність характеру деформації від товстостінності заготовки та коефіцієнта тертя, а також появу осьових напружень розтягу на внутрішній поверхні, що може спричиняти утворення тріщин (особливо у товстостінних трубах). Водночас у зазначених дослідженнях не приділено належної уваги визначенню схеми осередку деформації та оцінці використаного ресурсу пластичності, що обмежує можливість пояснення умов виникнення локальних зон пластичного деформування й прогнозування руйнування заготовок.

У роботах [46, 96] уточнено схему взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею при ДПР в умовах, близьких до умов всебічного стиснення. Наявність таких умов у зоні контакту деформуючого елемента із заготовкою підвищує пластичність оброблюваного матеріалу і перешкоджає його руйнуванню. Подібний висновок зроблено Розенбергом О.М. і Розенбергом О.О. на підставі дослідження закономірностей у осередку деформації [3].

Дані Шейкіна С.Є. [46] також свідчать про можливість виконувати значні пластичні деформації поверхневого шару без руйнування завдяки наявності умов близьких до всебічного стиснення в зоні контакту. Наприклад, для армко-заліза по даним роботи Шейкіна С.Є. [1] після 40 циклів деформування (40 протягнутих деформуючих елементів з натягом на кожний 0,05 мм) деформація поверхневого шару може досягати до 400%. Про подібний факт отримання значних пружно-пластичних деформацій відзначає Левітас В. в роботі [106]. Із рис. 1.11 видно, що вихідна структура зразка із армко-заліза представляє собою хаотично розташовані зерна матеріалу. Після 40 циклів деформації з натягом 0,05 мм чітко з'являється текстура в поверхневому шарі та змінюється форма зерен, які стали видовженими і повернутими в напрямку руху інструменту приблизно на 45° , що свідчить про значну деформацію поверхневого шару.

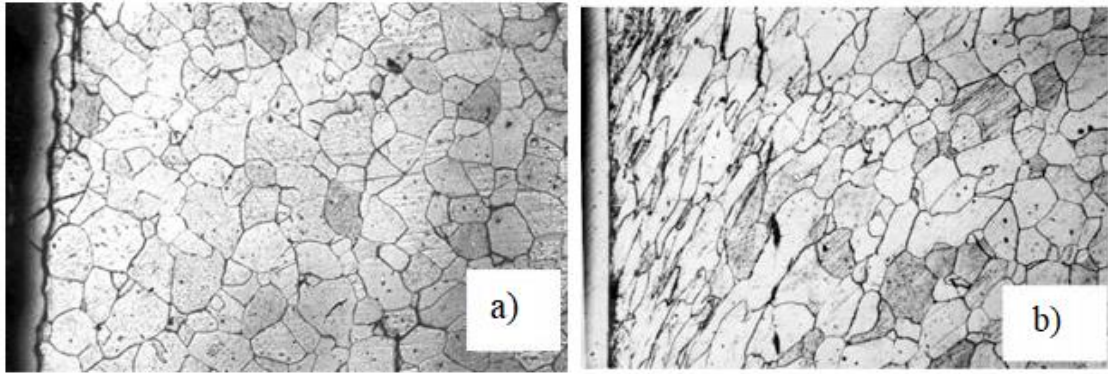


Рисунок 1.11 – Фотографія мікроструктури армко-заліза $\times 100$, заготовка розмірами $t_0/d_0 = 0,4$: а) вихідна; б) після деформуючого протягування 40 циклів $a = 0,05$ мм, $\sum a = 2$ мм [1]

Але незважаючи на це все таки після 8-10 циклів автор спостерігав лущення матеріалу, тобто мікроруйнування та відрив частинок матеріалу. Це вказує на деякі особливості деформування товстостінних деталей.

В роботах [96, 107] Юрій Цеханов з колегами досліджує напружено-деформований стан при ДПР експериментально-аналітичними методами за рахунок отриманих ліній течії з використанням слоїстих моделей, а також волокнистої мікроструктури. Він визначає швидкості течії по отриманим на моделях ліній течії. Автор отримав нові дані про відсутність впливу матеріалу заготовки на НДС. Також він вказує, що руйнування заготовки може відбуватися як на зовнішній, так і внутрішній поверхні оброблюваної заготовки. Також він робить висновок, що відношення напружень віднесені до інтенсивності напружень на зовнішній поверхні також не залежить від характеристик оброблюваного матеріалу. Також Цеханов Ю.О. відзначає, що в контактній зоні матеріал знаходиться в умовах, близьких до всебічного стиску, що забезпечує можливості здійснення значних пластичних деформації в поверхневому шарі отвору при ДПР.

Однак недостатня точність визначення НДС по волокнистій мікроструктурі є основним недоліком цього підходу. Це не дозволило йому встановити наявність зон локального пластичного деформування в осередку

деформації, що в свою чергу не дало можливість вивчити вплив режимних параметрів та розмірів заготовки на НДС і використаний ресурс пластичності.

За твердженням авторів [108, 109], руйнування тонкостінних заготовок із конструкційних сталей, оброблених зі значними деформаціями, починається із зовнішньої поверхні. Причому появі тріщин передують явище втрати стійкості деформування у вигляді появи місцевих утонень, тобто утворення шийки. Під час обробки більш товстостінних деталей першими бракувальними ознаками є поява мікрорушення на внутрішній поверхні, тобто мікроруїнування та відрив частинок матеріалу, і погіршення попередньої шорсткості (рис. 1.12).

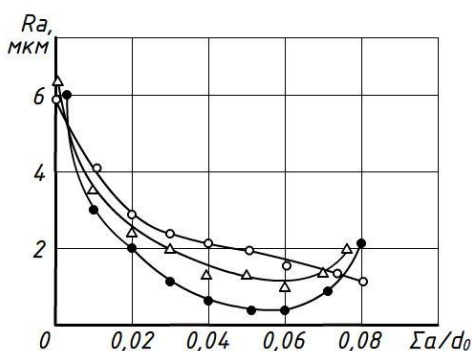


Рисунок 1.12 – Зміна шорсткості під час обробки заготовок зі сталі 12ХН3А деформуючими елементами з кутом $\alpha = 4^\circ$, з натягом на елемент $a/d_0 = 0,01$ і товстостінністю заготовки $t_0/d_0 = 0,4$ [110]

Автори робіт [111–113] зазначають, що при немонотонній (змінній за напрямком) деформації, ресурс пластичності використовується ефективніше, зменшується накопичення пошкоджень, частково нівелюються мікротріщини, що підвищує пластичність поверхневого шару. Їхні дослідження показують, що при немонотонній пластичній деформації величина накопиченого ресурсу пластичності зменшується на 35% у порівнянні з монотонним деформуванням. При монотонній (постійно в одному напрямку) деформації швидше накопичуються пошкодження, що знижує ресурс пластичності.

У роботах [37, 83] відзначається, що при деформуючому протягуванні чавуну обробка ведеться з малими натягами та невеликими деформаціями, при цьому пластично деформується лише шар, прилеглий до внутрішньої поверхні отвору, тоді як зовнішня поверхня залишається недеформованою. Це унеможлиблює визначення використаного ресурсу пластичності та напружено-деформованого стану всієї заготовки, що, у свою чергу, обмежує можливості оптимізації процесу за режимами обробки та розмірами заготовки.

Можливість управління якістю деформованих заготовок, прогнозування технологічної спадковості приводить до користування сучасними критеріями руйнування, або як їх ще називають критеріями деформованості. Відомо, що поняття критерій руйнування включає в себе критерії опору матеріалів, а поняття критерій деформованості – це феноменологічні теорії деформованості металів без руйнування при великих пластичних деформаціях [114].

Аналіз робіт показав, що до теперішнього часу опубліковано досить багато критеріїв, за допомогою яких можна оцінювати використаний ресурс пластичності. Однак, їх практичне застосування для різних процесів обробки металів тиском часто є досить складним завданням.

Питанню про граничні стани матеріалів передувало два підходи: гіпотетичний і феноменологічний. У роботі [80] відзначається доцільність застосування феноменологічного підходу до питань граничного стану матеріалів при великих пластичних деформаціях. Тому, головним чином аналізу будуть піддані феноменологічні теорії деформованості.

Феноменологічна теорія деформованості металів без руйнування базується на експериментальних даних про механічні властивості матеріалу [97, 115, 116].

Для оцінки ймовірності руйнування металу залежно від історії його деформування, а також прогнозування залишкового ресурсу пластичності

заготовок використовують діаграми пластичності, які відображають залежність пластичних властивостей матеріалу від безрозмірних показників напруженого стану, що базуються на інваріантах тензора і девіатора напруг [97, 111, 115, 117]. Такі діаграми отримують при випробуванні металів в умовах простого навантаження при лінійному або плоскому напруженому стані і будують в координатах залежності граничної деформації e_p від показника жорсткості напруженого стану η .

Діаграми пластичності отримують з результатів випробувань на розтяг – показник η нормований на одиницю ($\eta = 1$), односторонній стиск – показник $\eta = -1$, зсув (кручення) – показник $\eta = 0$ [95, 97, 102].

В. А. Огородніков у своїх роботах [80, 95, 97, 103] враховує вплив на пластичність перший, другий та третій інваріанти тензора напружень, що дозволяє отримувати достовірні результати в умовах об'ємного напруженого стану. Таким чином показник напруженого стану визначається з залежності [97]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1.10)$$

де: $I_1(T_\sigma)$ – перший інваріант тензора напружень,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження,

$I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант тензора напружень або інтенсивності напружень:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (1.11)$$

Як зазначають автори [95, 97, 103] на пластичність металів в умовах об'ємного напруженого стану впливає третій інваріант тензора напруги, який враховують наступним чином:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_i}, \quad (1.12)$$

О.В. Грушко та І.Ю. Кириця [118–120] зазначають, що в додатній області показника η спостерігається немонотонність залежності пластичності у зв'язку з тим, що деформації при розтязі перевищують деформацію зсуву. У зв'язку з цим автори пропонують використовувати новий параметр напруженого стану ζ , який визначається:

$$\zeta = \frac{k_1\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1.13)$$

де: k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти впливу головного напруження на пластичність металу.

Однак автори відмічають, що при об'ємному напруженому стані перевірка вимагає проведення спеціальних експериментів у камері високого тиску, що робить визначення показника складним.

При оцінці граничної можливості деформування заготовки до появи дефектів на її поверхні використовують критерії деформованості, які представлені в роботах Г.А. Смірнова-Аляєва, В.Л. Колмогорова, Г.Д. Деля, В.О. Огороднікова та ін. [93, 95, 117, 121].

Серед великої кількості критеріїв в яких враховуються коефіцієнти швидкості розвитку тріщин та їх заліковування при холодному деформуванні, нелінійний характер накопичення пошкоджуваності та різні шляхи навантаження зразків, найбільш зручною для операції деформуючого протягування, згідно з рекомендаціями [96, 115], є критерій Колмогорова:

$$\psi = \int_0^{e_0} \frac{de_0}{e_{\text{пр}}(\eta)}, \quad (1.14)$$

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

η – коефіцієнт жорсткості напруженого стану, визначається по (1.10);

e_0 – інтенсивність деформацій для осесиметричної заготовки [8]:

$$e_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(e_r - e_\varphi)^2 + (e_\varphi - e_z)^2 + (e_z - e_r)^2}, \quad (1.15)$$

При використанні даного критерію для дослідження пластичності необхідно побудувати діаграму пластичності. Вона будується в координатах «накопичена деформація до руйнування – показник напруженого стану», тобто кожному значенню η відповідає гранична деформація до руйнування. Як було зазначено, відомі діаграми пластичності для пластичних матеріалів в основному будуються в діапазоні від $\eta = 1$ до $\eta = -1$ [95, 97, 102].

У випадку обробки ДПР з наскрізною деформацією заготовки, напружено-деформований стан згідно даних авторів [8, 117] на зовнішній поверхні, що відповідає зоні контакту, близький до двовісного розтягування ($\eta = 2$), у позаконтактних зонах, $\eta \approx -2$. Водночас на внутрішній поверхні в контактній зоні автори рахують, що НДС близький до всебічного стиснення.

Тому для визначення пластичності на внутрішній і зовнішній поверхні оброблюваної заготовки, потрібно побудувати діаграму пластичності зі значеннями граничної деформації за вищевказаних показників напруженого стану η .

Наявність такої діаграми та її апроксимації в необхідних для визначення пластичності областях дає змогу визначити граничні технологічні режими для такого показника якості, як пластичність, під час обробки виробів із пластичних матеріалів деформуючим протягуванням.

Для створення можливості керування значенням ресурсу пластичності при ДПР необхідно вивчити НДС деформованої заготовки, а також на основі цього розглянути як змінюється ресурс пластичності заготовки при її обробці деформуючим протягуванням та визначити вплив на використаний ресурс пластичності матеріалу технологічних параметрів: геометрії інструменту, режимів протягування та товстостінності оброблюваної заготовки.

1.5.1. Експериментальні методи визначення граничної деформації до руйнування при різних напружених станах

Двохосьове розтягування – це напружений стан, при якому до матеріалу прикладено нормальні сили розтягу відразу в двох напрямках (наприклад, по осях X та Y). Показник напруженого стану при цьому $\eta = 2$.

Як правило для проведення випробувань зразків при рівномірному двухосьовому розтягуванні потребує застосування спеціальних пристроїв для рівномірного двухосьового розтягування, які повинні бути обладнані двома незалежними приводами та хрестоподібних зразків з відповідною областю вимірювання.

Згідно ISO 12004-2:2021 «Metallic materials — Determination of forming-limit curves for sheet and strip. Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory» характеристики матеріалу при двовісному розтягуванні визначають за допомогою плоских круглих зразків у системі типу Nakazima [122]. Визначення кривої граничної деформації по Nakazima проводиться за допомогою напівкруглого витяжного штампа (рис. 1.13, а). Перед випробуванням на зразки (рис. 1.13, б) наноситься круглі сітки. При навантаженні напівсферичним пуансоном кругла сітка деформуються в еліпси, центральні осі яких показують деформації на поверхні виробів у головному та дотичному напрямку.

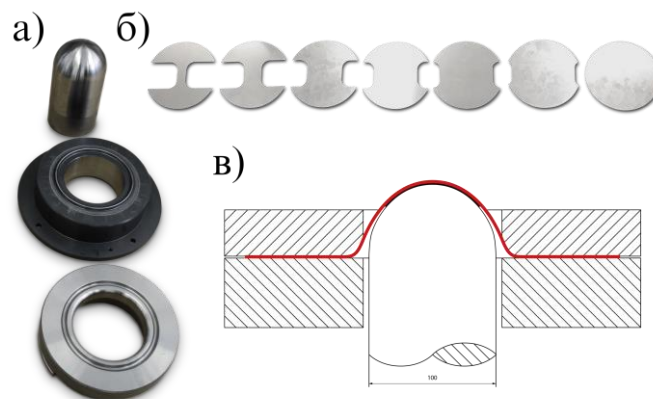


Рисунок 1.13 – Визначення кривої граничної деформації за системою Nakazima [122]: а) пристосування; б) зразки; в) схема випробування

Таким чином по зміні відстані між мітками в місцях руйнування можна визначити деформацію у двох напрямках e_x та e_y . Припускаючи, що в центрі пластини деформація є простою, можна визначити накопичену деформацію до руйнування за залежністю (1.16) [8].

$$\bar{e}_0 = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_x \cdot e_y}, \quad (1.16)$$

Автори роботи [8] для спрощення та зниження трудомісткості дослідів по визначенню двохосової деформації пропонують залежність (1.17), згідно якої деформація при двохосовому розтягненні пов'язана з деформацією при одноосовому розтягненні. Величина граничної деформації при рівномірному двохосовому розтягненні:

$$e_{пр}(+2) = 0,0065\delta_p, \quad (1.17)$$

де: δ_p – відносне подовження зразка при стандартних випробуваннях на розтяг.

Класичні методики дослідження пластичності матеріалів в умовах інтенсивного гідростатичного стиснення базуються на використанні камер високого тиску та спеціалізованого випробувального обладнання, що суттєво ускладнює їх експериментальну реалізацію [93].

Дослідження з визначення деформації до руйнування при показнику напруженого стану $\eta = -2$, що відповідає двохосовому стиску описані у роботі [8]. Дана методика також використовувалась у роботі [123] у дослідженнях зразків із чавуну.

Експеримент полягає у деформуванні трубчастих зразків в осьовому напрямку у спеціальному пристосуванні (рис. 1.15). Зразок, який виконується у вигляді втулки з нескінченною товщиною стінки ($t \geq d_0$), розміщується в середині жорсткої обойми, яка забезпечує відсутність пластичних деформацій (e_ϕ) на зовнішній поверхні зразка. При цьому використовується високоефективне змащування, для мінімізації коефіцієнта тертя між стінками обойми, зразка та пуансонів. Осьове

стиснення виконується зусиллям P , яке прикладається до двох пуансонів, що переміщуються назустріч один одному і своїми торцевими поверхнями здавлюють зразок. Таким чином досліджуваний зразок має можливість деформуватися тільки в осьовому і радіальному напрямках.

Руйнування зразка фіксується в момент появи характерного короткочасного хрусткого звуку, за допомогою стрілки силовимірювача, а також перетворювачем сили і переміщень із самописним приладом.

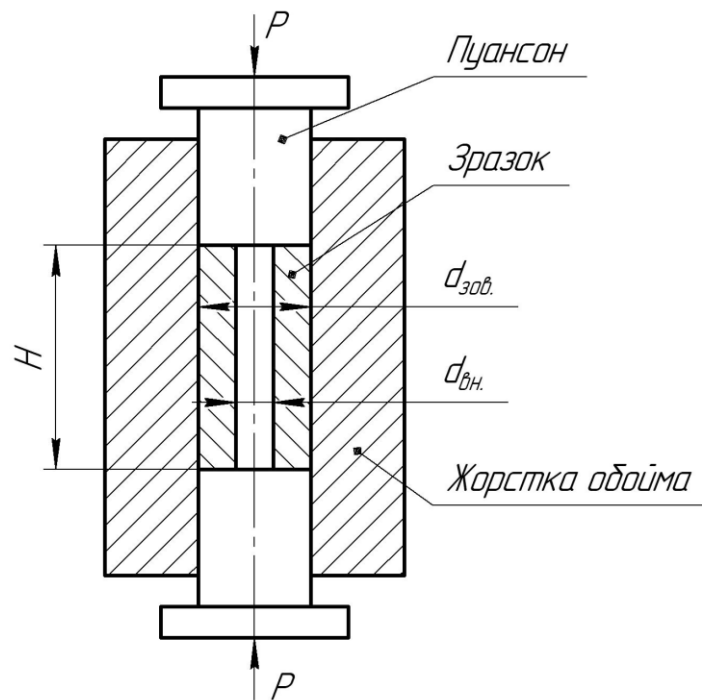


Рисунок 1.15 – Схема випробування зразків при значних від'ємних показниках напруженого стану [123]

Після проведення випробування зразків окружну деформацію на внутрішній поверхні зразка можна визначити за залежністю [123]:

$$e_{\varphi} = \frac{k}{2} \cdot \left[\left(\frac{r_3}{r_b} \right)^2 - 1 \right], \quad (1.18)$$

де: k – відносна осьова деформація, постійна по всьому об'єму заготовки;

r_3 – радіус зовнішньої поверхні зразка;

r_b – радіус внутрішньої поверхні зразка після руйнування;

Радіальну деформацію на внутрішній поверхні зразка визначають за залежністю [123]:

$$e_r = -\frac{k}{2} \cdot \left(\frac{r_3}{r_B}\right)^2, \quad (1.19)$$

Інтенсивність деформації на внутрішній поверхні зразка визначають за залежністю [123]:

$$e_0 = \frac{|k|}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{r_3}{r_B}\right)^4 + 3}, \quad (1.20)$$

При цьому коефіцієнт жорсткості напруженого стану уточнюють за формулою [123]:

$$\eta = -2 \cdot \frac{-\frac{k}{2} \cdot \left(\frac{r_3}{r_B}\right)^2}{\frac{|k|}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{r_3}{r_B}\right)^4 + 3}} = -\sqrt{3} \cdot \frac{\left(\frac{r_3}{r_B}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{r_3}{r_B}\right)^4 + 3}}, \quad (1.21)$$

Після визначення деформації до руйнування при показниках напруженого стану $\eta = -2; -1; 0; 1; 2$, необхідно провести апроксимацію кривої діаграми пластичності, за для визначення проміжних точок, та отримання форми кривої при значних від'ємних значеннях $\eta < -2$.

1.6. Висновки за розділом 1

Аналіз існуючих досліджень показує, що питання формоутворення заготовок при деформуючому протягуванні є актуальним і привертало увагу багатьох авторів. Однак уявлення про схему осередку деформації залишаються суперечливими: теоретичні моделі, побудовані на варіаційних принципах, добре описують деформацію тонкостінних заготовок, але дають значні розбіжності з експериментом у випадку товстостінних. Також спостерігається невизначеність щодо осьової деформації: одні автори фіксують укорочення деталі, інші – можливість як укорочення, так і подовження залежно від геометрії інструменту та режимів протягування.

Шляхи керування формоутворенням заготовки, запропоновані різними авторами, здебільшого стосуються часткових випадків і не дають цілісного підходу. Для узагальнення результатів потрібні системні дослідження, що враховують вплив як геометрії інструменту, так і режимів деформування.

Питання використаного ресурсу пластичності вивчалось експериментально-розрахунковими методами, проте недостатня точність цих підходів не дозволила в повній мірі визначити його залежність від технологічних факторів.

Водночас відомо, що саме використаний ресурс пластичності визначає можливість отримання бездефектних заготовок, особливо у випадку наскрізного пластичного деформування з одночасною деформацією внутрішньої та зовнішньої поверхонь.

Отже, проблеми формоутворення при наскрізному пластичному деформуванні заготовок з кінцевою товщиною стінки доцільно вирішувати на основі поглибленого аналізу механіки їх пластичного деформування. Складність математичного опису об'ємного процесу пластичного деформування товстостінних заготовок в даний час не дозволяє розробити теоретичну модель деформування. Успішне використання методів скінченних елементів (МСЕ) для вивчення напружено-деформованого стану в технологічних процесах, подібних ДПР, а також при деформуванні деталей із малопластичних матеріалів типу СЧ20 вказує на можливість застосування цього методу для успішного вивчення НДС при деформуванні вищевказаних заготовок у широкому діапазоні режимів і параметрів інструменту. Останнє створить основу для подальшої розробки аналітичних моделей.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, УСТАТКУВАННЯ ТА АПАРАТУРА

2.1. Обґрунтування вибору матеріалу для проведення досліджень

Пластичні метали – це такі матеріали, що зазнають постійної, неповерненої деформації при навантаженні понад межу текучості. До них відносяться вуглецеві та леговані сталі, сплави на основі кольорових металів, таких як: алюмінію, міді, титану, магнію.

Літературний аналіз показав, що автори роботи [3] проводили експериментальні дослідження з визначення геометричних параметрів контактної та позаконтактних зон використовуючи матеріали з різко змінними фізико-механічними характеристиками починаючи від свинцю, НВ якого рівне 4,4 МПа, продовжуючи сплавом АК6, Сталь 10, Ст.3, Сталь 20 і закінчуючи 38ХМЮА з НВ 282. О.О. Розенберг встановив важливе положення, згідно з яким довжина контактної зони під час обробки заготовок із кінцевою товщиною стінки практично не залежить від матеріалу.

У роботах [6, 60] Я.Б. Немировський також для експериментальних досліджень використовував доволі широкий перелік матеріалів: Сталь 10, Сталь 20, Сталь 35, Сталь 45, Сталь 12ХН3А, Сталь 55 ПП, бронза ОЦС 5-5-5, сплав АК6, латунь Л63, мідь М1. Також досить значна номенклатура матеріалів використовувалось в роботах [1, 8, 46] С.Є. Шейкіним для аналізу і вивчення зміцнення та мікрорельєфу і шорсткості обробленої поверхні при деформуючому протягуванні.

Як було вже зазначено у роботах [8, 81] Цеханова Ю.О. також підтвердив данні Розенберга О.А. [3] про незалежність кінематики ДПР від матеріалу заготовки.

Тобто для вирішення задач сформованих в даній дисертаційній роботі слід зупинитися на детальному дослідженні заготовки з одного матеріалу але з її різною товстостінністю при виконанні ДПР на різних режимах протягування та геометрії інструменту.

Значна частина машинобудівних виробів виготовляється зі сталей поліпшеної якості та легованих сплавів, що відзначаються високими експлуатаційними характеристиками та високим рівнем пластичності. До таких матеріалів належить сталі 45, 40Х, 18ХГ, 38ХМЮА, 40ХНМА та багато інших, зокрема і сталь 12ХН3А, яка широко застосовується у відповідальних деталях машинобудівної, транспортної, авіаційної техніки. З цієї сталі виготовляють деталі типу втулки, гільзи, циліндри, поршневі пальці і тому подібні, 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 підходи та результати досліджень ДПР можуть бути поширені і на інші вироби з конструкційних та легованих сталей, а також кольорових сплавів з достатнім рівнем пластичності матеріалу.

У роботах [1, 5, 58] з використанням сталі 12ХН3А проведено дослідження сумарної осьової деформації при ДПР втулок різної товстостінності з даного матеріалу при різних кутах нахилу твірної робочого конуса ДЕ та різних натягах. На початкових етапах проведення моделювання МКЕ обробки ДПР результати отримані у роботах [1, 5, 58] планується використовувати для порівняння і підтвердження адекватності отриманих результатів моделювання.

Сталь 12ХН3А ДСТУ 7806:2015 – це легована хромонікелева конструкційна сталь, яка характеризується високою міцністю, пластичністю, в'язкістю та стійкістю до ударних навантажень і низьких температур (до -100°C). Вона піддається цементації, загартуванню та відпуску, що дозволяє досягати високої поверхневої твердості при збереженні міцної та пластичної серцевини [124–128].

Хімічний склад і механічні властивості сталі 12ХН3А представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад і механічні властивості сталі 12ХН3А

Хімічний склад, %					Механічні властивості			
C	Mn	Si	Cr	Ni	Твердість HB, МПа	Межа міцності, σ_B , МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Модуль Юнга, E, ГПа
0,09- 0,16	0,3- 0,6	0,17- 0,37	0,6- 0,9	2,75- 3,15	220-230	930	0.28	200

Джерело: узагальнено та побудовано на основі даних [125, 126].

2.2. Обґрунтування вибору розмірів досліджуваних заготовок та планування експериментів

Деформуюче протягування (прошивання) успішно застосовують при виготовленні різноманітних деталей типу втулок і труб для внутрішньої обробки отворів, наприклад: гідроциліндрів, пневмоциліндрів та ін. Цей процес дозволяє досягати точності внутрішнього діаметра IT7–IT8 та шорсткості Ra 0,2...0,4 мкм, що забезпечує нормальну роботу таких деталей за рахунок зменшення зносу ущільнень і підвищення герметичності [129, 130]. При цьому такі деталі виготовляється різних типорозмірів, діаметр яких може становити від 10 до 500 мм і більше, довжиною 50...5000 мм.

Як зазначалося у літературному огляді, ДПР успішно використовувалось також при відновленні різноманітних порожнистих

деталей, наприклад, зношених поршневих пальців двигунів внутрішнього згорання, річна програма випуску яких тільки в автомобільній промисловості Європи складає понад 30 мільйонів пальців, діаметром 20–58 мм, довжиною 45–220 мм, масою 0,2–1,8 кг [64].

З огляду на значне різноманіття розмірів деталей, які можуть оброблятися методом ДПР, для зменшення числа експериментів, під час досліджень доцільно застосовувати положення теорія подібності, яка на сьогодні знайшла широке використання в різних сферах дослідження [8, 131–135]. У даній роботі вона використана для встановлення залежності 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 ($a, \Sigma a, \alpha$).

Як основний параметр обираємо d_0 , який, з огляду на наявний комплект деформуючих елементів ($d_d = 40,5; 40,6; \dots 41,9; 42$ мм) (рис. 2.1) приймаємо 40 мм. Відносно нього будемо визначати всі інші геометричні параметри у безрозмірному вигляді: $t_0/d_0; a/d_0; \Sigma a/d_0$.



Рисунок 2.1 – Комплект деформуючих елементів

Як відомо [1, 8, 17], наскрізна пластична деформація реалізується під час обробки заготовок із товщиною стінки $t_0 < d_0$. З огляду на це, під час

виконання моделювання та експериментальних досліджень передбачається використовувати заготовки з такими значеннями відносної товстостінності: $t_0/d_0 = 0,05; 0,15; 0,2; 0,25; 0,35; 0,45$. За прийнятого діаметра отвору $d_0 = 40$ мм це відповідає товщинам стінки: $t_0 = 2; 6; 8; 10; 14; 18$ мм. Застосування теорії подібності дозволяє провести моделювання та експериментальні досліді на одному діаметрі, розповсюдивши ці результати на деталі з іншими діаметрами.

Довжину заготовки приймаємо $l_0 = 150$ мм, з метою виключення впливу крайового ефекту на деформації по її довжині.

Планування імітаційного моделювання передбачає отримання залежностей параметрів осередку деформації: довжини контакту, висоти позаконтактної зони, осьової та окружної деформації від відносної товстостінності заготовки, кута нахилу твірної робочого конуса α , відносного натягу при деформуючому протягуванні та сумарної деформації. Крім того, визначалися параметри деформації, інтенсивності напружень та пластичності і їх залежність від вищенаведених факторів.

Таблиця 2.2 – Режимний параметр, геометрія інструменту, товстостінність заготовки та сумарна деформація для планування експерименту

Фактори	Відносна товстостінність заготовки t_0/d_0	Кут нахилу твірної робочого конуса α , град.	Відносний натяг a/d_0	Сумарна деформація $\sum a/d_0$
	0,05 0,15 0,2 0,25 0,35 0,45	2° 4° 8°	0,0125 0,025 0,0375	0,075

Для проведення імітаційного дослідження процесу деформуючого протягування (прошивання) з метою зменшення трудомісткості розрахунків

при збереженні фізичної адекватності процесу було використано підхід послідовного однофакторного експерименту, який сформований на основі апріорних даних про фізику процесу деформуючого протягування. Дослідження впливу основних технологічних параметрів здійснювалося шляхом варіювання кожного з факторів окремо при фіксованих значеннях інших параметрів. Отримані результати представлялися у вигляді табличних та графічних залежностей, які надалі апроксимувалися аналітичними виразами, придатними для практичного використання.

Для перевірки розрахункових результатів імітаційного моделювання процесу ДПР проведено ряд експериментів з використанням адаптивного експерименту, який полягає у перевірці опорних точок, які отримані на основі результатів симуляції.

Для проведення експериментів виготовлялися 15 втулок із круглого сортового прокату ДСТУ 8938:2019. Розточування і обточування заготовок виконувалась на токарному верстаті 16K20 зі швидкістю різання 80–100 м/хв та подачею 0,2 мм/об. Відхилення форми отвору заготовки не перевищувало 0,025 мкм, а шорсткість партії заготовок була приблизно однаковою (значення висотного параметру R_a знаходилося в діапазоні 4–8 мкм). Всі втулки виготовлялися з діаметром $d_0 = 40$ мм та довжиною $l_0 = 150$ мм. П'ять втулок виготовлялися з товстостінністю $t_0/d_0 = 0,05$, тобто зовнішнім діаметром 44 мм; п'ять втулок $t_0/d_0 = 0,25$, тобто зовнішнім діаметром 60 мм; три втулки $t_0/d_0 = 0,15$, зовнішній діаметр 52 мм, та ще дві з товстостінністю $t_0/d_0 = 0,2$, зовнішнім діаметром 56 мм.

В результаті порівняння результатів імітаційного моделювання з експериментами були отримані інтерполяційні залежності, необхідні для використання при розробці технологічних процесів. Це залежності по визначенню критичної товщини стінки, що забезпечує появу в контактній зоні критичного тиску; накопиченої деформації на зовнішній поверхні заготовки; діаграма пластичності сталі 12ХН3А; ресурсу пластичності на

внутрішній та зовнішній поверхнях заготовки; накопиченої деформації від натягу та кількості елементів; ресурсу пластичності від натягу на елемент та кількості елементів; визначення необхідної окружної деформації зовнішньої поверхні та ін.

2.3. Обладнання та інструмент для проведення досліджень

Для проведення експериментів деформуючим прошиванням використовувався модернізований гідравлічний прес П-50 (рис. 2.2) з встановленою гідравлічною станцією та системою реєстрації максимального тиску системи. Модернізований прес може розвивати зусилля стискання до 60 т, хід поршня – 160 мм.



Рисунок 2.2 – Модернізований гідравлічний прес П-50

Деформуючі елементи (рис. 2.3) виготовлені з твердого сплаву марки ВК-15. Кут нахилу твірної забірного конуса – $\alpha = 4^\circ$, ширина циліндричної ділянки – $b_d = 1$ мм. Комплект деформуючих елементів налічує 18 позицій діаметри яких становлять $d_d = 40,5; 40,6; \dots 41,9; 42$ мм

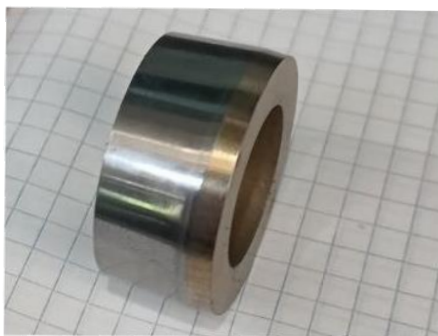


Рисунок 2.3 – Деформуючий елемент

Під час проведення експериментальних досліджень по визначенню довжини контактної зони використовувалось змащення – сульфолітол. Виготовляється дане мастило з веретеної олії з додаванням нігrolів та гасу, а також містить вільну сірку та з'єднання сірки як протизадирні присадки, що забезпечує підвищену стійкість інструменту та покращену якість поверхні.

2.4. Методика визначення розмірів оброблюваної заготовки

Для визначення фактичних розмірів заготовки після ДПР було використано наступний ряд вимірювальних інструментів.

Внутрішній діаметр отвору вимірювався за допомогою індикаторного нутроміра НІ 35-50 з ціною поділки 0,01 мм. Для налаштування нутроміра на номінальний вимірювальний розмір додатково використовувалися кінцеві міри довжини (КМД) та набір приладдя ПК-2.

Вимірювання проводилось в декількох точках (1 – 3) вздовж твірної отвору заготовки у двох взаємоперпендикулярних площинах (I, II) за схемою представленою на рисунку 2.4.

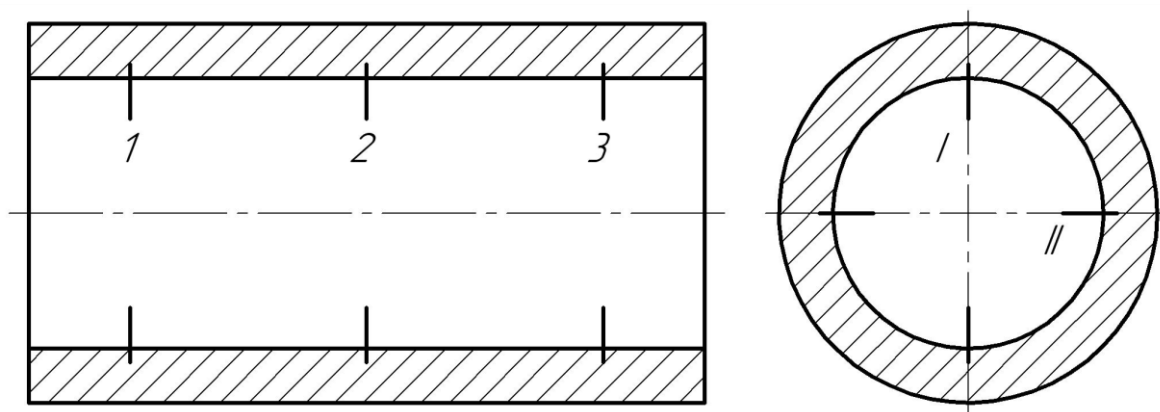


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання розміру отвору заготовки

Також по аналогічній схемі вимірювався і зовнішній діаметр після обробки за допомогою мікрометра МК 25-50 та МК 50-75 з ціною поділки 0,01 мм.

Вимірювання осьових розмірів проводилися на лабораторній стойці з закріпленим в ній індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Заготовка при цьому встановлювалася на стіл стойки. Попередньо для налаштування індикатора на номінальний розмір вимірювання використовувалися КМД. Вимірювання проводилося з обох торців, для мінімізації і усереднення похибок пов'язаних з крайовими дефектами заготовки, які виникають при виконанні операції ДПР.

2.5. Методика визначення осьових деформацій оброблюваної заготовки

Дослідження осьових деформацій оброблених заготовок здійснювали за допомогою відомого методу візіопластичності [8]. Процедура підготовки передбачала нанесення за допомогою твердосплавного індентора на зовнішню поверхню заготовки вздовж діаметрально протилежних твірних трьох пар міток з різними відстанями між ними (рис. 2.5).

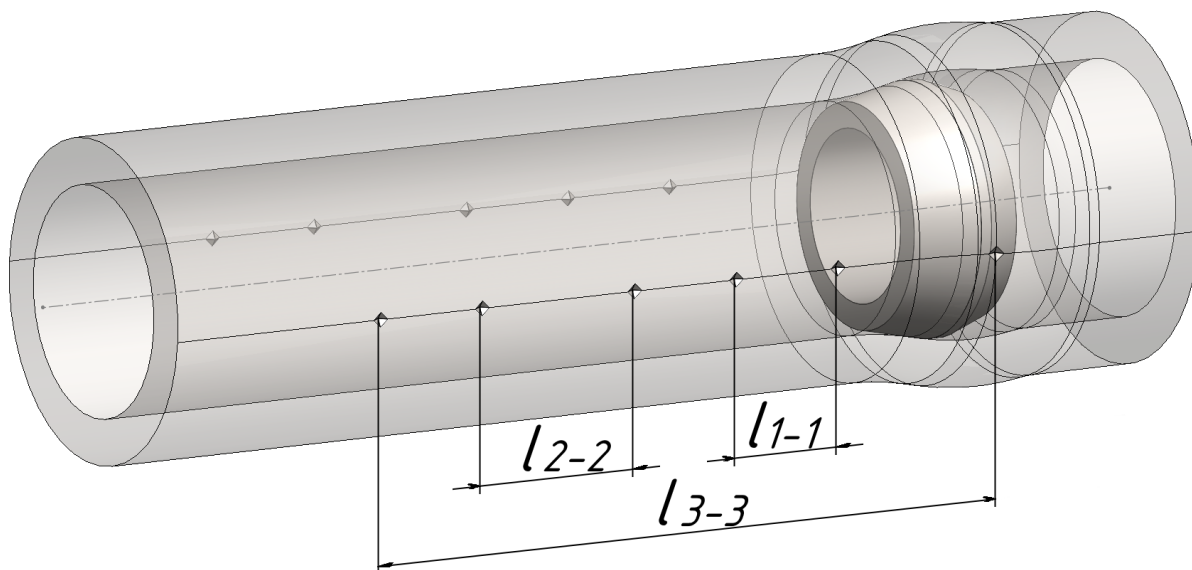


Рисунок 2.5 – Схема визначення осьових деформацій оброблювальної заготовки

На основі зміни відстаней між відповідними мітками після деформування заготовки розраховували відносну осьову деформацію ділянки ($e_z = \Delta l_0 / l_0$). Координати міток фіксували на інструментальному мікроскопі БМІ-1 з точністю до 3 мкм. Для зменшення похибок вимірювань, які спричинені можливим викривленням заготовки, підсумкове значення зміни довжини відрізка визначали як середнє арифметичне результатів вимірювань цих пар на діаметрально протилежних сторонах.

Довжина заготовок становила 150 мм. Відстань від торців заготовки до пари тичок 3-3 перевищувала діаметр отвору заготовки, що дозволило повністю виключити вплив крайового ефекту на чистоту експерименту.

Додатково осьова деформація заготовок розраховувалася з умови збереження об'єму заготовки до і після деформування:

$$2 \cdot \pi \cdot (D_0^2 - d_0^2) \cdot l_0 = 2 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot l, \quad (2.1)$$

$$e_z = \frac{D_0^2 - d_0^2}{D^2 - d^2} - 1, \quad (2.2)$$

2.6. Експериментальна методика визначення фактичної довжини контакту інструмента з оброблюваною поверхнею

Для визначення довжини контакту при ДПР матеріалу заготовки з конічною поверхнею ДЕ 1 скористаємось відомою методикою [10, 75, 136]. Вона полягає в нанесенні на внутрішню поверхню 3 оброблюваної заготовки 2 двох алмазовмісних плям 4 у діаметрально протилежних напрямках (рис. 2.6). Плями 4 з порошкового абразиву, який має бути твердішим за матеріал ДЕ, рекомендується розташовувати посередині довжини заготовки, щоб усунути вплив крайових ефектів на вимірювання. Після виконання ДПР на поверхні ДЕ 1 залишаються характерні сліди у вигляді подряпин 5, які й відображають довжину контакту.

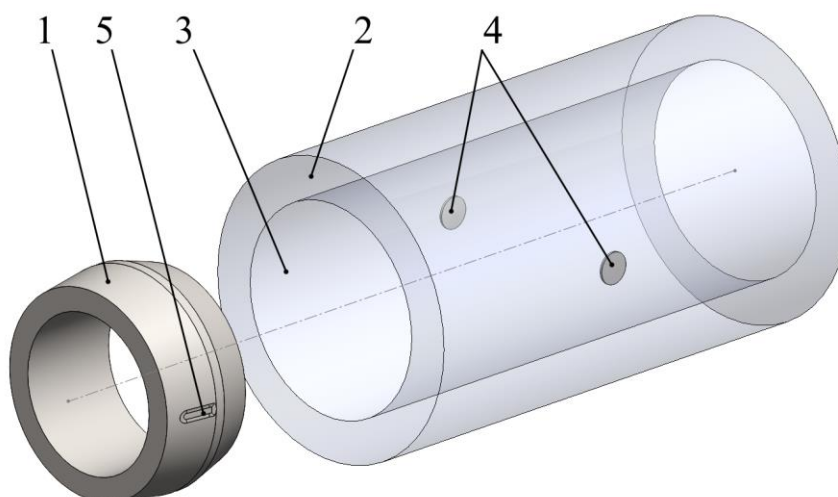


Рисунок 2.6 – Схема нанесення алмазовмісних плям для визначення довжини контакту

Даний метод визначення довжини контакту проаналізований у роботі [136], в якій зазначено, що він має певний недолік, який полягає в тому, що нанесені алмазовмісні плями виступають над поверхнею заготовки. Це призводить до того, що під час обробки вони починають раніше контактувати з поверхнею інструменту ніж сама внутрішня поверхня

заготовки і відповідно з'являється похибка визначенні довжини контакту у більшу сторону.

На основі побудованої математичної моделі у роботі [136] проведено аналіз можливої похибки та факторів, які впливають на її величину. Зазначено, що похибка виникає в результаті висоти виступання зерна H і зростає при зменшенні кута α , та збільшенні розмірів заготовки t_0 та d_0 . При зменшенні висоти H похибка – знижується і при $H = 0$ – зникає.

Для забезпечення точного визначення довжини контакту методом алмазовмісних плям, авторами роботи [136] запропоновано перед проведенням вимірювання занурити алмази в поверхню отвору на глибину, що відповідає висоті мікронерівностей. Для цього достатньо попередньо пропустити крізь оброблюваний отвір два деформуючі елементи з невеликим натягом. Це забезпечить утоплення алмазів, і при проходженні наступних елементів довжина контакту визначатиметься без похибок.

Експериментальні дані роботи [136], у якій було порівняно величину подряпин на ДЕ залишених алмазовнісними плямами та сліди контакту з поверхнею отвору, який представляв собою мікрочастинки оброблюваного матеріалу свідчать, що починаючи з третього елемента, довжина контакту залишається практично сталою. Похибки, спричинені надмірним виступанням алмазних зерен, є значними лише для першого елемента, проте в процесі їх заглиблення ці відхилення швидко зменшуються і вже на третьому та наступних елементах стають незначними або взагалі не проявляються.

Алмазні зерна фіксувалися на оброблюваній поверхні за допомогою клею БФ-2. При обробці сталі 12ХН3А рекомендується використовувати мікропорошки дрібних фракцій, зернистістю в межах М7 – М10.

Сліди контакту на деформуючих елементах вимірялися за допомогою інструментального мікроскопу БМІ-1 з ціною поділки лінійних переміщень столу 5 мкм.

2.7. Методики визначення фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу

Як було зазначено у попередньому розділі для визначення використаного ресурсу пластичності необхідно побудувати діаграму пластичності для оброблюваного матеріалу, яка на думку авторів [8, 79, 95] є механічною характеристикою цього матеріалу. Діаграма пластичності представляє собою граничну деформацію до руйнування, яка отримана при різних показниках напруженого стану [8, 95, 107]. При цьому на зовнішній поверхні заготовки, що відповідає зоні контакту, матеріал близький до двовісного розтягування ($\eta=+2$), в той же час на внутрішній поверхні в контактній зоні НДС близький до всебічного стиснення. У зв'язку з чим є необхідним розглянути наступні методики: побудови кривої течії при стисненні та розтягуванні зразків; визначення граничної деформації до руйнування при рівномірному двохосьовому розтягуванні; визначення деформації до руйнування при деформуванні зразків з обмеженням радіальної деформації при значних від'ємних показниках напруженого стану.

2.7.1. Методика побудови кривої течії при стисненні та розтягуванні зразків досліджуваних матеріалів

Крива течії показує залежність між напруженням (σ) і деформацією (ϵ) і дозволяє встановити механічні характеристики матеріалу, зокрема межу текучості, модуль пружності, граничну деформацію, характер зміцнення, тощо. Показник напруженого стану при цьому $\eta = +1$ [102].

Для випробувань на розтяг зазвичай використовуються круглі зразки від 3 мм і більше, при цьому довжину зразків приймають рівною $5 \cdot d_0$. Випробування проводять на універсальних розривних машинах, які по

відомій тяговій силі F розраховують напруження σ в залежності від обраного перерізу. Деформація ϵ визначається з відношення подовження ΔL до початкової довжини L .

Методика визначення накопиченої деформації до руйнування при одновісному розтягуванні (показник жорсткості напруженого стану $\eta = +1$) полягає у поступовому навантаженні досліджуваного зразка до моменту його руйнування. У роботі [137] проведено випробування на розтяг зразків зі сталі 12ХН3А деформація до руйнування яких складала 36%.

Аналогічна методика визначенні накопиченої деформації до руйнування і при одновісному стисненні (показник жорсткості напруженого стану $\eta = -1$). При стисненні застосовуються короткі циліндричні зразки з співвідношенням висоти до діаметра $\approx 1 \dots 2$, які стискаються на випробувальних пресах.

Для проведення випробувань виготовлялися зразки діаметром 15 мм і висотою 30 мм, на торцях яких виконувалися циліндричні виточки глибиною 1 мм та діаметром 13 мм (рис. 2.7). Виточки заповнювали твердим змащенням на основі колоїдного графіту, що забезпечувало однорідний розподіл деформацій до 13%. Експерименти проводилися модернізованому гідравлічному пресі П-50 (рис. 2.2), призначеному для статичних випробувань матеріалів, деталей і виробів на стискання та згин при зусиллях до 600 кН.



Рисунок 2.7 – Зразки для проведення випробувань на стиснення

Для побудови кривої течії до зразків прикладалося навантаження, яке фіксувалося згідно силовимірювача та вимірювалися їхні розміри.

Напруження визначалася по формулі:

$$\sigma_i = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}, \quad (2.3)$$

де: F – сила стискання, Н;

d – діаметр зразка, мм.

Ступінь деформації визначалася за формулою:

$$e_{\text{пр}} = \ln \frac{h}{h_0} \approx 2 \ln \frac{d}{d_0}, \quad (2.4)$$

де: h_0, h – початкова та кінцева висота зразка;

d_0, d – початковий та кінцевий діаметр зразка;

На рисунку 2.8 наведено криву течії сталі 12ХН3А при випробуваннях на стиск, з якої видно, що гранична деформація, що відповідає показнику напруженого стану $\eta = -1$, $e_{\text{пр}} = 80\%$.

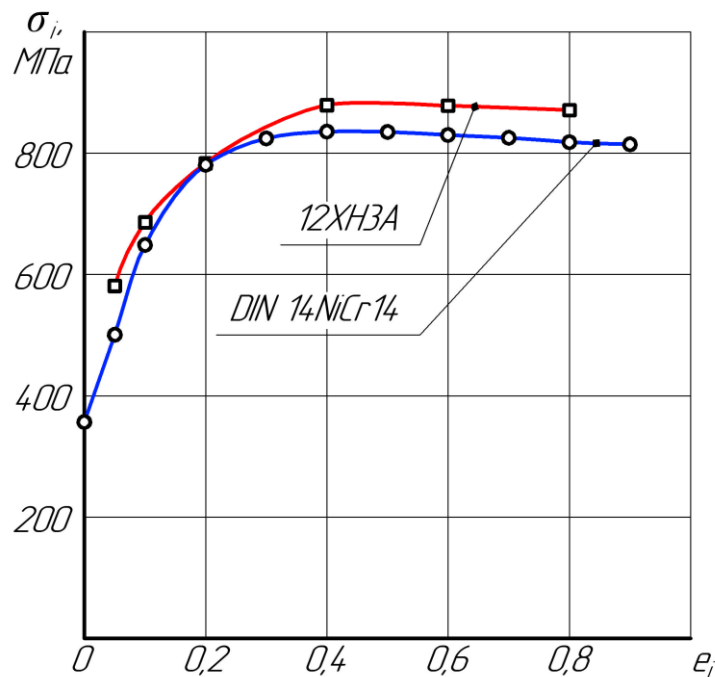


Рисунок 2.8 – Крива течії сталі 12ХН3А отримана при випробуваннях зразків та крива DIN 14NiCr14 з програми DEFORM

Бібліотека матеріалів DEFORM [82] містить аналог сталі 12ХН3А за стандартом DIN – сталь 14NiCr14, що характеризується подібними механічними властивостями. У програмі крива течії цього матеріалу задана дискретними точками (табл. 2.3). Порівняння кривих течії 14NiCr14 та 12ХН3А (рис. 2.8) показало їх близьку відповідність.

Таблиця 2.3 – Точки кривої текучості сталі DIN 14NiCr14 [82]

e_i	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
σ_i	356,8	506,4	648,8	780,8	824,6	835,6	835	830,2	825,4	818,4	814,5

2.7.2. Методика визначення граничної деформації до руйнування при рівномірному двохосьовому розтягуванні

Двохосьове розтягування – це напружений стан, за якого до матеріалу прикладаються нормальні сили одночасно у двох напрямках (наприклад, по осях X та Y). Показник напруженого стану в цьому випадку $\eta = +2$. У попередньому розділі проведено літературний огляд методів випробування зразків для визначення граничної деформації до руйнування при двовісному розтягу.

У роботі [137] автори розраховали за формулою (1.17) та підтвердили дослідженнями деформацію до руйнування при двовісному розтягу, яка становить: $e_{пр.}(+2) = 0,23$.

Для оцінки точності досліджень і уточнення показника напруженого стану розроблена методика моделювання даного процесу. Побудовано трьохвимірну модель круглого зразка діаметром 100 мм та товщиною 5 мм, опори та сферичного пуансона (рис. 2.9).

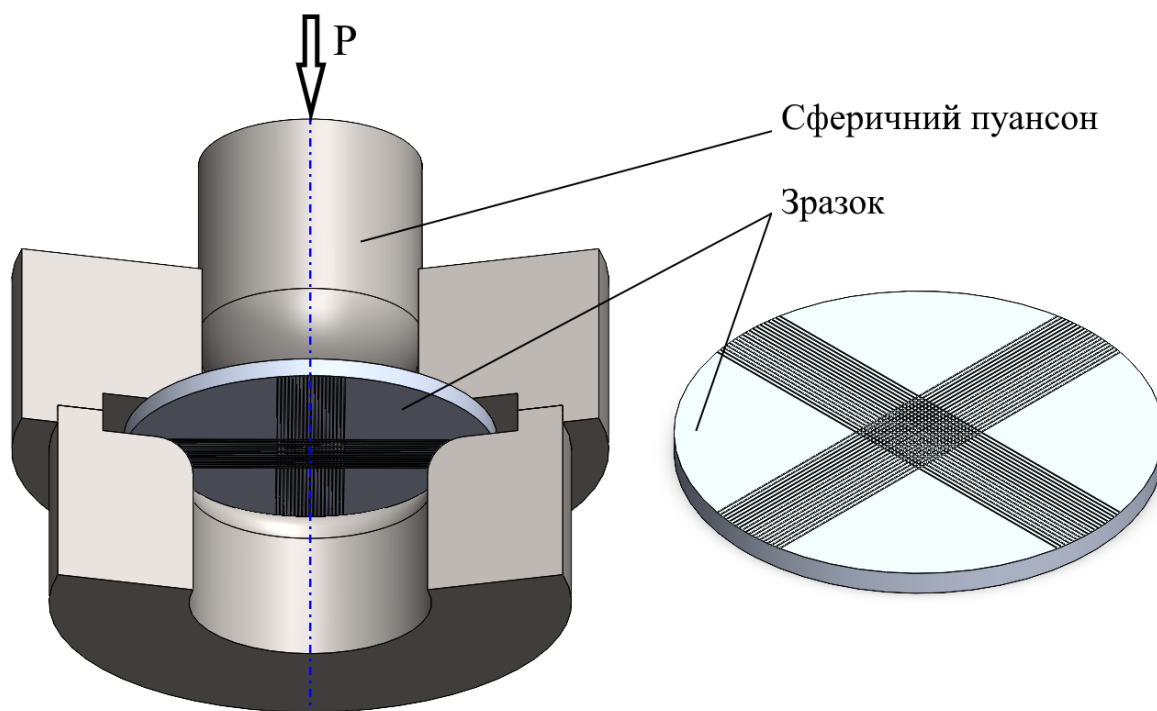


Рисунок 2.9 – Схема випробування зразків при двохосьовому рівномірному розтягуванні

Для моделювання двовісного розтягу використано програмно-розрахунковий комплекс DEFORM. Після імпорту тривимірної геометрії проведено налаштування вирішувача. Метод розрахунку обрано Newton-Raphson у поєднанні з вирішувачем Sparse. Також на цьому етапі визначено розбиття процесу на ітерації за переміщенням пуансона, використано рівномірне розбиття за відстанню. Для більшості операцій оптимальним вважається крок переміщення, що відповідає величині ребра кінцевого елемента в зоні контакту. Швидкість переміщення пуансона задано – $V = 0,5$ мм/с. Між всіма об'єктами дослідження обрано тип тертя за Зібелем з коефіцієнтом 0,02.

Завершальним етапом підготовки є генерація бази даних (*.db), з якою працює вирішувач. У разі некоректного введення параметрів програма формує повідомлення про помилки, що зазвичай пов'язані з браком початкових даних або неправильною постановкою задачі.

Зупинка процесу симулювання проводилась вручну при досягненні накопиченої деформації $\varepsilon = 0,3$ (тобто більшої ніж отримано у дослідях [137] та при розрахунку за формулою 1.11).

Після завершення розрахунку на недеформованому зразку нанесено досліджувані точки у вигляді сітки з кроком 1 мм (рис. 2.9). Далі визначався крок симулювання на якому згідно [8] спостерігалось руйнування, та визначалися точки з максимальним напруженням, у яких і аналізувалися показники інтенсивності напруження, деформацій та показник напруженого стану.

2.7.3. Методика визначення деформації до руйнування при деформуванні зразків з обмеженням окружної деформації при значних від'ємних показниках напруженого стану

Для визначення деформації до руйнування при значних від'ємних показниках напруженого стану скористаємось методикою описаною у роботах [8, 95, 123], в яких автори розглядали побудову діаграми пластичності для сірого чавуну, яка полягає у деформуванні зразків у вигляді втулки з обмеженням окружної деформації.

Розміри зразків зі сталі 12ХН3А для проведення випробувань наступні: зовнішній діаметр $d_{\text{зов.}} = 18$ мм; внутрішній діаметр $d_{\text{вн.}} = 6$ мм; висота зразка $H = 36$ мм. Схема проведення випробувань наведена на рисунку 2.10, а.

Випробування проводили на гідравлічному пресі П-50. Пуансон і матриця виготовлялися зі сталі 40ХГ. Зовнішній діаметр матриці – $D = 60$ мм. Перед дослідженням зразок вільно розміщувався у отворі матриці, яка встановлена на столі випробувальної машини. Діаметральні розміри отвору матриці та зовнішньої поверхні пуансона підібрані з умовою

забезпечення мінімального зазору. Далі до пуансона прикладалось осьове навантаження і відбувалося деформування зразка.

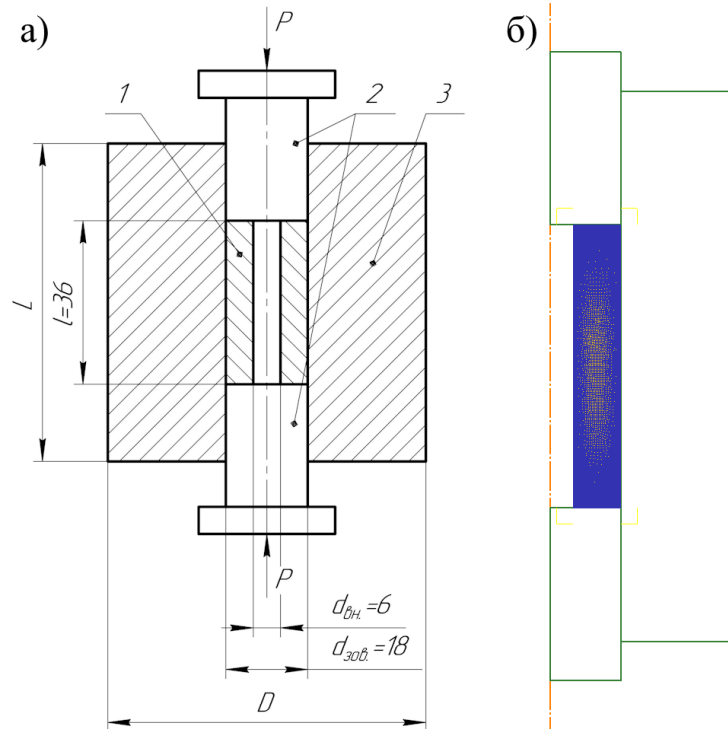


Рисунок 2.10 – а) схема випробування зразків при значних від’ємних показниках напруженого стану, б) модель для симуляції

Для оцінки точності досліджень і уточнення показника напруженого стану розроблена методика моделювання процесу осадки зразка у програмно-розрахунковому комплексі DEFORM. На відміну від моделювання двовісного розтягу дану задачу можна вирішити у 2D як осесиметричну (рис. 2.10, б). Метод розрахунку – Newton-Raphson та прямий вирішувач типу Skyline. Розмір сітки по контуру зразка обрано 0,075 мм, у середині – 0,15 мм. Коефіцієнти тертя прийняті 0,02 між зразком та пуансонами та 0,05 між зразком та обоймою. Швидкість переміщення кожного пуансона задано – $V = 0,1$ мм/с. Крок розрахунку – 0,01 мм/крок.

Після завершення налаштувань згенеровано базу даних (*.db) і проведено розрахунок.

Результати розрахунків вивчалися по середині заготовки, де деформації були однорідними.

2.7.4. Методика побудови діаграми пластичності

Для побудови діаграми пластичності для сталі 12ХН3А слід визначити деформацію до руйнування для показників напруженого стану від +2 до -2 за методиками описаними у підпунктах 1.5.1, 2.7.1, 2.7.2, 2.7.3.

Як було виявлено у першому розділі діаграми пластичності будується в координатах залежності граничної деформації e_p від показника жорсткості напруженого стану η .

На основі базових точок необхідно провести апроксимацію кривої діаграми пластичності, за для визначення проміжних точок, та отримання форми кривої при значних від'ємних значеннях $\eta < -2$.

2.8. Методика імітаційного моделювання схеми осередку деформації та визначення напружено-деформованого стану при ДПР заготовок із пластичних матеріалів програмним комплексом «DEFORM»

Моделювання осередку деформації та НДС осесиметричної заготовки з пластичного матеріалу під час деформуючого протягування здійснювалося в програмному забезпеченні DEFORM 2D/3D™ V 11.0 [82]. Для цього була побудована комп'ютерна модель по схемі представлений на рисунку 2.11.

Задача розв'язувалася в двовимірній осесиметричній постановці, що обумовлено геометрією досліджуваного процесу. Для опису деформування використовувалася Лагранжева постановка задачі, при якій скінченно-елементна сітка переміщується разом із матеріалом.

При моделюванні використовувалися заготовки з однаковим внутрішнім діаметром – $d_0 = 40$ мм, висотою – $H = 150$ мм, та зовнішніми діаметрами: 44, 52, 56, 60, 68 та 76 мм. В подальшому описі будемо використовувати термін товстостінності, який виражається t_0/d_0 і

відповідно для наших заготовок буде дорівнювати: 0,05; 0,15; 0,2; 0,25; 0,35; 0,45.

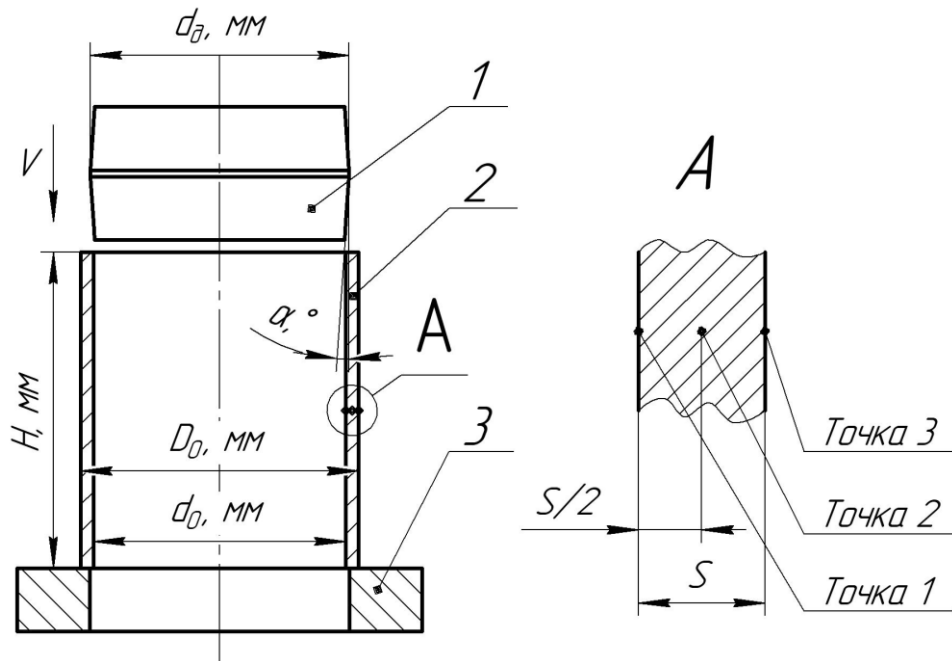


Рисунок 2.11 – Схема обробки: 1 – деформуючий елементи, 2 – деталь, 3 – опора

Деформуючий елемент виконано з різним кутами нахилу твірної робочого конуса $\alpha = 2^\circ$; 4° та 8° . Діаметри робочого елемента підбиралися $d_d = 40,5$; 41 та $41,5$ мм для того щоб під час його проходження створювалися номінальні натяги відповідно в $0,5$; 1 та $1,5$ мм. Швидкість переміщення деформуючого елемента прийнята постійною і дорівнювала – $V = 0,5$ мм/с.

В якості матеріалу для дослідження використовується сталь 12ХН3А, хімічний склад і механічні властивості якої представлені в таблиці 2.1.

Бібліотека матеріалів DEFORM [82] містить аналог вищевказаного матеріалу, а саме DIN 14NiCr14, який використано при моделюванні НДС. У програмному забезпеченні DEFORM крива течії для цього матеріалу задана точками (табл. 2.3), які визначають залежності напруження текучості від істинної деформації при заданих значеннях швидкості деформації та температури ($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)$).

Скінченно-елементна модель включала оброблювану заготовку, деформуючий елемент та опору. Заготовка моделювалася як деформоване тіло із використанням скінченно-елементної сітки, тоді як інструмент і опора розглядалися як абсолютно жорсткі тіла. Поведінка матеріалу заготовки описувалася пружно-пластичною моделлю механіки матеріалу. Розрахунок системи рівнянь рівноваги на кожному кроці здійснювався із застосуванням методу Ньютона–Рафсона та вирішувача типу Skyline, який базується на зберіганні профілю матриці жорсткості та дозволяє ефективно працювати з розрідженими матрицями. Такий підхід забезпечує високу чисельну стійкість і надійність розрахунку при моделюванні нелінійних процесів пластичного деформування.

При обробці заготовок тиском на поверхнях виникають великі напруження стиску та ковзання зв'язане з великими пластичними деформаціями поверхневих шарів. Враховуюче це при налаштуванні взаємодії об'єктів було обрано модель тертя по Зібелю з коефіцієнтами 0,12 для тонкостінних заготовок та 0,08 для товстостінних, які відповідають холодному формуванню.

Сітка заготовки формувалася з використанням квадратичних елементів із локальним згущенням у зоні контакту (біля поверхні отвору – не менше 10 скінчених елементів на 1 мм). Таким чином при заданій швидкості протягування 0,5 мм/с. та кроці інтегрування – 0,25 с. переміщення деформуючого елемента за один крок становить 0,125 мм, що є співрозмірним із характерним розміром скінченного елемента в зоні контакту. Такий вибір параметрів сітки та кроку розрахунку забезпечує коректне відтворення контактної взаємодії та градієнтів напружено-деформованого стану. Розміри скінчених елементів поступово збільшувалися у напрямку до серцевини заготовки. Максимальний розмір елементів у центральній зоні перевищував розмір елементів у зоні контакту в 3-4 рази.

Граничні умови задавалися у вигляді обмеження переміщень на осі симетрії та задання переміщення інструмента. Розрахунок проводився в квазістатичній постановці, оскільки процес деформуючого протягування характеризується відносно низькими швидкостями деформування і відсутністю суттєвих інерційних ефектів. Це дозволяє розглядати процес як послідовність рівноважних станів без урахування інерційних сил.

Після розрахунків маємо можливість отримати наступні епюри: інтенсивності напружень – σ_0 ; гідростатичного тиску – σ ; компонентів тензора напруження σ_r, σ_z та σ_φ ; накопиченої деформації – e_0 та її компонентів e_r, e_z, e_φ ; інтенсивності швидкостей деформації – ξ та її компонентів $\xi_r, \xi_z, \xi_\varphi$; зміщення точок і т.д.

Для аналізу результатів, за допомогою інструменту «Відстеження точок» було побудовано три точки (рис. 2.11) на середині довжини заготовки. Перша на внутрішній поверхні заготовки, друга – посередині між внутрішньою та зовнішньою, третя – на зовнішній поверхні. В деяких випадках аналіз необхідного параметра виконувався тільки на внутрішній поверхні.

Дослідження осередку деформації виконувались шляхом моделювання зміни твірної отвору, а саме визначалися: протяжність контактної зони оброблюваного матеріалу з конічною поверхнею інструменту та з циліндричною стрічкою; висота позаконтактної зони за ділянкою контакту; швидкість деформації ξ у точці 1 (рис. 2.11); приріст пластичності $\Delta\psi$, та пластичність ψ .

Моделювання процесу деформуючого протягування з використанням групи деформуючих елементів виконувалося поетапно з передачею напружено-деформованого стану матеріалу між етапами розрахунку. Для цього використовувався останній крок попереднього розрахунку як початковий стан наступного, що забезпечує збереження всіх історичних змінних, зокрема накопиченої пластичної деформації та напруженого стану.

2.8.1. Визначення довжини контактної зони

Довжина контактної зони визначалася наступним чином: у постпроцесорі Deform було відображено крок моделювання при якому ДЕ під час обробки знаходиться у центральній частині заготовки по осі та за отриманими результатами моделювання спостерігалася епюра нормального тиску на внутрішній поверхні заготовки (рис. 2.12).

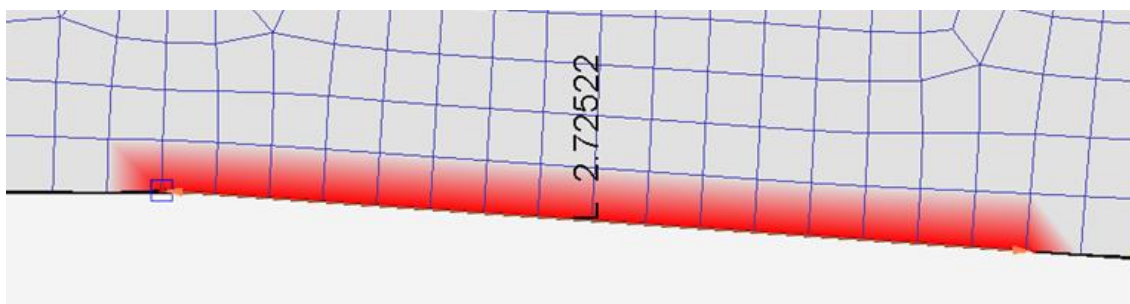


Рисунок 2.12 – Визначення довжини контакту поверхні заготовки з конічною поверхнею ДЕ під час моделювання ДПР

За допомогою інструменту «вимірювання» проводилась фіксація довжини контактної зони внутрішньої поверхні заготовки з конічною поверхнею ДЕ по епюрі нормального тиску (рис. 2.12).

2.8.2. Визначення висоти позаконтактної хвилі та довжини l_2

Визначення висоти позаконтактної хвилі під час ДПР проводилось на основі результатів моделювання по зміщенню попередньо створених точок (рис. 2.11), а саме точки 1 на внутрішній поверхні заготовки. Результат зміщення точок від початкового положення (до обробки) у радіальному напрямку зображено на рисунку 2.13.

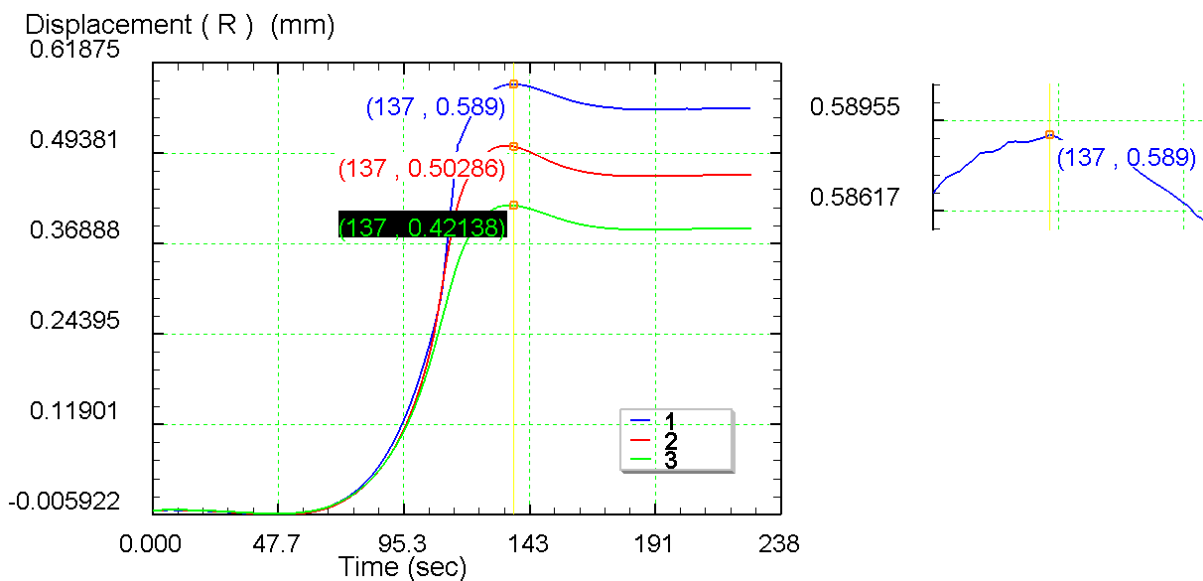


Рисунок 2.13 – Зміщення відстежуваних точок у радіальному напрямку

За отриманими результатами можна визначити висоту позаконтактної хвилі як різницю між отриманим комп'ютерним моделюванням максимальним зміщенням точки 1 та відомим діаметром циліндричної стрічки ДЕ.

Довжина l_2 визначалася різницею координати Y точки 1 під час перебування її на вершині позаконтактної хвилі (рис. 2.14, а) та точки кінця контакту поверхні заготовки з ДЕ (рис 2.14,б).

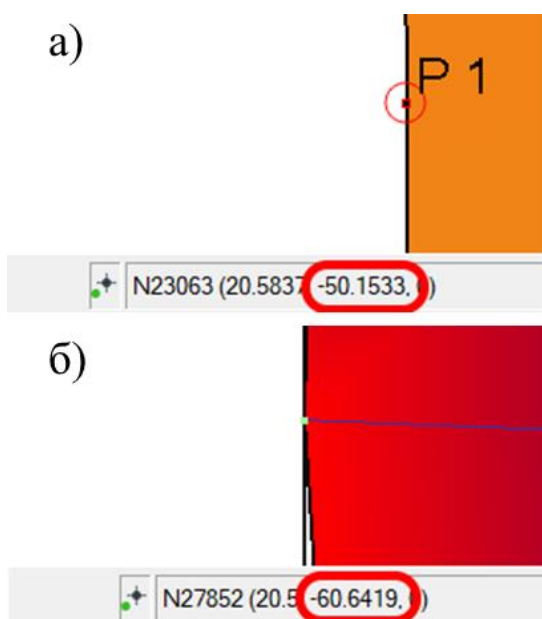


Рисунок 2.14 – Визначення довжини l_2

2.8.3. Визначення усадки отвору після ДПР

Очевидно, що діаметр отвору заготовки після моделювання процесу ДПР можна визначити за допомогою інструментів Deform. Але після моделювання результати вимірювання докорінно не співпадають з результатами проведених експериментів. Хоча під час проведення моделювання використовувався тип об'єкта для заготовки – пружно-пластичний, але для отримання достовірних результатів необхідно провести додаткові налаштування обраного матеріалу, які полягають у внесенні додаткових коефіцієнтів, визначення яких є трудомістким.

Тому визначення усадки отвору проводилось на основі розрахункової методики описаної у роботах [3, 8], але для уточнення отриманих даних використовувалися результати моделювання.

Усадка отвору розраховувалася за наступною формулою [3]:

$$u_d = \frac{d \cdot \sigma_i}{\sqrt{3} \cdot E} \cdot [k_1^2 \cdot (1 - \mu) + (1 + \mu)], \quad (2.5)$$

де: d – діаметр отвору;

σ_i – інтенсивність напруження;

E – модуль Юнга;

μ – коефіцієнт Пуассона;

$$k = \frac{d_0}{d_3}, \quad (2.6)$$

d_0 – початковий діаметр отвору;

d_3 – початковий зовнішній діаметр.

Відповідно значення інтенсивності напруження σ_i може бути уточнено на основі результатів моделювання.

Діаметр отвору після ДПР визначаємо за залежністю:

$$d = d_{\text{ДЕ}} + 2h_2 - u_d, \quad (2.7)$$

2.9. Методика визначення використаного ресурсу пластичності під час ДПР

Для зручності проведення розрахунків використаного ресурсу пластичності результати інтенсивності напружень, гідростатичного тиску та інтенсивності деформації отримані моделюванням було експортовано у Microsoft Excel.

Для визначення деформації до руйнування при коефіцієнті жорсткості напруженого стану, який виникає у кожній конкретній точці дослідження в конкретний час (тобто кожний крок дослідження) необхідно визначити використаний ресурс пластичності відносно апроксимації кривої пластичності матеріалу.

Маючи результати моделювання за допомогою залежності [8] визначають коефіцієнт жорсткості напруженого стану:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma}{\sigma_0}, \quad (2.8)$$

де: σ – гідростатичний тиск, який рівний:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (2.9)$$

σ_0 – інтенсивність напруження, яка рівна:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}, \quad (2.10)$$

Приріст пластичності визначається із співвідношення приросту інтенсивності деформації до граничної деформації, що викликає руйнування:

$$\psi = \Delta e_0 / e_{\text{гр}}, \quad (2.11)$$

Останнім кроком визначаємо використаний ресурс пластичності для кожного кроку дослідження як суму приростів пластичності всіх попередніх кроків:

$$\psi_i = \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2 + \dots + \Delta\psi_i, \quad (2.12)$$

2.10. Висновки за розділом 2

1. Обґрунтовано вибір матеріалу – сталь 12ХН3А, для проведення моделювання та досліджень обробки деформуючим потягуванням;

2. Обґрунтовано вибір розмірів заготовок, який базується на положеннях теорії подібності, що дозволяє зменшити кількість експериментів і поширити результати на широкий діапазон деталей, які можуть оброблятися методом деформуючого протягування. Як базовий параметр прийнято діаметр отвору, відносно якого визначалися всі інші геометричні характеристики у безрозмірному вигляді. Такий підхід забезпечує відтворюваність умов моделювання для деталей інших розмірів;

3. Визначено напрями уточнення фізико-механічних властивостей матеріалу шляхом моделювання, що створює підґрунтя для імітації процесу деформуючого протягування. Це підвищить точність відтворення умов навантаження, забезпечить достовірність аналізу напружено-деформованого стану та дозволить визначити використаний ресурс пластичності матеріалу;

4. Розроблено методику дослідження напружено-деформованого стану в осередку деформації при деформуючому протягуванні із застосуванням МСЕ у програмно-розрахунковому комплексі DEFORM 2D/3D, яка дозволить вивчити інтенсивність і компоненти тензорів напружень та деформацій, а також динаміку зміни гідростатичного тиску та показника напруженого стану.

5. Розроблено методику визначення геометричних характеристик осередку деформації на основі результатів числового моделювання. Вона дає можливість встановлювати основні параметри, що визначають перебіг процесу деформуючого протягування, зокрема: довжину контакту між заготовкою та деформуючим елементом, протяжність позаконтактної зони та висоту хвилі матеріалу, величину усадки отвору після обробки.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАГОТОВОК ТА ОЦІНКА ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ

3.1. Уточнення схеми взаємодії інструмента з заготовкою при ДПР

3.1.1. Особливості схеми осередку деформації при зміні товстостінності заготовки

Схема осередку деформації – одне із основних питань при вивченні процесу деформуючого протягування. Кінематичні, геометричні та енергетичні параметри осередку деформації визначають енерговитрати на процес та впливають на якість оброблених виробів. Тому вивченню схеми осередку деформації присвячено багато робіт, дані яких дещо відрізняються між собою [3, 6, 12, 60, 61, 140].

Так, наприклад, теоретична модель осередку деформації, яка представлена в роботах [6, 60] забезпечує співпадіння результатів теоретичних розрахунків з експериментальними даними тільки до певної товщини стінки, яку автори [3] називають критичною товщиною стінки, тобто модель релевантна тільки для тонкостінних заготовок. При досягненні критичної товщини стінки виникає критичний контактний тиск і модель осередку деформації не працює. Тому уточнимо схему осередку деформації за рахунок симуляції із застосуванням МСЕ. Для цього розглянемо параметри НДС при різних режимах та товстостінності заготовки. Оскільки параметри НДС є відображенням тих явищ, що відбуваються в осередку деформації, розглянемо деякі результати дослідження НДС згідно з розробленою методикою.

Розглянемо дані, приведені на рисунку 3.1, на якому показано зміну швидкостей деформації на поверхні отвору заготовки вздовж осередку

деформації, при симулюванні процесу деформування тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$ та товстостінної – $t_0/d_0 = 0,35$ із сталі 12ХН3А. Для кращої наочності обрано кут $\alpha = 4^\circ$ для тонкостінної деталі та $\alpha = 8^\circ$ для товстостінної. Відносний натяг в обох випадках становить $a/d_0 = 0,025$. Деформування тонкостінної деталі відбувається при контактному тиску $q < q_{кр.}$, а деформування товстостінної деталі – при контактному тиску $q > q_{кр.}$.

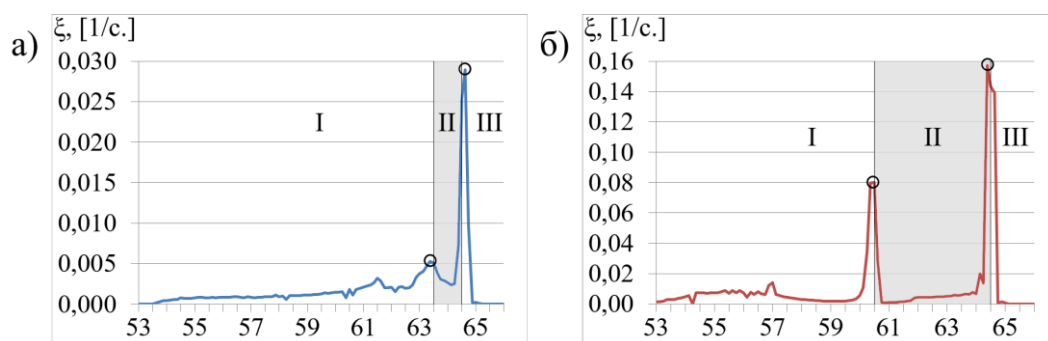


Рисунок 3.1 – Зміна швидкостей деформації на поверхні отвору при деформуванні заготовок із сталі 12ХН3А з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$: а) кут $\alpha = 4^\circ$; $t_0/d_0 = 0,05$; б) кут $\alpha = 8^\circ$; $t_0/d_0 = 0,35$

З рисунку 3.1 випливає, що інтенсивне деформування спостерігається при переході ділянки контакту в позаконтактну зону за ним. Очевидно, це пояснюється наявністю зони локального пластичного деформування. Незначне значення швидкості деформації збільшується до $\xi = 0,03$. Зі збільшенням товстостінності (рис. 3.1, б) зростає контактний тиск, і він починає перевищувати критичний. Це, в свою чергу, впливає на зміну швидкостей деформації. При цьому чітко видно появу двох зон локальної пластичної деформації на початку зони контакту і в її кінці. Швидкість деформації при цьому значно вища, ніж під час деформування тонкостінних деталей, і досягає на початку контактної зони $\xi = 0,08$, а наприкінці контактної зони $\xi = 0,16$. Також слід зазначити, якщо на тонкостінних заготовках зміна швидкості деформації малопомітна, то на товстостінних ці зміни досить значущі.

Для більш глибокого вивчення впливу товстостінності заготовки на осередок деформації було виконано моделювання зміни форми твірної отвору. А саме було побудовано графік зміщення точки 1 внутрішньої поверхні (рис. 2.11) у радіальному напрямку. Результати моделювання (рис. 3.2) показують, що зміна твірної для тонкостінної деталі (крива 1) має плавний характер і відрізняється від зміни твірної для товстостінної деталі (крива 2). Слід звернути увагу, що висота позаконтактної зони за зоною контакту для тонкостінної деталі, є значно вищою, ніж висота позаконтактної зони товстостінної деталі, а протяжність контактної ділянки для товстостінної деталі є значно більшою, ніж для тонкостінної. Чітко видно наплив (рис. 3.2, крива 2), що змінює форму позаконтактної зони перед ділянкою контакту і збільшує її протяжність.

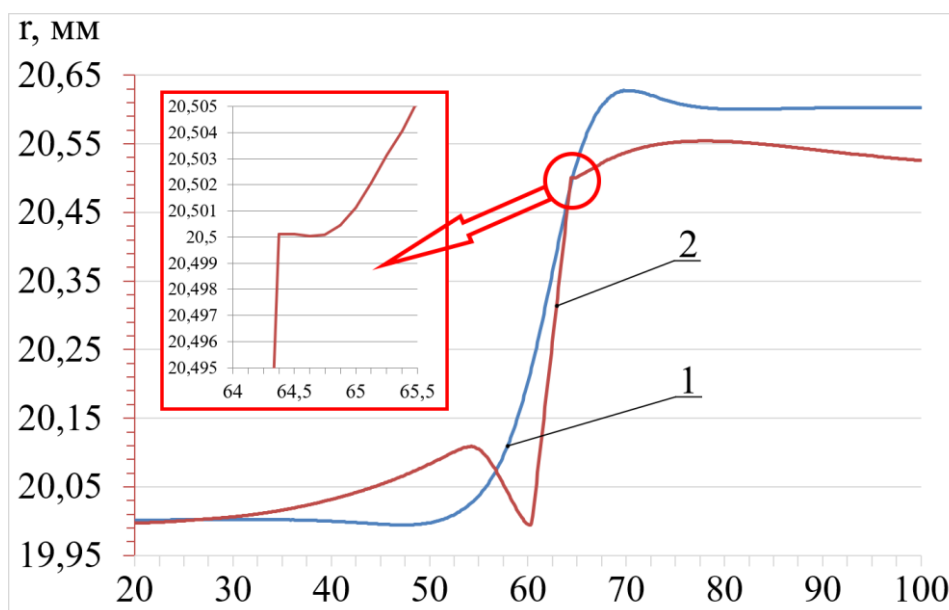


Рисунок 3.2 – Зміна твірної отвору заготовки при деформуванні з натягом $a/d_0 = 0,025$: 1 – кут $\alpha = 4^\circ$; $t_0/d_0 = 0,05$; 2 – кут $\alpha = 8^\circ$; $t_0/d_0 = 0,35$

По кривій 2 (рис. 3.2), яку для наочності представлено у збільшеному масштабі, видно, що контактна зона має дві ділянки локальної пластичної деформації. Перша ділянка розташована на початку контактної зони, друга – на її кінці. У місці переходу контактної зони в позаконтактну чітко видно витікання оброблюваного матеріалу на циліндричну стрічку. Цей факт

узгоджується з даними [37], отриманими під час моделювання НДС внутрішньої поверхні заготовки з чавуну, де розглядалося деформування з незначними пластичними деформаціями поверхневого шару отвору.

Як показав літературний огляд, автори робіт [3, 8], відзначають, що кінематика деформації не залежить від оброблюваного матеріалу. Тому отримані нами результати моделювання сталі 12ХН3А будуть справедливими і для інших пластичних матеріалів.

Для додаткового підтвердження факту витікання матеріалу з контактної зони у позаконтактній при появі в ній критичного тиску розглянемо рисунок 3.3, на якому, за розробленою методикою (розділ 2), показані місця контакту оброблюваного матеріалу з циліндричною ділянкою деформуючого елемента в залежності від товщини стінки.

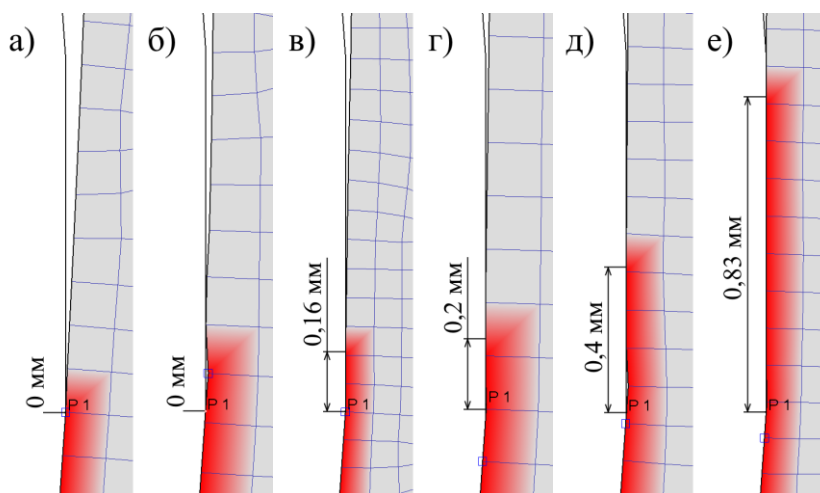


Рисунок 3.3 – Ділянки позаконтактної зони за зоною контакту, що контактують із циліндричною ділянкою деформуючого елемента під час симуляції деформування заготовок із натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$,

кутом $\alpha = 4^\circ$ і товстостінністю t_0/d_0 :

а) 0,05; б) 0,15; в) 0,2; г) 0,25; д) 0,35; е) 0,45

З рисунку видно, що на тонкостінних заготовках (рис. 3.3, а та б) відсутній контакт циліндричної стрічки з оброблюваною поверхнею. Зі збільшенням товстостінності підвищується контактний тиск, який викликає появу осрової течії оброблюваного матеріалу з ділянки контакту в

позаконтактну зону. Про це свідчить поява контакту оброблюваного матеріалу з циліндричною стрічкою (рис. 3.3, в). Подальше збільшення товстостінності призводить до зростання контактних навантажень і більш інтенсивного витікання матеріалу з контактної зони. Це викликає збільшення протяжності контакту оброблюваного матеріалу з циліндричною стрічкою (рис. 3.3, г, д, е), що приводить до зниження висоти позаконтактної зони. Подібний факт витікання матеріалу з контактної зони отримали автори [37, 138], які моделювали контактну взаємодію заготовки із чавуну при роздачі її конічним пуансоном з радіальним переміщенням.

Також отримані результати дозволяють пояснити немонотонний характер зміни висоти позаконтактної зони за ділянкою контакту в залежності від товстостінності, який було отримано експериментально авторами [3]. Спочатку при деформуванні тонкостінних виробів при $q < q_{кр}$ висота позаконтактної зони зростає, але зі збільшенням товщини стінок контактний тиск зростає і починає відповідати $q > q_{кр}$. Матеріал починає витікати з контактної ділянки і, отже, зменшувати висоту позаконтактної зони за ним. Чим товща стінка заготовки, тим вище значення q і тим більше матеріалу з ділянки контакту витікає в позаконтактні зони, зменшуючи висоту h_2 (рис. 1.4).

3.1.2. Варіанти схеми осередку деформації при зміні товстостінності заготовки

Виконане дослідження осередку деформації дало змогу уточнити відому схему взаємодії інструменту з виробом (рис. 3.4, а) і встановити появу зон локального пластичного деформування, а також зміни в геометрії течії позаконтактних зон осередку деформації під час обробки товстостінних деталей. Ця зміна виражається у витіканні оброблюваного матеріалу з контактної зони в позаконтактні (рис. 3.4, б).

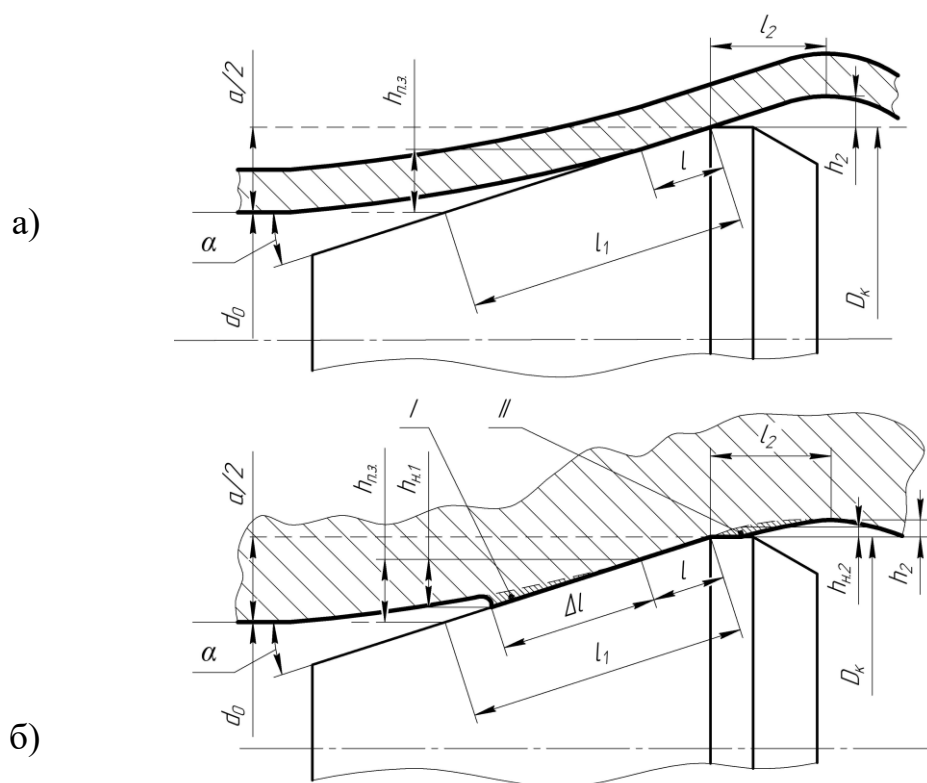


Рисунок 3.4 – Деформуюче протягування заготовки: а – тонкостінної $q < q_{кр}$;

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

I – наплив попереду ділянки контакту; II – наплив за ділянкою контакту

Усе це спричиняє зміну геометричних параметрів осередку деформації і призводить до утворення перегинів функції $l_2 = f(t_0/d_0)$, $h_2 = f(t_0/d_0)$. Раніше ці перегини зафіксовані експериментально авторами [3], проте причини їхньої появи не були з'ясовані. Подібний результат було отримано в роботі [37, 138], де вивчалось деформування в осередку деформації заготовок із чавуну СЧ20. Там також були присутні зони локального пластичного деформування, незважаючи на незначні деформації, яких зазнавала тільки внутрішня поверхня заготовки.

На рис. 3.4 наведені варіанти осередку деформації, які можуть існувати при різній товстостінності.

За результатами моделювання довжину контактної зони при $q < q_{кр}$ (схема взаємодії внутрішньої поверхні заготовки описується згідно з рис. 3.4 а) можна визначити як:

$$l = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha} - \frac{h_{п.з.}}{\sin \alpha}, \quad (3.1)$$

де: a – натяг на елемент;

α – кут нахилу твірної забірного конуса деформуючого елемента;

$h_{п.з.}$ – висота позаконтактної зони.

Коли контактний тиск досягає критичного значення, довжина контактної зони починає збільшуватися за рахунок утворення напливу, що збільшує її довжину (рис. 3.4, б). В цьому випадку довжина контакту розраховується згідно:

$$l = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha} - \frac{h_{п.з.}}{\sin \alpha} + \frac{h_{н.1}}{\sin \alpha}, \quad (3.2)$$

де: $h_{н.1}$ – додаткова складова, яка враховує висоту локальної пластичної зони (напливу).

Висота позаконтактної зони за ділянкою контакту також змінюється, починаючи зменшуватись за рахунок появи локальної зони пластичного деформування у вигляді напливу, який утворюється при витіканні матеріалу заготовки в місці закінчення контактної зони на циліндричну стрічку.

Зі збільшенням контактного тиску, наприклад, за рахунок товстостінності заготовки, значення цього напливу зростає, а дійсна висота позаконтактної зони зменшується:

$$h_{2\text{ д.}} = \quad_2 - h_{н.2}, \quad (3.3)$$

де: $\quad_2$ – висота хвилі за зоною контакту;

$h_{н.2}$ – додаткова складова, яка враховує висоту локальної пластичної зони (витікання).

Отже результати моделювання свідчать, що контактна зона може мати дві ділянки локальної пластичної деформації, що підтверджується даними (рис. 3.1, 3.2, 3.3). Крім того, виконане моделювання уточнило наявність двох варіантів схеми осередку деформації під час ДПР і уточнило їх форму: для тонкостінних деталей (рис. 3.4, а) і товстостінних (рис. 3.4, б).

3.1.3. Критична товщина стінки і її вплив на осередок деформації

Для перевірки результатів моделювання, за методикою описаною у розділі 2, було проведено ряд експериментів (Додаток Е) з визначення контактної зони в широкому діапазоні зміни товстостінності заготовки, натягу на елемент, а також геометрії інструменту. Після обробки заготовок проводилось вимірювання довжини відбитків і порівняння їх з результатами моделювання.

На рисунку 3.5 (а) показано зміну протяжності контакту в залежності від товстостінності заготовки під час використання різних натягів (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. 3.5, б).

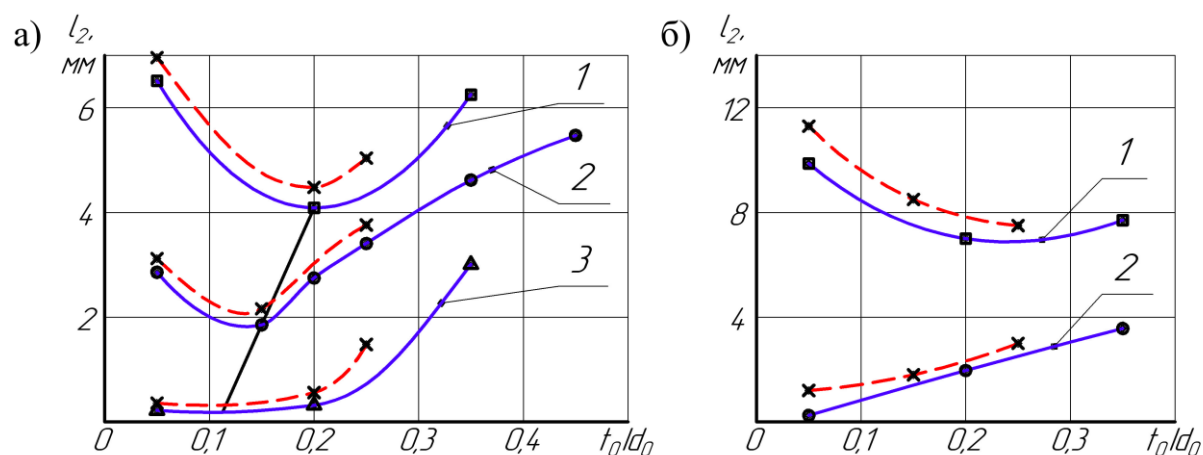


Рисунок 3.5 – Залежність довжини контакту від товстостінності при симуляції деформування елементом: а) з кутом $\alpha = 4^\circ$ та натягом на елемент a/d_0 : 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125; б) з натягом $a/d_0 = 0,025$ і кутом α : 1 – 2° ; 2 – 8° . Пунктиром нанесені результати експерименту з визначення довжини контакту за допомогою алмазовмісних плям

Значення критичної товщини стінки, при якій в контактній зоні виникає критичний контактний тиск [3], який викликає появу перегину функції $l_2 = f(t_0/d_0)$, можна визначити за такою залежністю:

$$(t_0/d_0)_{\text{кр}} = 0,07 + 3,46 a/d_0, \quad (3.4)$$

Цю залежність отримано статистичною обробкою результатів моделювання, які дають змогу визначити точки перегину функції $l_2 = f(t_0/d_0)$.

Деякі відмінності експериментальних результатів від розрахункових спричинені тим, що виміряна протяжність контакту перевищує розрахункову через виступання алмазних зерен над поверхнею отвору. Що стосується довжини позаконтактної зони за ділянкою контакту, то її розрахункові значення наведено на рисунку 3.6 (крива 1). За своєю формою вона практично не відрізняється від теоретичної залежності для визначення цього параметра (рис. 3.6, крива 2), узятій з рисунку 1.6 та отриманій по моделі для тонкостінних заготовок, побудованій на основі варіаційних принципів [6].

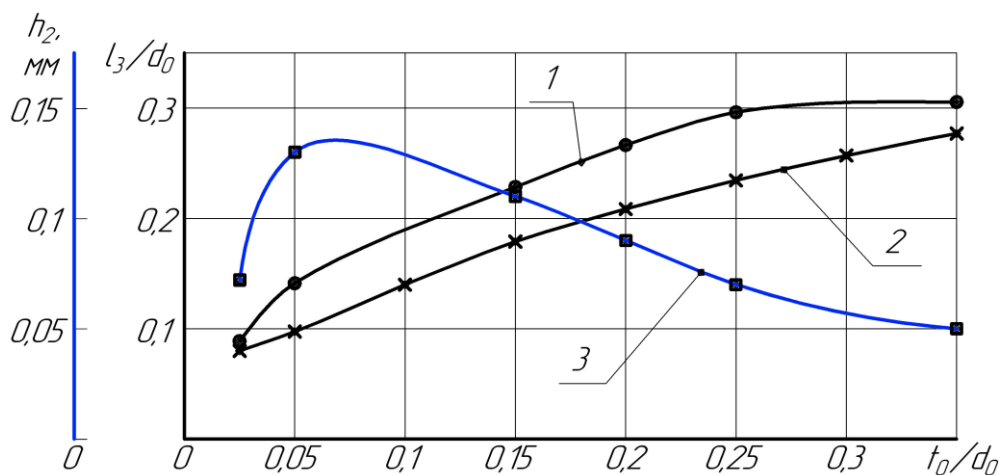


Рисунок 3.6 – Залежність протяжності позаконтактної зони за ділянкою контакту від товстостінності заготовки, отриманої при симуляції деформування заготовок зі сталі 12ХН3А при різній товстостінності:

- 1 – розрахункові значення, отримані під час моделювання;
- 2 – розрахункові значення, отримані теоретичним шляхом [6];
- 3 – зміна висоти позаконтактної зони, отримана моделюванням

Деяка відмінність у результатах розрахунку зумовлена тим, що під час використання варіаційних принципів розрахункова модель не враховувала контакт оброблюваного матеріалу з циліндричною стрічкою. Моделювання показує наявність контакту з циліндричною стрічкою матеріалу заготовки, що витікає із зони контакту під дією критичного контактного тиску, який впливає на протяжність позаконтактної зони. Висота позаконтактної зони (крива 3) має екстремальний характер. Спочатку вона збільшує свою висоту, а потім починає знижуватися, що також зумовлено витіканням матеріалу із зони контакту.

Таким чином, результати моделювання по уточненню схеми осередку деформації при деформуючому протягуванні підтвердилися розрахунками протяжності контактної зони, протяжності позаконтактної зони за ділянкою контакту і зміною її висоти, що свідчить про достовірність отриманих результатів.

Виконані дослідження дозволили встановити, що за наявності в зоні контакту тисків менших за критичні схема осередку деформації відповідає схемі, наведеній на рис. 3.4 (а), яка включає ділянку контакту і дві позаконтактні зони, що сполучені з нею.

За наявності в зоні контакту тиску, що перевищує критичний, у місці сполучення позаконтактних зон із ділянкою контакту з'являються зони локального пластичного деформування і схема осередку деформації відповідає схемі (рис. 3.4, б). Відповідно до цього рисунка, у передній зоні з'являється наплив, що збільшує довжину контактної зони, а задня – сходиною, утвореною матеріалом деталі, що витікає із зони контакту під впливом критичного контактного тиску і зменшує висоту позаконтактної зони.

Поява зон локального пластичного деформування змінює схему осередку деформації (тобто схему взаємодії інструменту з деталлю), а також її геометричні параметри та призводить до появи перегинів функції $l_k = f(t_0/r_0)$ і $h_{п.з.} = f(t_0/r_0)$.

Визначення розмірів позаконтактних зон та ділянки контакту має надзвичайно важливе значення у розробці технологічного процесу з використанням ДПР, а також при проектуванні робочих елементів деформуючих протяжок.

3.2. Напружено-деформований стан при деформуючому протягуванні заготовок із пластичних металів

Деформуюче протягування може застосовуватися як для чорнових, так і для фінішних операцій, забезпечуючи формоутворення заготовки та підвищення її точності. У процесі обробки деформується не тільки поверхневий шар, а й весь об'єм матеріалу заготовки, що дозволяє отримати на робочій поверхні сприятливі щодо втомної міцності залишкові напруження стиснення.

Напружено-деформований стан в осередку деформації визначає не тільки силові навантаження процесу, а й впливає на формування таких показників якості оброблених деталей, як: шорсткість і мікрорельєф обробленої поверхні, глибину та ступінь наклепу, формозміну оброблених деталей, а також на використаний ресурс пластичності обробленої деталі.

Тому подальший аналіз і моделювання НДС є необхідним для глибокого розуміння процесу деформуючого протягування та оптимізації його технологічних параметрів.

Розглянемо процес деформування заготовок з кінцевою товщиною стінки при значних пластичних деформаціях. Враховуючи той факт, що при деформуванні пластичних деталей деформується весь об'єм заготовки та використовуючи розроблену методику моделювання, наведену у другому розділі, виконаємо аналіз зміни наступних параметрів, які відповідають за НДС та залежні від нього [139]: інтенсивності напружень – σ_0 ; компонентів тензора напружень σ_r, σ_z та σ_φ ; дотичних напружень τ_{rz} ; накопиченої

деформації – e_0 та її компонентів e_r, e_z, e_φ ; інтенсивності швидкостей деформації – ξ та її компонентів $\xi_r, \xi_z, \xi_\varphi$, а також зміни коефіцієнту жорсткості напруженого стану η та гідростатичного тиску σ по довжині осередку деформації.

При вивченні НДС особливу увагу будемо звертати на точки 1, 2 та 3 (рис. 2.11) тобто на внутрішню (точка 1), серединну (точка 2) та зовнішню поверхні (точка 3) заготовок з різною товстостінністю t_0/d_0 від 0,05 до 0,35, на яких, як визначено у попередньому підрозділі, виникають різні умови контактного тиску q , при стінці $t_0/d_0 = 0,05 - q < q_{кр}$, при стінці $t_0/d_0 = 0,35 - q > q_{кр}$.

Зміну інтенсивності швидкості деформації на внутрішній поверхні тонкостінної і товстостінної заготовки частково було розглянуто у пункті 3.1 і наведено на рисунку 3.1. На рисунку 3.7 наведена зміна інтенсивності швидкості деформації у точках 1, 2 та 3, при деформуванні тонкостінної – $t_0/d_0 = 0,05$ та товстостінної – $t_0/d_0 = 0,35$ заготовки з натягом $a/d_0 = 0,025$ та кутом нахилу твірної робочого конуса $\alpha = 4^\circ$.

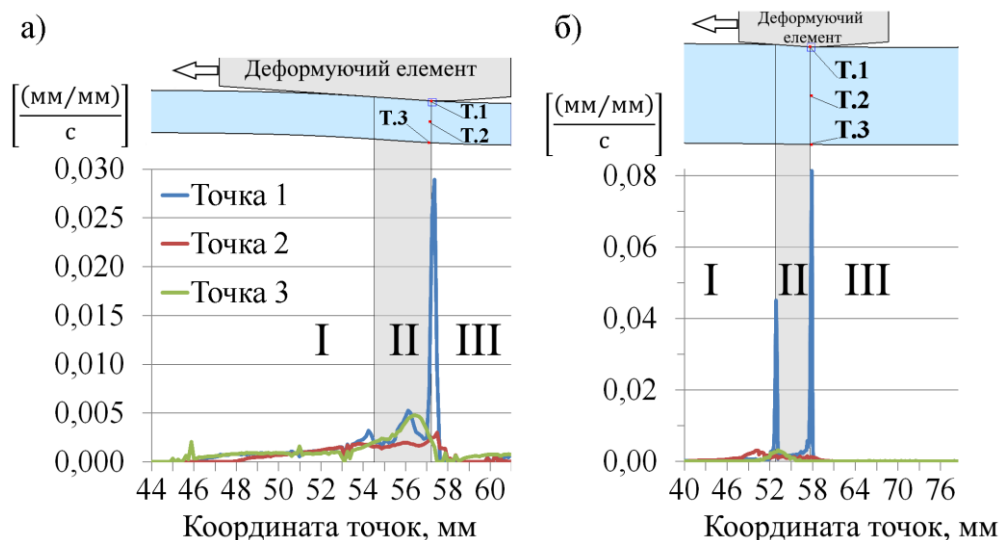


Рисунок 3.7 – Зміна інтенсивності швидкостей деформації під час деформування заготовок із натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кут $\alpha = 4^\circ$, товстостінність t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,35

Як вже було зазначено у пункті 3.1 інтенсивне деформування спостерігається при сполученні ділянки контакту з позаконтактними зонами за нею та перед нею. Це пояснюється наявністю зон локального пластичного деформування. На тонкостінній заготовці швидкість деформації на внутрішній, у середній та зовнішній поверхнях майже рівні окрім зазначеного пікового значення – $\xi = 0,03$, тобто деформування протікає рівномірно по всій товщині стінки, що свідчить про однорідну наскрізну деформацію. Інша ситуація при деформуванні заготовок із значною товстостінністю. Там, окрім, пікових значень $\xi = 0,045$ та $\xi = 0,08$ в зонах локального пластичного деформування на внутрішній поверхні, можна помітити, що значення швидкості деформації найвище на внутрішній поверхні, потім на серединній поверхні і лише потім на зовнішній. Подібний характер поведінки мають і складові компоненти швидкості тензора інтенсивності деформації ξ_r , ξ_z , ξ_φ , які представлені на рисунку 3.8 для товстостінності $t_0/d_0 = 0,05$ та рисунку 3.9 для товстостінності $t_0/d_0 = 0,35$.

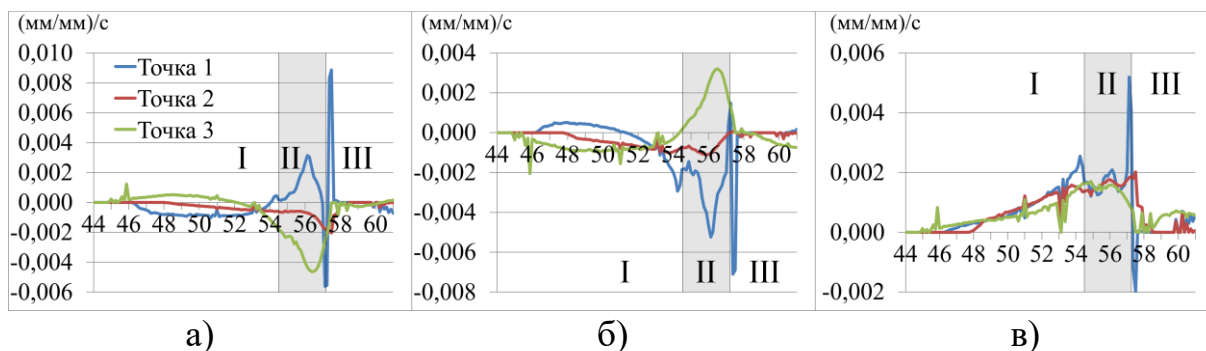


Рисунок 3.8 – Зміна інтенсивності швидкостей деформації при деформуванні тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний компонент ξ_r ; б – осьовий компонент ξ_z ; в – окружний компонент ξ_φ

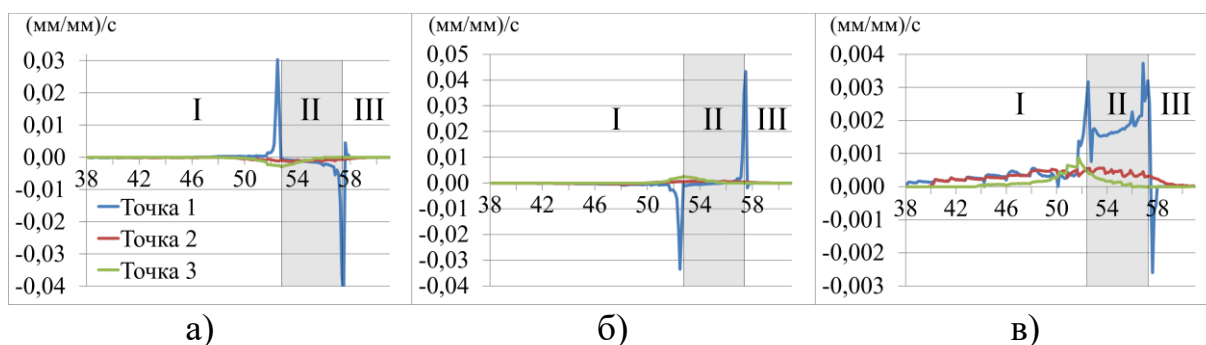


Рисунок 3.9 – Зміна інтенсивності швидкостей деформації при деформуванні товстостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний компонент ξ_r ; б – осьовий компонент ξ_z ; в – окружний компонент ξ_φ

Наявність локальних зон пластичного деформування, поява яких уточнює схему осередку деформації, вимагає поглибленого вивчення НДС в осередку деформації.

3.2.1. Вплив товстостінності заготовки на НДС

Розглянемо зміну інтенсивності напружень і деформації (рис. 3.10) на внутрішній (точка 1) і зовнішній (точка 3) поверхнях заготовок різної товщини.

Наведений рисунок показує, що між інтенсивностями напружень і деформацій є певна кореляція. Деформація на внутрішній поверхні починає накопичуватися в позаконтактній зоні «І» перед ділянкою контакту. Потім основна частина деформації відбувається в контактній зоні «ІІ», і продовжується в позаконтактній зоні «ІІІ». Деформація на зовнішній поверхні тонкостінних деталей (рис. 3.10, а, т.3) практично не відрізняється від деформації на внутрішній поверхні (т.1) в зоні контакту «ІІ» і в першій позаконтактній зоні «І». У позаконтактній зоні «ІІІ» деформація на зовнішній поверхні значно менша, ніж на внутрішній, тому що на

внутрішній поверхні присутня ділянка локальної пластичної деформації в місці переходу контактної ділянки в позаконтактну зону за нею.

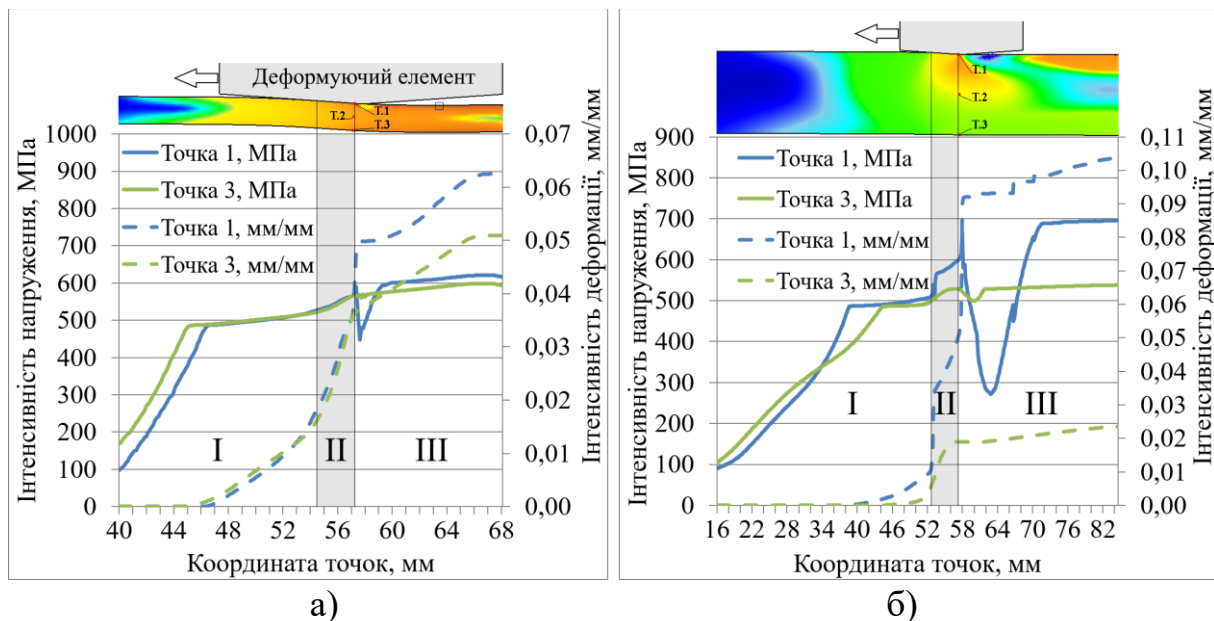


Рисунок 3.10 – Зміна інтенсивності напружень та інтенсивності деформацій в осередку деформації під час моделювання деформування заготовок із натягом $a/d_0 = 0,025$, $\alpha = 4^\circ$, товстостінністю t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,35

Зміна інтенсивності напружень уздовж осередку деформації для тонкостінних деталей практично однакова по всій товщині стінки. Але після виходу з контактної зони на початку позаконтактної зони «ІІІ» на внутрішній поверхні спостерігається локальне падіння інтенсивності напружень до значення $\sigma_0 = 450$ МПа, що обумовлено наявністю зони пластичної деформації.

Для товстостінних деталей (рис. 3.10, б) характер зміни інтенсивності деформації на внутрішній і зовнішній поверхнях також аналогічний між собою. Однак значення самої деформації на внутрішній поверхні набагато вище, ніж на зовнішній.

Зміна інтенсивності напружень для товстостінних деталей (рис. 3.10, б) практично однакова на внутрішній і зовнішній поверхнях і подібна до зміни цього параметру при деформуванні тонкостінних деталей

(рис. 3.10, б). Слід зазначити, що в цьому випадку локальне падіння інтенсивності напружень у зоні локальної пластичної деформації за ділянкою контакту набагато помітніше – воно знижується до значення $\sigma_0 = 270$ МПа.

Також розглянемо зміну компонентів тензора напружень як для тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$ (рис. 3.11), так і для товстостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ (рис. 3.12).

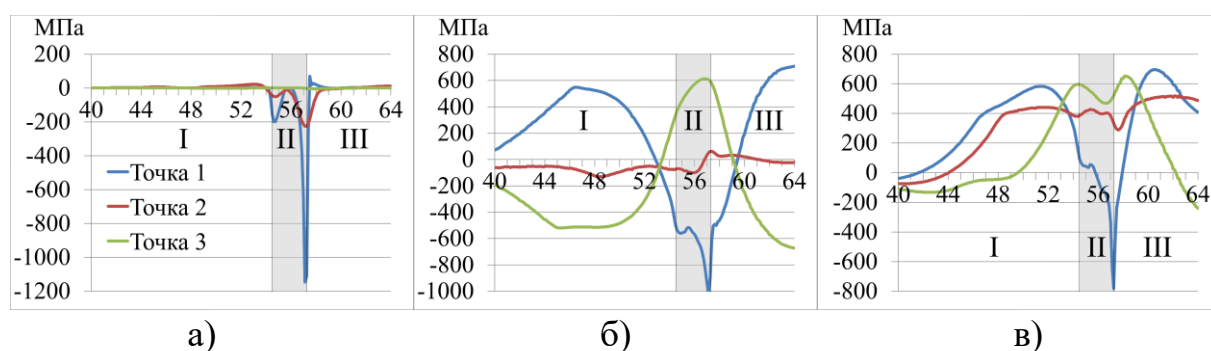


Рисунок 3.11 – Зміна компонентів тензора напружень при деформуванні тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний компонент σ_r ; б – осьовий компонент σ_z ; в – окружний компонент σ_φ

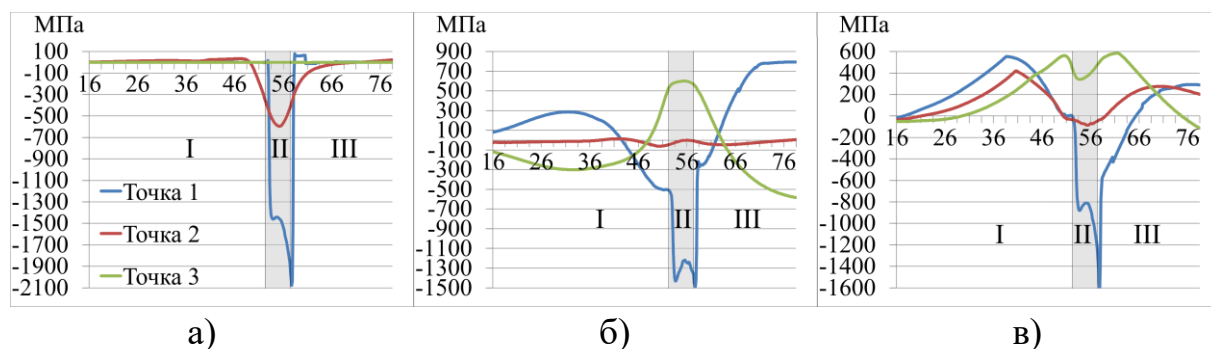


Рисунок 3.12 – Зміна компонентів тензора напружень при деформуванні товстостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний компонент σ_r ; б – осьовий компонент σ_z ; в – окружний компонент σ_φ

З графіків видно, що на початку контактної зони на внутрішній поверхні відбувається інтенсивна пластична деформація. Компоненти тензора напружень на даній ділянці для тонкостінної заготовки ($t_0/d_0 = 0,05$) сягають: радіальний $\sigma_r = -1150$ МПа, осьовий $\sigma_z = -1040$ МПа та окружний $\sigma_\varphi = -780$ МПа. Із збільшенням товщини стінки вони зростають і при товстостінності $t_0/d_0 = 0,35$ їх значення наступні: $\sigma_r = -2080$ МПа, $\sigma_z = -1490$ МПа, $\sigma_\varphi = -1630$ МПа. Від'ємні значення всіх компонентів тензора напружень на внутрішній поверхні заготовки свідчать про те, що в зоні контакту матеріал перебуває в стані інтенсивного об'ємного стиску. В кінці контактної зони відбувається різке падіння від'ємного значення компонентів тензора напружень. Більш того, при переході з контактної зони в позаконтактну з'являються позитивні значення компонентів тензора напружень, що також свідчить про появу зони локальної пластичної деформації в цьому місці. Позитивні значення осьових напружень після контактної зони зростають з ростом товстостінності (рис. 3.11, б; 3.12 б). Ці результати показують, що величина зони локальної пластичної деформації та позитивні значення тензора напружень залежать від товстостінності заготовки. Тобто чим більша товстостінність, тим більший контактний тиск, і тим інтенсивніше відбувається утворення локальної зони пластичного деформування і поява осьових напружень розтягу, що в свою чергу впливає на осьову компоненту тензора деформації.

Що до результатів на зовнішній поверхні, то там ситуація зворотна. В зоні, що відповідає ділянці контакту, осьова та окружна складові тензора напруження мають позитивні значення, радіальна складова знаходиться в межах нуля. Тобто на зовнішній поверхні має місце напружений стан, близький до двовісного розтягу. Після виходу з контактної зони осьова та окружна складові тензора напружень зменшуються, причому осьові напруження змінюють свій знак на від'ємний, а окружні знижуються до нуля. Це істотно впливає на утворення похибок форми оброблених

заготовок, а саме, у тонкостінних на кінцевих ділянках спостерігається зменшення діаметра в порівнянні з серединою, тобто бочкоподібність.

Гідростатичний тиск у осередку деформації (рис. 3.13, 3.14) змінюється також подібним чином. Його значення σ позитивне в позаконтактних зонах, а в контактній досягає досить значного від'ємного значення $\sigma = 950$ МПа (для $t_0/d_0 = 0,05$) і $\sigma = 1200 \dots 1600$ МПа (для $t_0/d_0 = 0,35$), що обумовлено збільшенням контактного тиску при зростанні товстостінності.

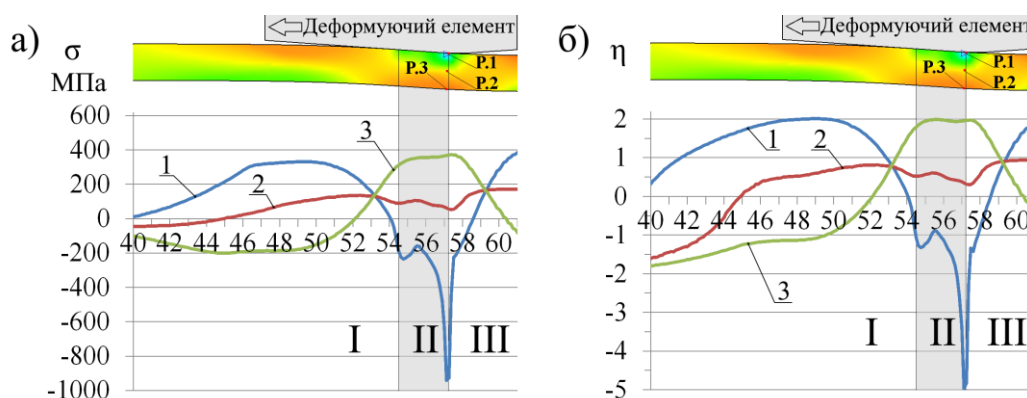


Рисунок 3.13 – Зміна гідростатичного тиску (а), показника напруженого стану (б) в осередку деформації при симуляції оброблення заготовок з $t_0/d_0 = 0,05$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ і кутом $\alpha = 4^\circ$:

1 – внутрішня поверхня; 2 – серединна поверхні; 3 – зовнішня поверхня

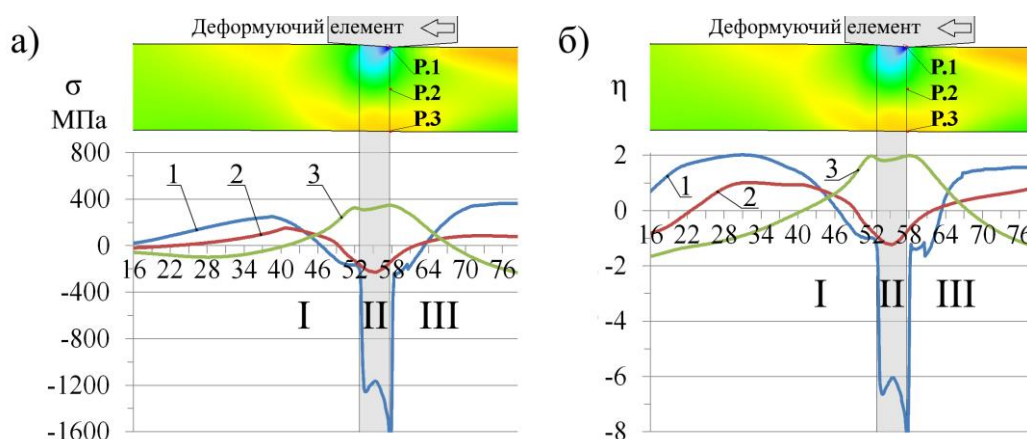


Рисунок 3.14 – Зміна гідростатичного тиску (а), показника напруженого стану (б) в осередку деформації при симуляції оброблення заготовок з $t_0/d_0 = 0,35$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ і кутом $\alpha = 4^\circ$:

1 – внутрішня поверхня; 2 – серединна поверхні; 3 – зовнішня поверхня

Слід зазначити, що присутність в зоні контакту значного від'ємного значення гідростатичного тиску також свідчить про наявність на внутрішній поверхні заготовки умов, близьких до всебічного стиску.

На зовнішній поверхні зміна параметра σ докорінно відрізняється від зміни цього параметра на внутрішній поверхні. На зовнішній поверхні в позаконтактних зонах мають місце стискуючі напруження, а в контактній зоні параметр σ стає позитивним (рис. 3.13-3.14, а). На серединній поверхні значення гідростатичного тиску практично постійне вздовж осередку деформації.

Зміна показника напруженого стану η (рис. 3.13-3.14, б) корелює зі зміною гідростатичного тиску. На внутрішній поверхні в позаконтактних зонах значення $\eta \approx +2$. У зоні контакту для тонкостінних деталей значення $\eta = -5$. Водночас для товстостінних деталей негативне значення показника напруженого стану зростає до значення $\eta = -8$.

На зовнішній поверхні показник напруженого стану η позитивний і дорівнює $\eta \approx +2$, що відповідає двовісному розтягуванню. Подібний результат був отриманий авторами [8, 81] під час експериментального дослідження НДС на зовнішній поверхні заготовок методом слоїстих моделей. На серединній поверхні цей показник уздовж осередку деформації практично не змінюється.

У дотичних напружень τ_{rz} на початку контактної зони, що відповідає точці 1, спостерігається поява локальної зони розтягуючих напружень, які після появи ділянки інтенсивного об'ємного стиснення стають стискуючими, причому максимальне значення розтягуючих і стискаючих напружень приблизно однакове. До кінця зони контакту від'ємні значення τ_{rz} знижуються до 0. Слід зазначити, що в зоні, яка відповідає точці 2, дотичні напруження відповідають характеру контактної зони, проте більші за величиною і виходять за зону контакту (рис. 3.15).

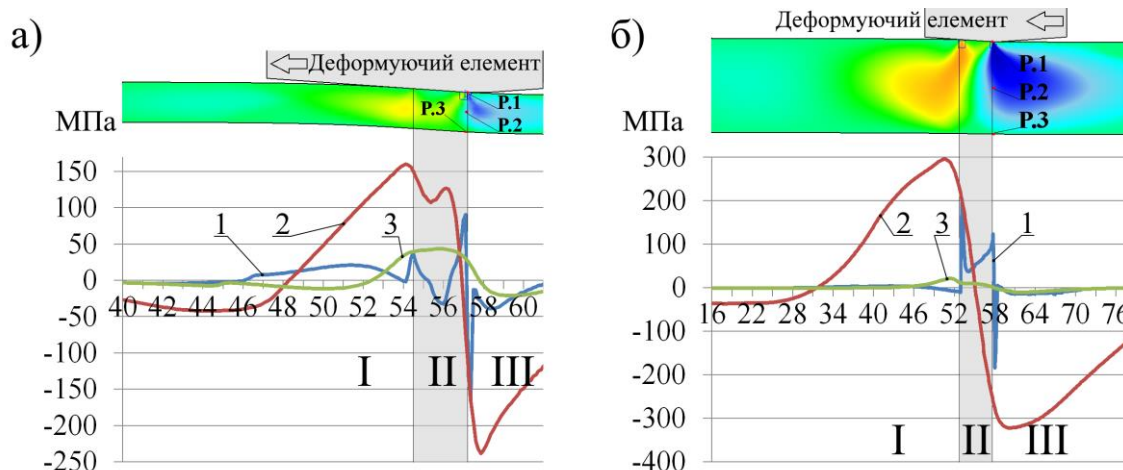


Рисунок 3.15 – Зміна дотичних напружень у осередку деформації при симуляції оброблення заготовок з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ і

кутом $\alpha = 4^\circ$ і товстостінністю заготовки t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,35

1 – внутрішня поверхня; 2 – серединна поверхня; 3 – зовнішня поверхня

3.2.2. Вплив товстостінності заготовки на деформований стан при ДПР

Інтенсивність деформації максимальна біля внутрішньої поверхні, потім у міру зростання товщини стінки знижується і стає мінімальною на зовнішній поверхні (рис. 3.10, а, б). Слід зазначити, що у тонкостінних деталей максимальна інтенсивність деформації біля внутрішньої поверхні, дещо нижча вона на зовнішній поверхні, і мінімальне значення відповідає серединній поверхні. Очевидно, що така різниця зумовлена тим, що у тонкостінних деталей деформація наскрізна і практично однорідна. Тому наявність двовісного розтягування на зовнішній поверхні призводить до того, що деформація зовнішньої поверхні більша, ніж на серединній.

Зі збільшенням товщини стінки спостерігається відмінність у величині інтенсивності деформації – на товстостінних заготовках вона дещо вища в кожній із точок. Також відмінність є в значеннях компонентів тензора деформації (рис. 3.16, 3.17).

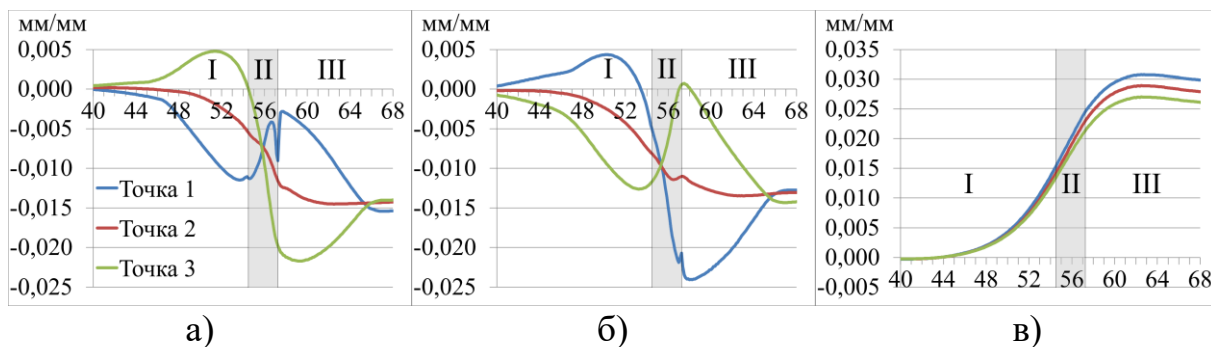


Рисунок 3.16 – Зміна компонента тензора деформації при деформуванні тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний компонент e_r ; б – осьовий компонент e_z ; в – окружний компонент e_φ

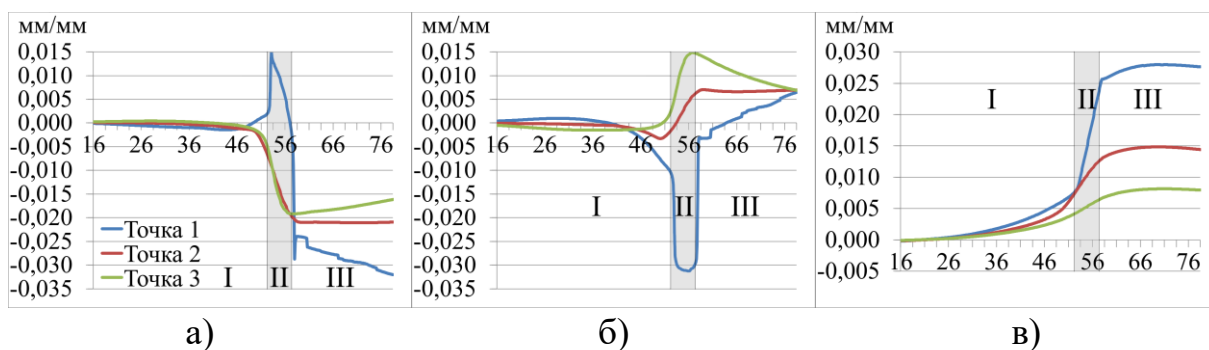


Рисунок 3.17 – Зміна компонента тензора деформації при деформуванні товстостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$, кутом $\alpha = 4^\circ$: а – радіальний компонент e_r ; б – осьовий компонент e_z ; в – окружний компонент e_φ

Дані, наведені на рисунку 3.17 також підтверджують наявність зон локального пластичного деформування наявністю різких пікових змін на кінці контактної зони «II», які добре помітні на графіках радіальної та осьової складової. Якщо для тонкостінної деталі (рис. 3.16) дані зміни не значні, то для товстостінної (рис. 3.17) вони суттєві.

З рисунка 3.16 добре видно, що при моделюванні деформування тонкостінної деталі у позаконтактній зоні «III» всі компоненти поступово сходяться майже в одну лінію, що підтверджує рівномірне деформування

заготовки по всій товщині стінки. Інша ситуацій у товстостінної заготовки (рис. 3.17). Там радіальна та окружна складові розходяться на значну величину. Слід також відмітити, що осьова складова деформації при обробці тонкостінної деталі у позаконтактній зоні «ІІІ» приймає від'ємне значення – $e_z < 0$, а товстостінної додатне – $e_z > 0$. Це говорить про те, що тонкостінна деталь після обробки вкорочується, а товстостінна – подовжується.

Зазначений факт можна використовувати для технологічного управління формоутворенням заготовки при деформуючому протягуванні. Тобто в конкретному випадку необхідним поєднанням режимних параметрів, геометрії інструмента та товстостінності заготовки можна забезпечити необхідні осьові розміри обробленого виробу від укорочення до подовження. Для визначення технологічних факторів, що впливають на процес пластичної формозміни розглянемо результати наведені в таблицях 3.1, 3.2, 3.3.

Таблиця 3.1 – Залежність значень компонентів тензора деформації від товстостінності заготовки

№ п/п	t_0/d_0	Кут α , град.	a/d_0	Точки	e_r	e_z	e_φ	$e_z \text{ exp}$
1	0,05	4	0,025	1	-0,0148	-0,0136	+0,0296	-0,0133
				2	-0,0142	-0,0130	+0,0277	
				3	-0,0143	-0,0134	+0,0259	
2	0,2	4	0,025	1	-0,0272	+0,0013	+0,0272	+0,0016
				2	-0,0211	+0,0023	+0,0191	
				3	-0,0167	+0,0012	+0,0139	
3	0,35	4	0,025	1	-0,0336	+0,0086	+0,0265	+0,0074
				2	-0,0207	+0,0073	+0,0135	
				3	-0,0152	+0,0063	+0,0073	

Як видно з таблиці 3.1, збільшення товщини стінки призводить до зміни деформованого стану. При обробці тонкостінних заготовок мають місце два стискуючі компоненти тензора деформації та один розтягуючий, а при обробці товстостінних – один стискуючий і два розтягуючі. Більш того, якщо при обробці тонкостінних заготовок має місце укорочення заготовки ($e_z < 0$), то зі збільшенням товстостінності з'являється відсутність зміни осьової деформації, тобто нульова осьова деформація, яка в подальшому з ростом товстостінності переходить в подовження ($e_z > 0$). Слід відзначити, що дані моделювання підтверджують теоретичні дані роботи [9] по визначенню деформованого стану в позаконтактних зонах осередку деформації, що зафіксували також зміну деформованого стану при переході з ділянки контакту в позаконтактну зону.

Таблиця 3.2 – Залежність значень компонентів тензора деформації від кута нахилу твірної робочого конуса

№ п/п	t_0/d_0	Кут α , град.	a/d_0	Точки	e_r	e_z	e_φ	$e_z \text{ exp}$
1	0,2	2	0,025	1	-0,0197	-0,0047	+0,0254	-0,0045
				2	-0,0142	-0,0042	+0,0187	
				3	-0,0112	-0,0047	+0,0144	
2	0,2	4	0,025	1	-0,0272	+0,0013	+0,0272	+0,0016
				2	-0,0211	+0,0023	+0,0191	
				3	-0,0167	+0,0012	+0,0139	
3	0,2	8	0,025	1	-0,0368	+0,0094	+0,0287	+0,0054
				2	-0,0240	+0,0041	+0,0199	
				3	-0,0187	+0,0027	+0,0143	

При порівнянні обробки заготовки з однаковою товстостінністю та натягом але різними кутами нахилу твірної робочого конуса, можемо

бачити, що зменшення кута до 2° призводить до незначного укорочення заготовки, яке характеризується двома компонентами стиску e_r та e_z і одним компонентом розтягу e_φ (табл. 3.2). При збільшенні кута α до 8° подовження деталі стає більш суттєвим, компонент деформації e_z стає розтягуючи.

Таблиця 3.3 – Залежність значень компонентів тензора деформації від натягу

№ п/п	t_0/d_0	Кут α , град.	a/d_0	Точки	e_r	e_z	e_φ	$e_z \text{ exp}$
1	0,2	4	0,0125	1	-0,0146	+0,0021	+0,0129	+0,0011
				2	-0,0098	+0,0008	+0,0091	
				3	-0,0084	+0,0004	+0,0066	
2	0,2	4	0,025	1	-0,0272	+0,0013	+0,0272	+0,0016
				2	-0,0211	+0,0023	+0,0191	
				3	-0,0167	+0,0012	+0,0139	
3	0,2	4	0,0375	1	-0,0338	-0,0077	+0,0428	-0,0052
				2	-0,0266	-0,0041	+0,0313	
				3	-0,0218	-0,0037	+0,0238	

Дані таблиці 3.3 також свідчать, що деформований стан залежить від натягу на елемент. Так, застосування натягу $a/d_0 = 0,0125$ приводить до появи двох компонентів розтягу e_z та e_φ і одного компонента стиску e_r . Наявність таких компонентів забезпечує осьову деформацію подовження. Зі збільшенням натягу на елемент подовження зменшується і спостерігається нульова зміна довжини, і з подальшим збільшенням до $a/d_0 = 0,0375$ можна спостерігати появи укорочення деталі, що характеризується двома компонентами стиску e_r та e_z і одним компонентом розтягу e_φ .

Особливо важливий факт зміни довжини заготовки після ДПР при розробці технології відновлення зношених деталей. Більш детально це буде розглянуто в наступних розділах.

Ознайомитись з результатами моделювання заготовок товстостінністю t_0/d_0 : 0,05; 0,15; 0,2; 0,25; 0,35; 0,45 можна у додатку Г до даної роботи.

Проведені дослідження показали, що НДС у заготовках з кінцевою товщиною стінки має складний характер. У зоні контакту матеріал перебуває у напруженому стані, близькому до об'ємного стиску, тоді як на зовнішній поверхні заготовки формується НДС, що відповідає двовісному розтягу. У результаті місцем можливого руйнування може стати як внутрішня поверхня, де зосереджені значні пластичні деформації [3, 8], так і зовнішня поверхня, де діє жорсткий, по відношенню до вичерпання ресурсу пластичності матеріалу, напружений стан близький до двовісного розтягу.

Таким чином, формоутворення заготовок супроводжується значною наскрізною пластичною деформацією, що призводить до інтенсивного деформування внутрішньої поверхні та виникнення напруженого стану, який відповідає двовісному розтягу на зовнішній поверхні. Тому при обробці заготовок із кінцевою товщиною стінки необхідно визначати гранично допустимі деформації, обмежені пластичними властивостями матеріалу та умовами НДС.

Отримані результати аналізу НДС дають підстави для подальшої оцінки пластичності матеріалу з метою запобігання руйнуванню як у процесі деформуючого протягування, так і в подальшій експлуатації виробів.

3.3. Пластичність матеріалу заготовок, оброблених деформуючим протягуванням та вплив на неї технологічних факторів процесу

3.3.1. Історія деформування матеріалу на внутрішній та зовнішній поверхні заготовки при ДПР

Розглянемо використаний ресурс пластичності на зовнішній та внутрішній поверхнях заготовки. Для цього розглянемо деякі аспекти НДС, отриманих при симулюванні процесу деформування тонкостінних та товстостінних заготовок.

Результати моделювання (рис. 3.10-3.14) показують, що при деформуванні заготовок у контактній зоні матеріал перебуває у стані інтенсивного об'ємного стиску, тоді як на зовнішній поверхні формується напружений стан, близький до двовісного розтягу. У позаконтактних зонах, біля сполучення з контактною, виникають локальні області пластичної деформації, розміри й інтенсивність яких зростають зі збільшенням товстостінності заготовки. Після виходу з цієї ділянки осьова і окружна складові тензора напружень зменшуються (рис. 3.11, 3.12), причому осьова складова на зовнішній поверхні змінює свій знак на від'ємний, а окружна зменшується до нуля.

Також слід відзначити, що зміна інтенсивності швидкості деформації (рис. 3.7) показує, що витікання матеріалу з ділянки контакту в другу позаконтактну зону більш інтенсивніше, ніж витікання в першу позаконтактну зону.

Аналіз зміни значення інтенсивності деформації на зовнішній поверхні в осередку деформування (рис. 3.10) показує, що приріст деформації в контактній зоні набагато більший ніж у позаконтактних зонах ($2e_{n,z} \ll e_k$). Тобто в основному накопичена деформація визначається деформацією на зовнішній поверхні, що відповідає зоні контакту. Слід

вказати, що 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 рис. 3.18 наведено залежність історії деформування на зовнішній поверхні для заготовок із різною товстостінністю.

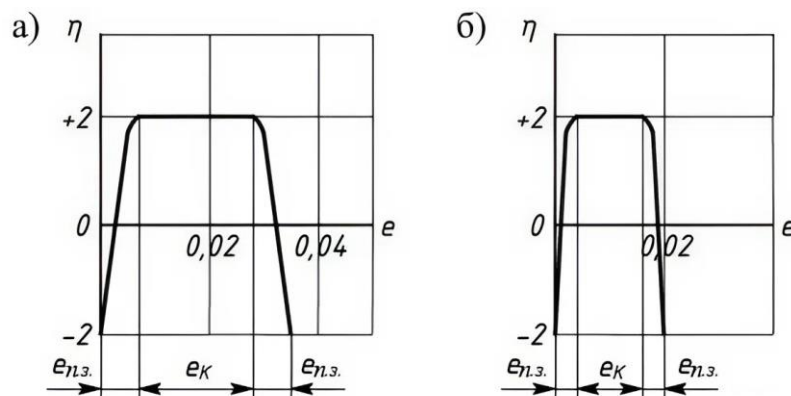


Рисунок 3.18 – Історія деформування зовнішньої поверхні $\eta(e)$ заготовок зі сталі 12ХН3А з натягом $a/d_0 = 0,025$, кут $\alpha = 4^\circ$ з товстостінністю t_0/d_0 :
а – 0,05; б – 0,35

Як впливає з рисунку 3.18 історія деформування практично однакова для тонкостінних і товстостінних заготовок. Спочатку параметр η у позаконтактній зоні набуває значення -2 , а потім практично стрибкоподібно змінюється до значення $+2$ на зовнішній поверхні, що відповідає зоні контакту. Протягом усього процесу він незначно змінюється і в кінці контактної зони також стрибком змінюється до негативного значення $\eta = -2$ в позаконтактній зоні.

Найчастіше ДПР здійснюється групою деформуючих елементів. У цьому разі деформований стан стає циклічним, тобто після виконання деформації одним елементом починає деформувати наступний елемент. Побудуємо модель використаного ресурсу пластичності на зовнішній поверхні заготовки при обробці групою елементів, враховуючи рекомендації, наведені в роботі [108]. Припустимо, що деформування відбувається з однаковим натягом на кожен елемент. Тоді, виходячи з

результатів моделювання, представимо залежність $\eta(\bar{e})$, яка характеризує історію деформування на зовнішній поверхні заготовки при деформуванні її групою елементів, у вигляді, показаному на рис. 3.19.

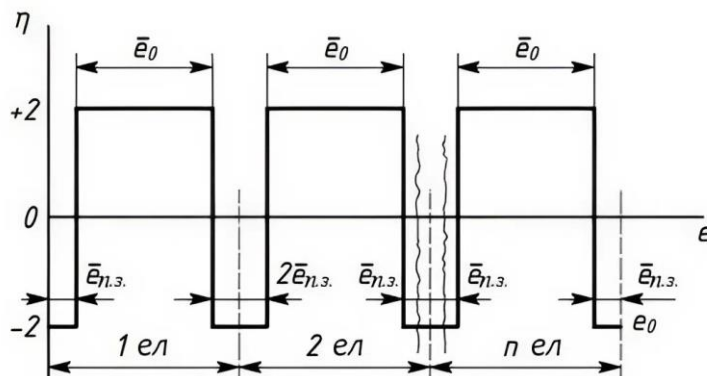


Рисунок 3.19 – Історія деформування зовнішньої поверхні $\eta(\bar{e})$ заготовок зі сталі 12ХН3А з натягом $a/d_0 = 0,025$, кут $\alpha = 4^\circ$ при деформуванні кількома деформуючими елементами

Автори робіт [96, 108] рекомендують не враховувати пошкодження матеріалу на ділянці з $\eta < 0$, тобто на ділянках, що відповідають позаконтактним зонам, і обґрунтовують це тим, що використаний ресурс пластичності, який має місце на ділянці $\eta = -2$, є значно меншим, ніж при $\eta = +2$.

Однак, враховуючи можливості моделювання при визначенні деформації $\bar{e}_0$ на кожному циклі деформації, і використовуючи ці значення при визначенні сумарної деформації як геометричної суми деформації на кожному з елементів, а також діаграму пластичності для даного матеріалу, можна визначити сумарний використаний ресурс пластичності наступним чином. Пластичність на кожному з циклів визначаємо згідно з виразом (1.14). Потім, враховуючи історію деформування, сумарну пластичність після проходження n-ого елемента визначаємо згідно з рисунку 3.19 і залежністю:

$$\sum_{1}^n \psi = \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_n, \quad (3.5)$$

У цьому випадку враховується накопичення пошкоджень у позаконтактних зонах та більш того, враховується збільшення параметра $\Delta\psi$ у зонах локальної пластичної деформації.

Тому розглянемо в якості накопиченої деформації інтенсивність деформації, яка відповідає зоні контакту. Вона залежить від товстостінності заготовки і натягу на елемент, а при обробці групою елементів також від сумарного натягу всієї групи елементів, який визначають, виходячи із залежності (3.6):

$$\sum_{1}^n \bar{e}_0 = \bar{e}_{01} + \bar{e}_{02} + \dots + \bar{e}_{0n}, \quad (3.6)$$

На рисунку 3.20 наведено отриману на основі симуляції залежність накопиченої деформації від товстостінності заготовки для різних натягів. Слід зазначити, що дані симуляції, 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 .

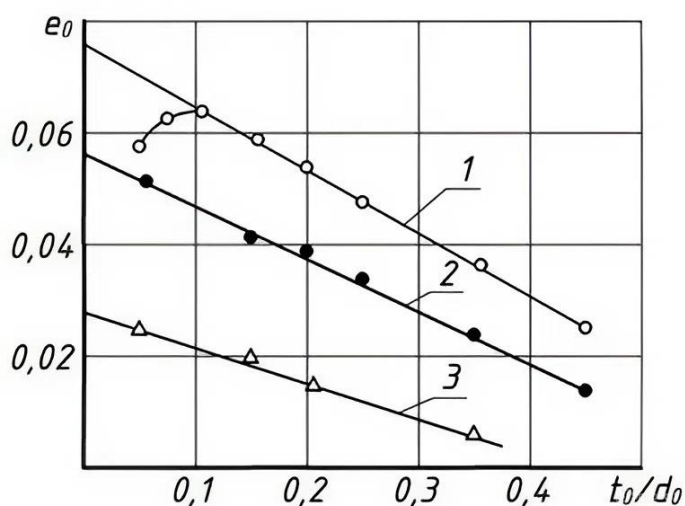


Рисунок 3.20 – Залежність інтенсивності деформації на зовнішній поверхні заготовки від товстостінності при обробці з кутом $\alpha = 4^\circ$ і натягом на елемент a/d_0 : 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125

Слід зазначити, що при симуляції процесу деформування тонкостінних заготовок з великими натягами мала місце нестійкість деформації [107], що позначилося на значеннях e_0 для тонких стінок на залежності 1 (рис. 3.20). Подібний факт був відмічений авторами [3, 10, 136] при експериментальному визначенні довжини контактної ділянки за допомогою методики з використанням алмазоносних плям [136], нанесених на внутрішню поверхню оброблюваної заготовки (рис. 3.21).

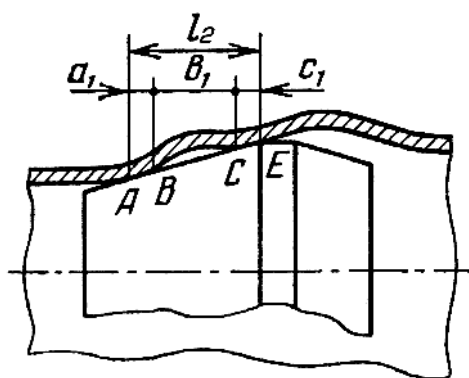


Рисунок 3.21 – Особливості осередку деформації при роздачі тонкостінних заготовок зі значними натягами [3]

Загальна протяжність контактної зони l_2 при деформуванні тонкостінних деталей зі значними натягами мала розрив, на якому був відсутній контакт інструменту з деталлю, при цьому контактна зона обмежувалася двома ділянками контакту довжиною a_1 і c_1 . Розрив контактної зони довжиною b_1 свідчив про нестійкість течії матеріалу для цього випадку.

Тому для перевірки цього факту розроблено методику, яка дає змогу визначити за рахунок симуляції процесу деформування, довжину контактної зони. На рисунку 3.22 наведено контактну ділянку, визначену за розробленою методикою при симуляції деформування тонкостінної заготовки з великим натягом на елемент. На рисунку чітко видно розрив протяжності контактної зони на досить значну величину. Це і вносить значні розбіжності в характер зміни залежності $e_0 = f(t_0/d_0)$.

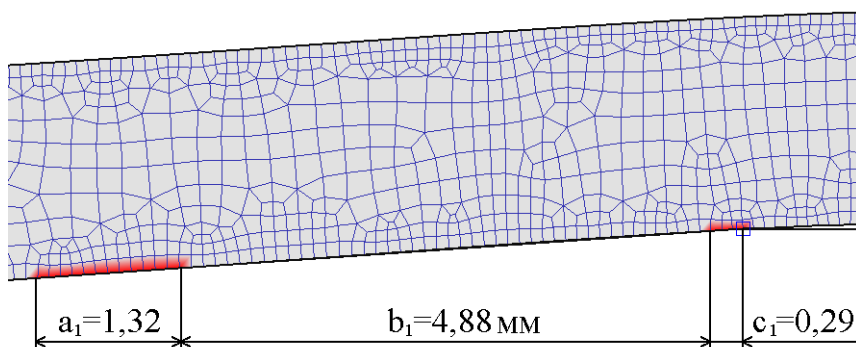


Рисунок 3.22 – Особливості контактної зони при деформуванні заготовки зі сталі 12ХН3А з товстостінністю $t_0/d_0 = 0,05$, натягом на елемент $a/d_0 = 0,0375$

Наявність експериментально отриманого факту [3, 136] підтверджує достовірність результатів моделювання.

Враховуючи вищенаведені обставини для врахування цього факту, залежність $e_0 = f(t_0/d_0)$ екстрапольовано на нульову товщину стінки. Це дало можливість отримати аналітичну залежність для визначення деформації на зовнішній поверхні заготовки:

$$e_0 = (0,007 + 1,9 a/d_0) - (0,034 + 2,03 a/d_0) t/d_0, \quad (3.7)$$

3.3.2. Уточнення діаграми пластичності матеріалу для сталі 12ХН3А

Для побудови діаграми пластичності сталі 12ХН3А необхідно визначити деформації до руйнування в широкому діапазоні показників напруженого стану – від двовісного розтягу до всебічного стиску. Традиційно такі дані отримують із випробувань на розтяг, стиск та кручення [79, 80]. Проте, 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 необхідно мати дані по деформуванню дослідженого матеріалу при показниках напруженого стану $\eta = +2$ та $\eta = -2$, після чого

провести апроксимацію кривої для можливості визначення проміжних точок.

У роботі [137] наведені точки діаграми пластичності для сталі 12ХН3А при показниках напруженого стану $\eta = +1$; 0 та -1 , при яких деформація до руйнування відповідно становить: 0,36; 0,45 та 0,85. Також автор розраховував за формулою (1.17) та підтвердив дослідженнями деформацію до руйнування при двовісному розтягу яка становить: $e_{пр. (+2)} = 0,23$.

Однак, за описаною у другому розділі цієї роботи методикою по визначенню показника напруженого стану шляхом моделювання можна уточнити дійсне значення η в момент появи руйнування. Для цього проведемо додаткову симуляцію двовісного розтягу круглого зразка із сталі 12ХН3А діаметром 100 мм та товщиною 5 мм у програмі Deform (рис. 3.23).

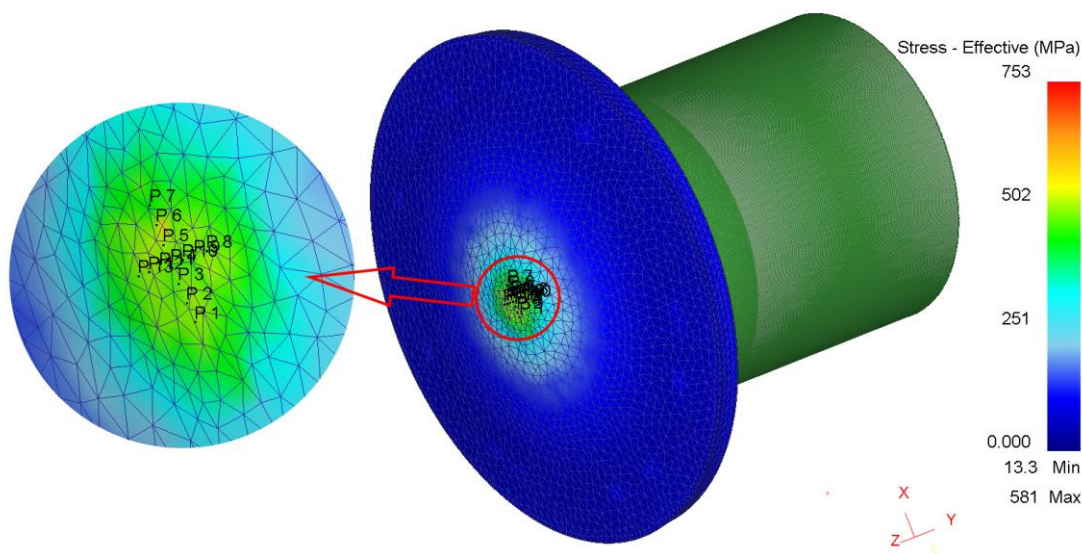


Рисунок 3.23 – Симуляція дослідження двовісного розтягу

Як зазначено у роботах [8, 137] руйнування завжди починається в безпосередній близькості біля вершини пуансона, що було підтверджено і моделюванням. На рисунку 3.24 представлено значення інтенсивності деформації у точках 2, 3, 4, 5, 6 (рис. 3.23). Точка 4 розміщена у центрі зразка, інші нанесені з кроком 1 мм по обидві сторони.

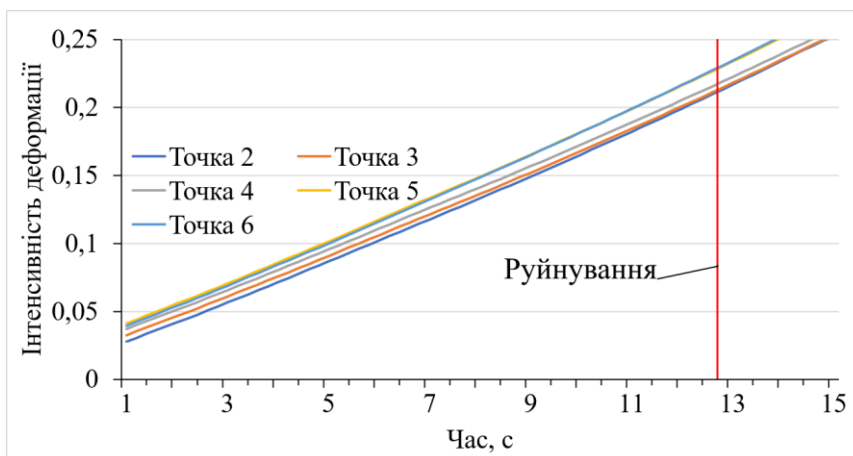


Рисунок 3.24 – Зміна інтенсивності деформації на поверхні зразка під час моделювання дослідження двовісного розтягу

З рисунка 3.24 видно, що найбільша інтенсивність спочатку спостерігається у точках 5 та 6, які відповідно знаходяться на відстані 1 та 2 мм від центру зразка. Для визначення показника напруженого стану в цих точках в момент руйнування (червона лінія) проведені розрахунки та побудовано графік (рис. 3.25).

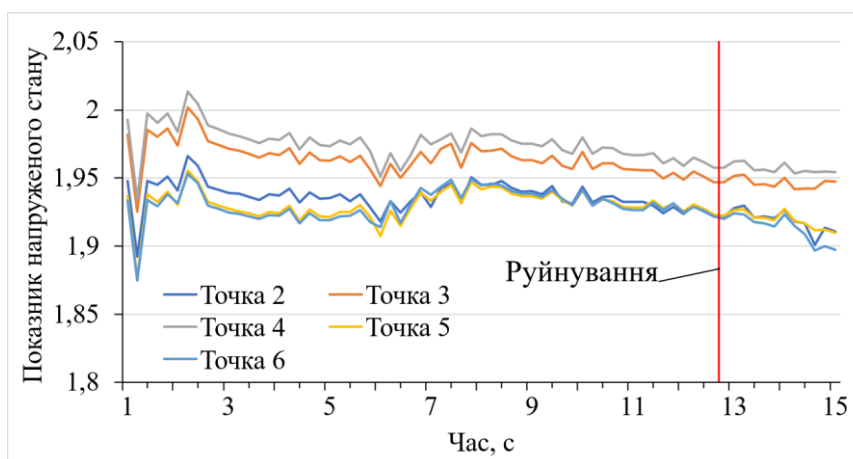


Рисунок 3.24 – Зміна показника напруженого стану на поверхні зразка під час моделювання дослідження двовісного розтягу

З графіка видно, що показник напруженого стану в момент руйнування становить +1,92, що є уточненим значенням, яке дещо менше ніж наведено у роботі [137] для сталі 12ХН3А.

Дослідження на двохосовий стиск у роботі [137] не були проведені, адже автора цікавили дослідження ресурсу пластичності матеріалу тільки на зовнішній поверхні, а наведені дані на діаграмі при показнику $\eta = -2$ є орієнтовними і потребують окремих досліджень.

Тому, за описаною методикою у другому розділі роботи було проведено осадку циліндричних пустотілих зразків зі сталі 12ХН3А із обмеженням окружної деформації. З метою підвищення точності отриманих даних експеримент проводився три рази. Розміри всіх зразків становили: зовнішній діаметр – 18 мм, діаметр отвору – 6 мм та висота – 36 мм. Результати випробувань наведені у таблиці 3.4.

Момент руйнування фіксувався за допомогою стрілки динамометра та появою короткочасного хрусткого звуку.

Таблиця 3.4 – Результати осадки циліндричних пустотілих зразків

№ зразка	Розміри зразків, мм			Розміри після руйнування, мм		Осьова деформація, e_z
	d_3	d_b	H	d_b	H	
1	18	6	36	2,2	31,6	0,122
2	18	6	36	2,38	31,72	0,119
3	18	6	36	2,32	31,68	0,12

Для більш глибокого вивчення процесу руйнування та визначення накопиченої деформації до руйнування та показника напруженого стану в момент руйнування проведемо симуляцію осадки зразка з аналогічними розмірами у програмі Deform. Для перегляду результатів моделювання по товщині стінки зразка створено сім точок з кроком 1 мм (рис. 3.25).

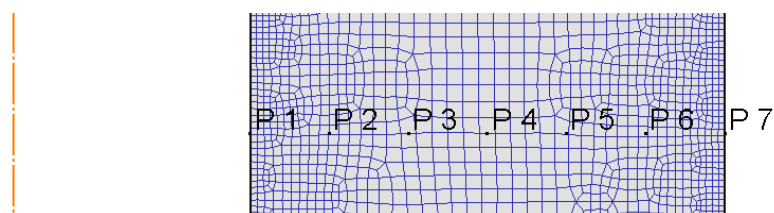


Рисунок 3.25 – Досліджувані точки

На рисунку 3.26 представлені результати розрахунків НДС осадки циліндричного пустотілого зразка зі сталі 12ХН3А із обмеженням окружної деформації. Червоною лінією показано зафіксований момент руйнування зразка при проведенні експериментів, який відбувається, коли середня осьова деформація стиснутого зразка сягає 0,12, тобто 12%.

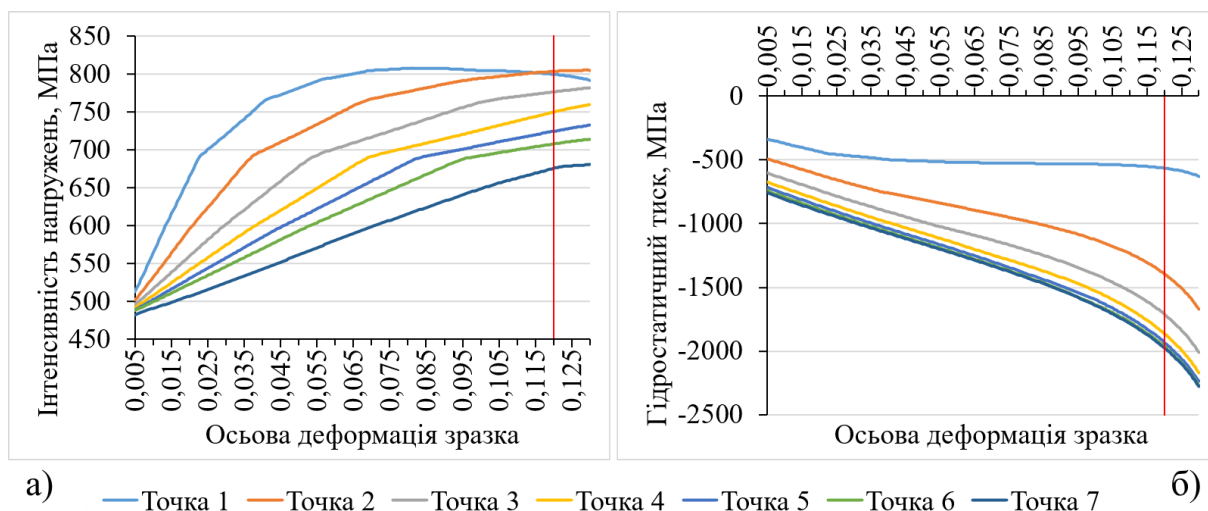


Рисунок 3.26 – Залежність інтенсивності напружень (а) та гідростатичного тиску (б) від середньої осьової деформації зразка зі сталі 12ХН3А під час моделювання його осадки із обмеженням окружної деформації

З рисунка видно істотну нерівномірність розподілу НДС за об'ємом осадженого зразка. Найбільш стрімко інтенсивність напруження (рис. 3.26, а) росте на поверхні отвору зразка (точка 1). Цікавим є те, що перед моментом руйнування (визначеного за допомогою лабораторного дослідження – позначено червоною лінією) передуює падіння інтенсивності напружень в точці 1 та зростання його у точці 2. Якщо припустити, що фіксація руйнування за допомогою лабораторних приладів може бути з запізненням, то саме цю зміну напружень на поверхні і приповерхневих шарах можна вважати моментом руйнування. Середня осьова деформація зразка у цей момент становить 0,115. Гідростатичний тиск (рис. 3.26, б) у точці 1 по мірі осадження зразка майже не змінюється і становить близько -500 МПа, і тільки після фіксації руйнування починає поступово

знижуватися. У інших точках гідростатичний тиск зменшується більш інтенсивно, і на зовнішній поверхні зразка, яка контактує з жорсткою матрицею, сягає в момент руйнування -2000 МПа.

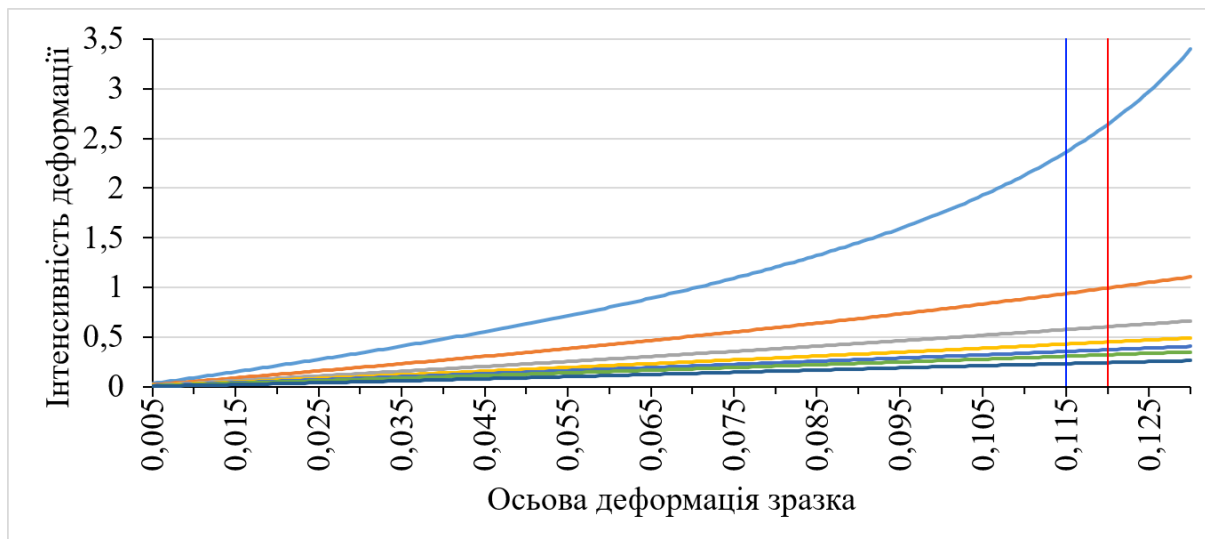


Рисунок 3.27 – Залежність інтенсивності деформації від середньої осьової деформації зразка зі сталі 12ХН3А під час моделювання його осадки із обмеженням окружної деформації

На рисунку 3.27 видно, що максимальні значення інтенсивності деформації зосереджені на поверхні отвору зразка та в його приповерхневих шарах. У момент руйнування інтенсивність деформації за результатами експериментальних досліджень (червона лінія) досягає 2,64, тоді як за результатами моделювання (синя лінія) – 2,36. Компоненти тензора деформації є наступними: осьова і окружна деформація від’ємні, а радіальна – позитивна, що свідчить про деформування до центру отвору зразка.

Також розглянемо зміну показника напруженого стану (рис. 3.28) та визначимо його значення в момент руйнування. Видно, що показник напруженого стану на поверхні отвору близький до -2 , а саме для результатів експериментальних досліджень (червона лінія) становить $-2,12$, тоді як за результатами моделювання (синя лінія) $-2,06$. У контактної зовнішньої поверхні показник напруженого стану досягає великих від’ємних значень – до $\eta = -8,5$, що відповідає значному ступеню

об'ємного стиску, яке має місце при деформуючому протягуванні в зоні контакту інструменту з заготовкою.

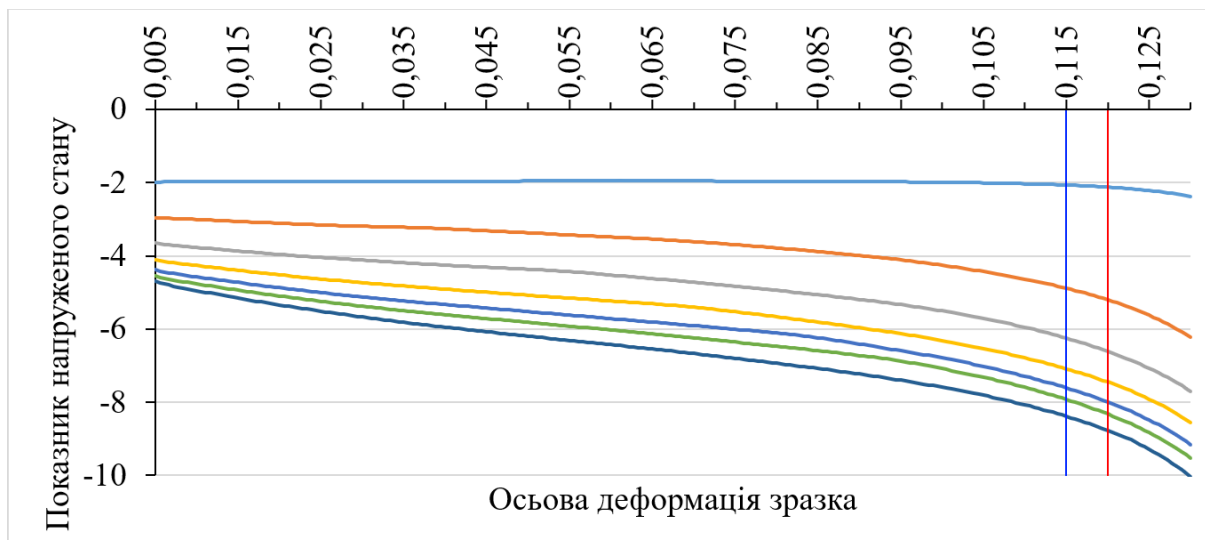


Рисунок 3.28 – Залежність показника напруженого стану від середньої осьової деформації зразка зі сталі 12ХН3А під час моделювання його осадки із обмеженням окружної деформації

Отже, для побудови діаграми пластичності при показнику напруженого стану, що відповідає двохвісному стиску, доцільно використати значення, отримані в результаті моделювання $e_{пр.(-2,06)} = 2,36$. Ці дані добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень, демонструючи відхилення лише близько 10% у бік зниження. Таке розходження можна пояснити інерційністю вимірювальних систем: датчики, які фіксують момент руйнування, реагують із певною затримкою, через що реальне значення деформації в момент руйнування може виявлятися дещо іншим, ніж зареєстроване експериментально. Це свідчить про достатню достовірність результатів моделювання та їх придатність для використання під час побудови діаграми пластичності матеріалу.

Отримані точки для побудови діаграми пластичності сталі 12ХН3А зведемо у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Опорні точки для побудови діаграми пластичності сталі

12ХН3А

η	+1,92	+1	0	-1	-2,06
e_0	0,23	0,36	0,45	0,85	2,36

Отримані дані дозволили уточнити діаграму пластичності сталі 12ХН3А, яка включає ділянку зі значними від’ємними значеннями коефіцієнта жорсткості напруженого стану η (рис. 3.29). В області від’ємних значень η вона являє собою ділянку параболи.

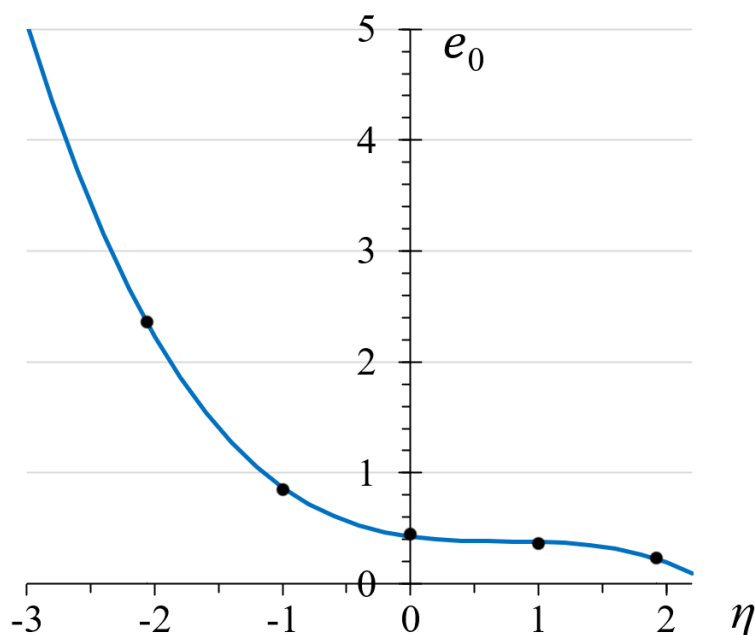


Рисунок 3.29 – Діаграма пластичності сталі 12ХН3А

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

$$e_0(\eta) = -0,0886 \cdot \eta^3 + 0,1970 \cdot \eta^2 - 0,1556 \cdot \eta + 0,4248, \quad (3.8)$$

3.3.3. Приріст використання ресурсу пластичності

На основі результатів моделювання НДС заготовки та уточненої діаграми пластичності для сталі 12ХН3А (рис. 3.29) за методикою описаною

у другому розділі роботи визначимо такий параметр як, приріст використання ресурсу пластичності ($\Delta\psi$) по довжині осередку деформації при обробці тонкостінної заготовки $t_0/d_0 = 0,05$, деформування якої відбувається за наявності контактних тисків $q < q_{кр.}$, так і товстостінної – $t_0/d_0 = 0,35$, деформування якої відбувається за наявності контактних тисків $q > q_{кр.}$. Для кращої наочності обрано кути $\alpha = 4^\circ$ для тонкостінної деталі та $\alpha = 8^\circ$ для товстостінної. Відносний натяг в обох випадках становить $a/d_0 = 0,025$.

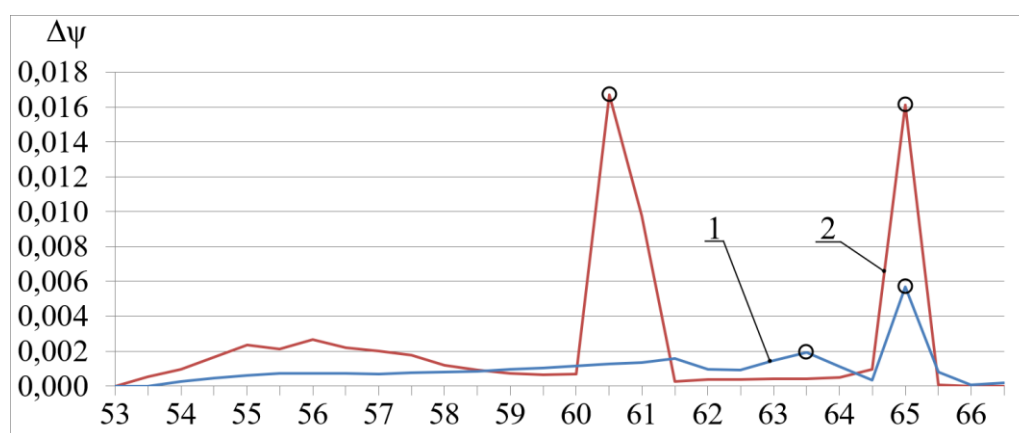


Рисунок 3.30 – Зміна параметра $\Delta\psi$ по довжині осередку деформації при симуляції деформування заготовки зі сталі 12ХН3А: 1 – кут $\alpha = 4^\circ$; $t_0/d_0 = 0,05$; 2 – кут $\alpha = 8^\circ$; $t_0/d_0 = 0,35$

З рисунка видно, 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.

Такі данні додатково підтверджують наявність зон локально локального пластичного деформування, які впливають на деформацію заготовки та вичерпання ресурсу її пластичності. При цьому ресурс пластичності буде обмежувальним фактором при виборі необхідної деформації отвору заготовки [107].

3.3.4. Вплив кількості деформуючих елементів, на використання ресурсу пластичності матеріалу

Розглянемо, як впливає кількість деформуючих елементів, які виконують необхідну сумарну деформацію отвору, на інтенсивність деформації на внутрішній і зовнішній поверхнях заготовки. На рисунку 3.31 наведено результати, отримані симулюванням деформування отвору з різними натягами на елемент, але з однаковою сумарною деформацією отвору, яка дорівнює 0,075. Детальніше можна ознайомитись у додатку Д.

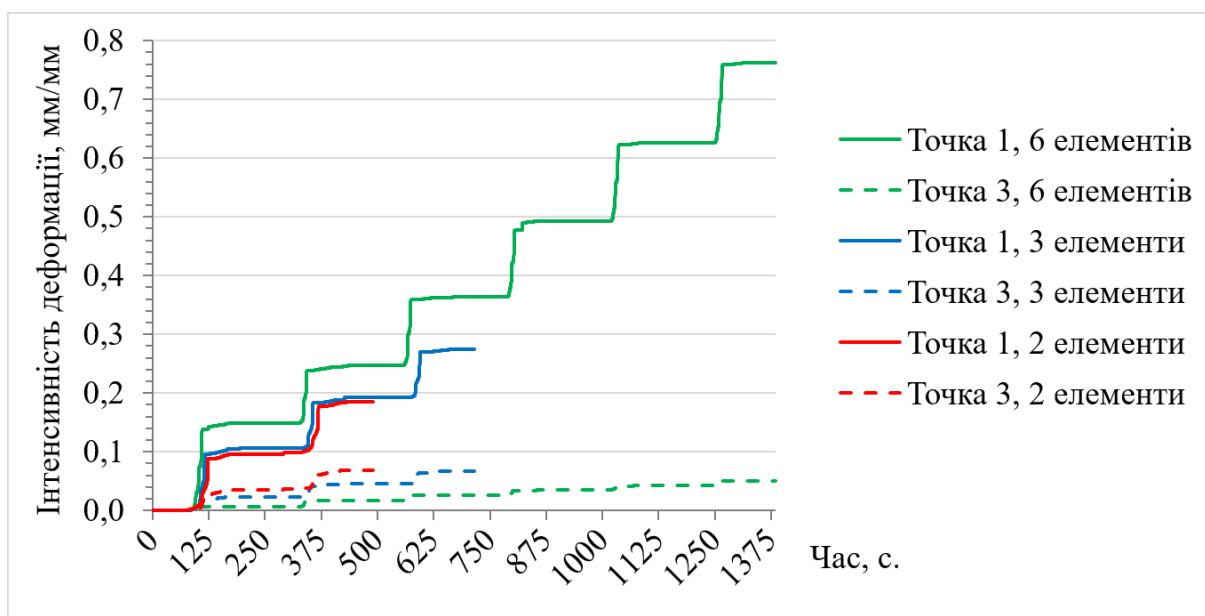


Рисунок 3.31 – Зміна накопиченої деформації на внутрішній і зовнішній поверхні заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ під час симулювання її деформування на величину сумарної деформації отвору $\sum a/d_0 = 0,075$: — 6 ДЕ з натягом 0,0125 на кожний; — 3 ДЕ з натягом 0,025 на кожний; — 2 ДЕ з натягом 0,0375 на кожний; суцільні лінії – деформація на внутрішній поверхні; пунктирні лінії – деформація на зовнішній поверхні

У всіх трьох випадках виконується однакова сумарна деформація $\sum a/d_0 = 0,075$ (рис. 3.31). Однак у першому випадку (зелені криві) вона виконується шістьма деформуючими елементами з натягом $a/d_0 = 0,0125$,

у другому випадку (сині криві) – трьома ДЕ з натягом $a/d_0 = 0,025$, і в третьому випадку (червоні криві) – двома ДЕ з натягом $a/d_0 = 0,0375$.

З рисунка 3.31 видно, що максимальна накопичена деформація на внутрішній поверхні (суцільні лінії) $e_0 = 0,76$ спостерігається при деформуванні шістьма деформуючими елементами. Менша деформація – $e_0 = 0,27$ спостерігається при деформуванні трьома елементами. І найменша деформація $e_0 = 0,18$ спостерігається при деформуванні двома елементами.

Водночас на зовнішній поверхні (пунктирні лінії) такого значного перепаду накопиченої деформації не спостерігається. Вона практично не змінюється, тобто не залежить від кількості деформуючих елементів і натягу на них, а визначається сумарною деформацією і становить $e_0 = 0,06; 0,07; 0,072$ відповідно. Подібний характер має зміна накопиченої деформації на внутрішній поверхні для товстостінності $t_0/d_0 = 0,2$ (рис. 3.32, крива 2). Тому зміна товщини стінки практично не впливає на характер зміни накопиченої деформації в залежності від використовуваного натягу на елемент.

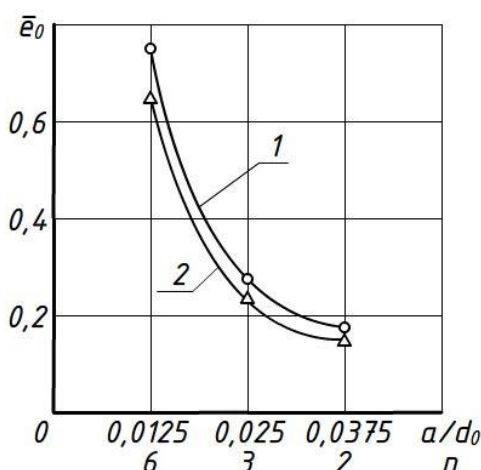


Рисунок 3.32 – Залежність накопиченої деформації на внутрішній поверхні заготовки зі сталі 12ХН3А при симуляції її деформування з сумарним натягом $\sum a/d_0 = 0,075$ робочими елементами з кутом $\alpha = 4^\circ$ від натягу на елемент і числа деформуючих елементів, що здійснюють сумарну деформацію, товстостінність заготовки t_0/d_0 : 1 – 0,35; 2 – 0,2

Що стосується різкої зміни значень деформації на внутрішній поверхні, то це можна використовувати під час проєктування інструменту з груповим розташуванням деформуючих елементів. Спочатку основна частина необхідної деформації отвору здійснюється малим числом деформуючих елементів з великими натягами, що дозволяє мінімізувати використання ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні заготовки, а потім для отримання її необхідного зміцнення і низької шорсткості – групою елементів з малими натягами і невеликою сумарною деформацією.

Розглянемо використаний ресурс пластичності матеріалу на зовнішній і внутрішній поверхні заготовки. Як показали результати моделювання НДС в осередку деформації, напружений стан на зовнішній поверхні відповідає двовісному розтягу (рис. 3.13, 3.14). Тому історія деформування, необхідна для оцінювання деформованості заготовки на основі скалярного опису пошкоджень, як зазначають автори [108], характеризується зміною показника напруженого стану η і величини максимальної накопиченої деформації на кожній із ділянок осередку деформації. Ці характеристики багато в чому залежать від технологічних факторів і ступеня товстостінності.

Розглянемо як впливає деформування групою елементів на використання ресурсу пластичності матеріалу. Як видно з результатів моделювання (рис. 3.33), сумарний використаний ресурс пластичності дорівнює використаному ресурсу пластичності при обробці кожним деформуючим елементом відповідно до залежності (3.5).

Накопичений використаний ресурс пластичності при обробці шістьма деформуючими елементами з мінімальними натягами набагато вищий, ніж при виконанні тієї ж сумарної деформації, але трьома елементами з більшими натягами і двома з ще більшими натягами (рис. 3.33).

Накопичений використаний ресурс пластичності на зовнішній поверхні найбільший при використанні максимальних натягів на елемент (рис. 3.33).

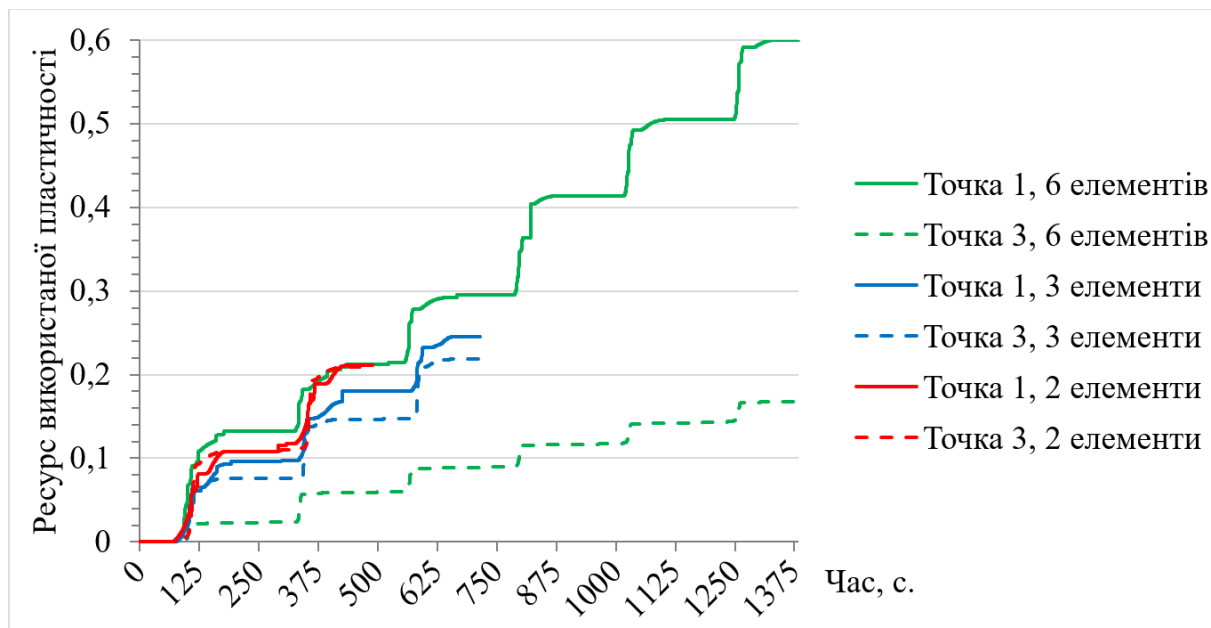


Рисунок 3.33 – Зміна використаного ресурсу пластичності матеріалу в осередку деформації на внутрішній і зовнішній поверхні заготовки з $t_0/d_0 = 0,35$ при симулюванні її деформування сумарною деформацією отвору $\sum a/d_0 = 0,075$:

- 6 деформуючих елементів з натягом 0,0125 на кожний;
- 3 деформуючих елементів з натягом 0,025 на кожний;
- 2 деформуючих елементів з натягом 0,0375 на кожний;
- суцільні лінії – деформація на внутрішній поверхні;
- пунктирні лінії – деформація на зовнішній поверхні

На рисунку 3.34 представлена залежність зміни параметра ψ від числа деформуючих елементів, які здійснюють однакову пластичну деформацію, але з різними натягами. Як зазначалося вище, максимальне вичерпання ресурсу пластичності матеріалу спостерігається при обробці 6-ма деформуючими елементами з мінімальним натягом на елемент. При цьому використаний ресурс пластичності мало залежить від товстостінності заготовки (рис. 3.34, крива 1).

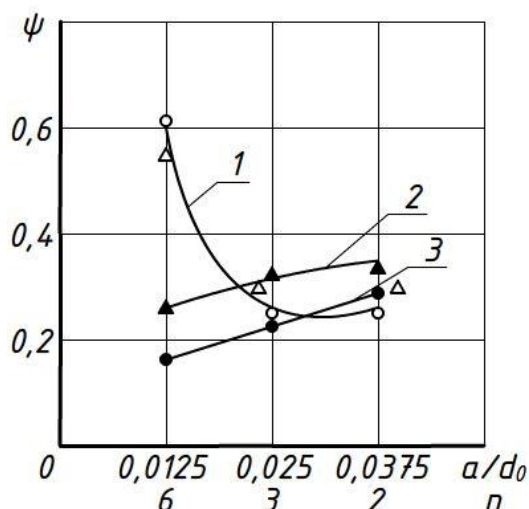


Рисунок 3.34 – Зміна використаного ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній і зовнішній поверхні заготовок з $t_0/d_0 = 0,35$ і $0,2$ при симулюванні їх деформування з сумарною деформацією отвору $\sum a/d_0 = 0,075$: 1 – зміна ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки при $t_0/d_0 = 0,35$ – $\circ$, $t_0/d_0 = 0,2$ – Δ ; 2 – зміна ресурсу пластичності на зовнішній поверхні при $t_0/d_0 = 0,2$; 3 – зміна ресурсу пластичності на зовнішній поверхні при $t_0/d_0 = 0,35$

На зовнішній поверхні, особливо товстостінних заготовок, використаний ресурс пластичності в залежності від кількості деформуючих елементів змінюється незначною мірою (рис. 3.34, криві 2 і 3). Як впливає з цього рисунка, його максимальне значення відповідає використанню великих натягів. Помітний вплив товстостінності на значення використаного ресурсу пластичності на зовнішній поверхні заготовки (рис. 3.34, криві 2 і 3). При цьому, чим менша товстостінність, тим більше значення використаного ресурсу пластичності.

Для розрахунку використаного ресурсу пластичності матеріалу на зовнішній поверхні слід використати залежність (3.9), яка отримана апроксимацією даних, наведених на рисунку 3.34:

$$\begin{aligned} \psi_{\text{зов.пов.}} = & 0,29822 + 9,96667 \cdot a/d_0 - 0,48444 \cdot t_0/d_0 - 249,6 \cdot (a/d_0)^2 \\ & - 0,9333 \cdot (t_0/d_0)^2 + 13,6 \cdot a/d_0 \cdot t_0/d_0, \end{aligned} \quad (3.9)$$

Наведені приклади по визначенню використаного ресурсу пластичності при обробці заготовки групою елементів з різними натягами дають змогу сформулювати умови розробки схеми деформування з послідовним використанням ресурсу пластичності спочатку на зовнішній, а потім на внутрішній поверхні заготовки. Наявність такої схеми дає змогу розробити рекомендації для проектування протяжки для чорнової обробки заготовок. Цей інструмент забезпечує послідовне використання ресурсу пластичності, деформуючи заготовку групою елементів з великими натягами, які здійснюють її основне формоутворення. При цьому використаний ресурс пластичності на зовнішній і внутрішній поверхні незначний. Далі здійснюють обробку групою елементів з малими натягами та невеликою сумарною деформацією. Така схема забезпечує мінімізацію 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.

3.3.5. Причини руйнування матеріалу на внутрішній поверхні обробленої заготовки

Результати моделювання свідчать про наявність в контактній зоні, де виконується основна частина деформації, умов, близьких до всебічного стиску, дозволяє при ДПР виконувати значні пластичні деформації без руйнування навіть для таких напівкрихких матеріалів як чавун [37]. Про це свідчать дані, приведені на рисунку 1.11. Але в той же час після 6-7 циклів деформації на обробленій поверхні з'являється мікролущення обробленого матеріалу. Як показали результати моделювання НДС, вказаний факт обумовлений наявністю зони локальної пластичної деформації за ділянкою контакту в якій змінюється напружений стан. Особливо значний вплив цієї

зони при обробці товстостінних деталей, яка проходить при наявності величини контактного тиску більшого або рівному критичному контактному тиску [3]. При цьому, як свідчать дані рисунку 3.12 (б), осьовий компонент тензора напружень на внутрішній поверхні заготовки змінює свій знак від від'ємного значення в зоні контакту до позитивного при виході із зони контакту, тобто в осередку деформації з'являються осьові розтягуючі напруження. Це спричинює різку втрату пластичності матеріалу і приводить до появи мікроруйнування обробленої поверхні. Варто відзначити, що деформація в зоні локальної пластичної деформації незначна і набагато менша ніж в зоні контакту, але її потрібно враховувати і не допускати локального вичерпання ресурсу пластичності.

З вищенаведеного випливає, що незважаючи на наявність в зоні контакту умов, близьких до всебічного стиску, після незначної степені деформації, тобто кількості протягнутих деформуючих елементів на обробленій внутрішній поверхні заготовки і на деформуючому елементі з'являються сліди руйнування поверхневого шару у вигляді частинок матеріалу (так зване мікролущення). Утворення зони локальної пластичної деформації, яка згідно наших даних моделювання, а також даних роботи [138], обумовлена витіканням матеріалу з контактної зони на циліндричну стрічку під дією критичного контактного тиску, вносить деякі особливості в деформуванні виробу, бо призводить до локальної появи вичерпання ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні заготовки. Тому контролювання використаного ресурсу пластичності стає важливим фактором при обробці заготовок ДПР. Значення необхідної сумарної деформації, як відзначається в роботах [1, 46, 141], вибирається із умов отримання необхідних технологічних параметрів обробленої поверхні, тобто мікрорельєфу, висотних параметрів шорсткості, зміцнення поверхневого шару. Але при деформуванні в умовах наявності критичного контактного тиску в осередку деформації обмежуючим фактором величини

деформації є використаний ресурс пластичності матеріалу, перевищення якого викликає руйнування заготовки.

Отримана в роботі залежність (рис. 3.32) дозволяє уточнити значення необхідної сумарної деформації та визначити кількість деформуючих елементів і натяг на них згідно залежності (3.10), отриманої шляхом апроксимації даних рисунку 3.32:

$$e_0 = 1282,5 \cdot (a/d_0)^2 - 85,536 \cdot a/d_0 + 1,604, \quad (3.10)$$

Крім того, значення накопиченої деформації перевіряється на використаний ресурс пластичності, що дозволить уникнути мікрорушення, тобто мікроруйнування поверхневого шару.

Також, виникає ще одна проблема, яку необхідно враховувати. Якщо після операції ДПР виконується термічна або хіміко-термічна обробка, необхідно, як наведено вище, обмежити значення використаного ресурсу пластичності згідно залежності (1.9). Для цього слід використати залежність (3.11), яка отримана апроксимацією даних, наведених на рисунку 3.34:

$$\psi_{\text{вн.пов.}} = 1080,8 \cdot (a/d_0)^2 - 69,059 \cdot a/d_0 + 1,299, \quad (3.11)$$

Ці дані отримані обробкою результатів симуляції деформування використаного ресурсу пластичності матеріалу поверхні заготовки, обробленої в умовах наявності критичного контактного тиску, дозволяють визначити необхідну кількість елементів і натяг на них для отримання необхідного використаного ресурсу пластичності. Слід відзначити, що ця залежність отримана для сумарної деформації $\sum a/d_0 = 0,075$. В разі необхідності отримати залежність для сумарної деформації $\sum a/d_0 = 0,0375$, тобто при деформуванні трьома деформуючими елементами з натягом $a/d_0 = 0,0125$ на кожний, значення ψ згідно рис. 3.34 необхідно скоригувати на значення $\psi = 0,305$.

3.3.6. Вплив геометрії деформуючого елемента на використання ресурс пластичності матеріалу оброблених поверхонь

Як було зазначено вище, розроблена методика моделювання дала змогу дослідити вплив геометрії інструменту на параметри, пов'язані з напружено-деформованим станом. Розглянемо вплив геометрії інструменту на накопичену деформацію на зовнішній поверхні. З результатів аналізу випливає, що вплив кута α на накопичену деформацію здебільшого відображається за рахунок впливу геометрії інструменту на накопичену деформацію в позаконтактних зонах. У контактній же зоні вплив кута α на накопичену деформацію практично відсутній. Це підтверджується також відсутністю впливу кута α на окружну деформацію (рис. 3.35). З огляду на той факт, що в позаконтактних зонах значення накопиченої деформації значно нижче, ніж у зоні контакту, можна зробити висновок про незначний вплив кута α на накопичену деформацію на зовнішній поверхні.

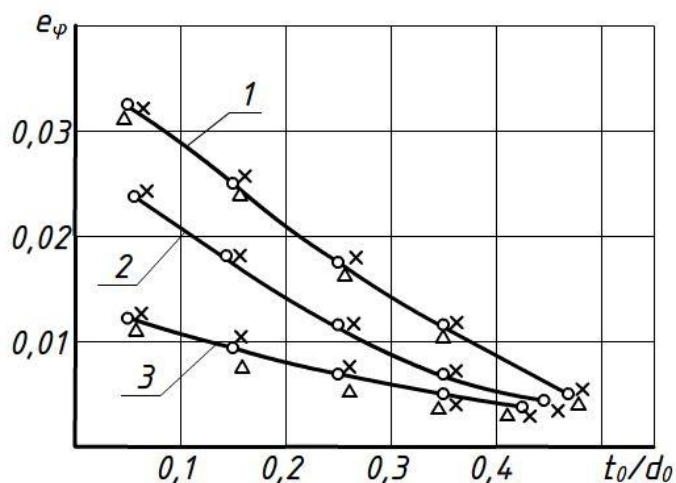


Рисунок 3.35 – Залежність окружної деформації e_φ зовнішньої поверхні від товстостінності заготовки t_0/d_0 при обробці з натягом на елемент a/d_0 :
 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125 з різними кутами α : $\circ$ – 4° ; $\times$ – 8° ; Δ – 2°

Дещо інший вплив має кут α на накопичену деформацію на внутрішній поверхні. На рисунку 3.36 показано залежність зміни параметра

e_0 в осередку деформації від кута α . Як видно, збільшення значення кута α від 2 до 8° змінює значення параметра e_0 приблизно в 4 рази. При цьому зміна протяжності позаконтактної зони перед ділянкою контакту і самої ділянки контакту набуває мінімального значення для кута $\alpha = 8^\circ$, а максимального – для кута $\alpha = 2^\circ$ (рис. 3.36). Тобто зі збільшенням кута α протяжність контактної ділянки та позаконтактної зони зменшується, що підтверджується результатами експериментів із вимірювання довжини ділянки контакту за допомогою алмазовмісних плям [136].

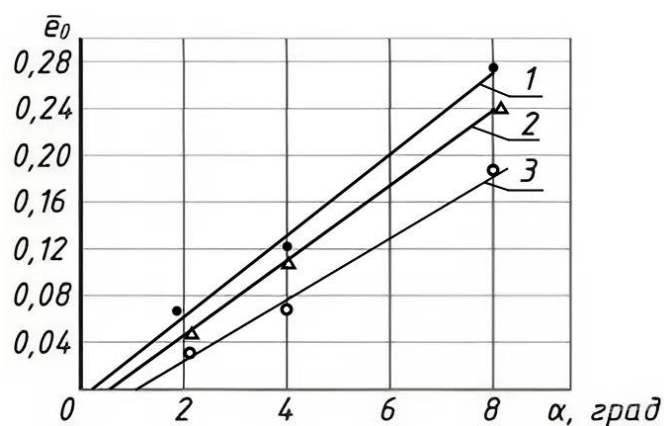


Рисунок 3.36 – Залежність накопиченої деформації на внутрішній поверхні обробленої заготовки від кута α при симулюванні обробки заготовок зі сталі 12ХН3А з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ з товстостінністю t_0/d_0 :
1 – 0,35; 2 – 0,2; 3 – 0,05

Статистична обробка даних, наведених на рисунку 3.36, дала змогу отримати залежність для визначення накопиченої деформації на внутрішній поверхні заготовки при використанні різних кутів.

$$\bar{e}_0 = (-0,033 + 0,066 t_0/d_0) + (0,024 + 0,04 t_0/d_0)\alpha, \quad (3.12)$$

З рисунку 3.36 випливає, що на значення накопиченої деформації впливає товстостінність заготовки. Дані моделювання, наведені на рисунку 3.37 свідчать про це.

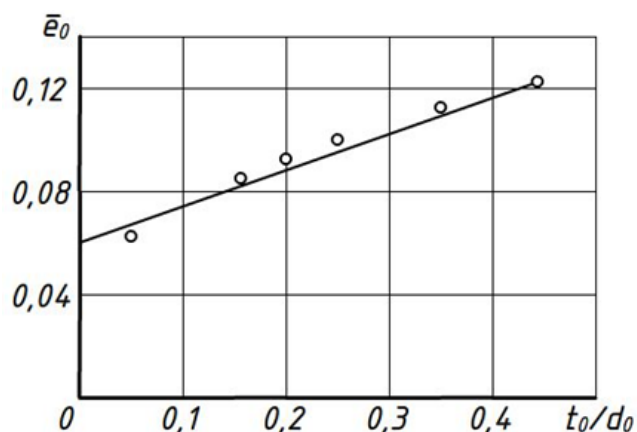


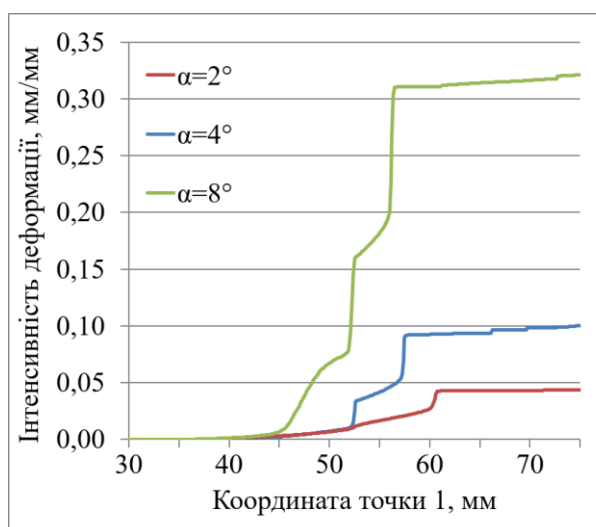
Рисунок 3.37 – Залежність накопиченої деформації на внутрішній поверхні обробленої заготовки від товстостінності при симулюванні обробки заготовок зі сталі 12ХН3А з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$

Залежність, наведена на рисунку 3.37, апроксимується виразом:

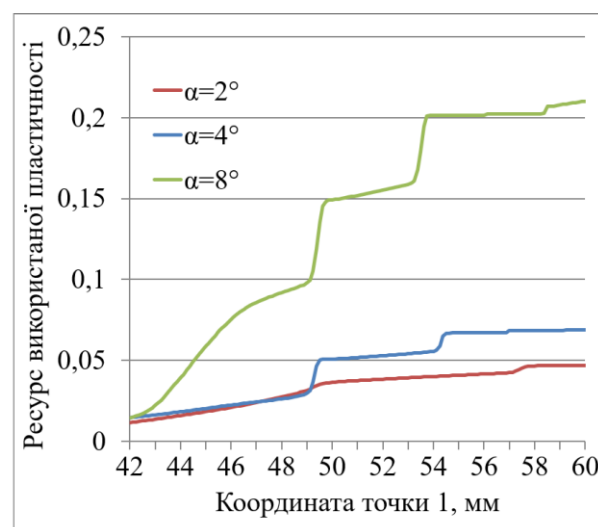
$$\bar{\epsilon}_0 = 0,06 + 0,14 t_0/d_0, \quad (3.13)$$

З рисунків 3.36-3.37 випливає, що чим вище товстостінність, тим більшим є значення накопиченої деформації на внутрішній поверхні, що, ймовірно, пояснюється зростанням гідростатичного тиску зі збільшенням товстостінності заготовки.

Розглянемо, як впливає зміна кута α на використання ресурс пластичності матеріалу. Порівняння даних, наведених на рисунку 3.38, на якому показано зміну накопиченої деформації на внутрішній поверхні від кута α і зміну пластичності від цього самого параметра, показало, що на ділянці, яка відповідає передній позаконтактній зоні, спостерігається плавне накопичення деформації, що приводить, у свою чергу, до відповідного зростання використаного ресурсу пластичності.



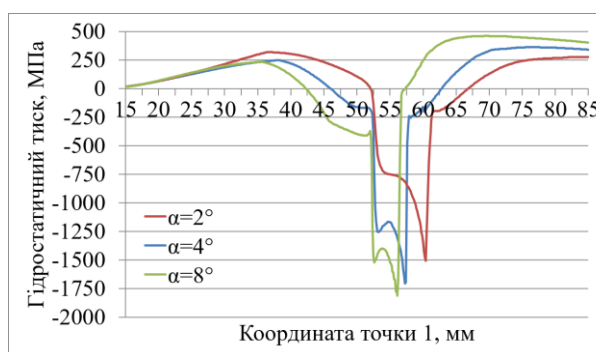
а)



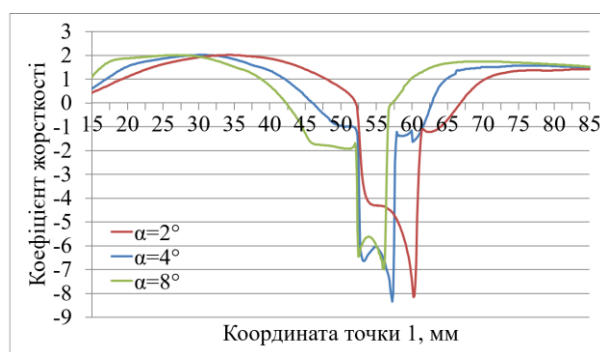
б)

Рисунок 3.38 – Зміна накопиченої деформації (а) та використаного ресурсу пластичності (б) на внутрішній поверхні осередку деформації від кута α при симулюванні деформації заготовок $t_0/d_0 = 0,35$ зі сталі 12ХН3А з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ і з кутами α : 2° , 4° , 8°

У той же час гідростатичний тиск у цих позаконтактних зонах (рис. 3.39, а) плавно збільшує своє від'ємне значення до $\sigma_0 = -500$ МПа, а показник напруженого стану η набуває значення $\eta = -2$ (рис. 3.39, б).



а)



б)

Рисунок 3.39 – Зміна гідростатичного тиску (а) та показника напруженого стану (б) в осередку деформування при симулюванні деформації заготовок $t_0/d_0 = 0,35$ зі сталі 12ХН3А з натягом на елемент $a/d_0 = 0,025$ і з кутами α : 2° , 4° , 8°

Як видно (рис. 3.39, а), на початку зони контакту, спостерігається різке зростання від'ємного значення гідростатичного тиску до значення $\sigma_0 \approx -1200$ МПа, а потім до значення -1600 МПа. Відповідно збільшується негативне значення коефіцієнта жорсткості напруженого стану η від -2 до -6 , а потім до -8 . Зазначений факт свідчить про те, що незалежно від кута α матеріал у контактній зоні переходить у стан сильного об'ємного стиснення. Далі в міру наближення до кінця контактної зони гідростатичний тиск (рис. 3.39, а) і коефіцієнт жорсткості напруженого стану η (рис. 3.39, б) різко зменшують свої від'ємні значення і навіть становляться позитивними.

Цей факт спостерігається на межі сполучення контактної ділянки та позаконтактної зони за нею. Він є небажаним, оскільки поява розтягуючих напружень призводить до різкого вичерпання ресурсу пластичності матеріалу, що в підсумку може викликати появу руйнування в поверхневому шарі деталі. Наявність компонента тензора розтягуючих напружень у місці переходу контактної ділянки в позаконтактну зону за нею, як відзначалося вище, утворює зону локального пластичного деформування, про що свідчать результати наших досліджень (рис. 3.1, 3.2, 3.10, 3.30).

Як показали наші дослідження, ступінь накопиченої деформації в осередку деформування збільшується зі зростанням кута α (рис. 3.38, а). Параметр ψ подібно до параметра e_0 також залежить від кута α (рис. 3.40) і мінімум його значення спостерігається при куті $\alpha = 2^\circ$. Більше того, ця залежність, як впливає з рисунку 3.40, свідчить, що використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні обробленої деталі пропорційний куту α і залежить від товстостінності заготовки.

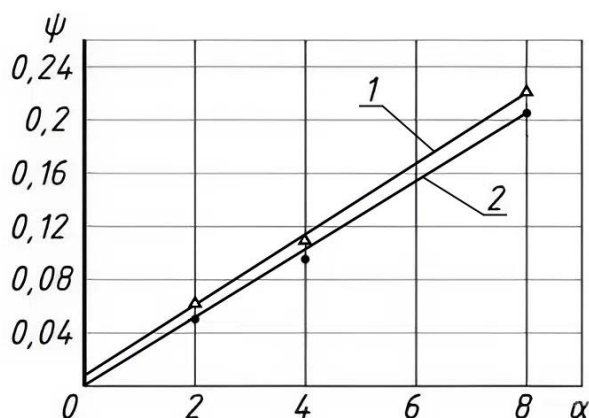


Рисунок 3.40 – Залежність використаного ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні від кута α при симулюванні процесу деформування заготовки з натягом $a/d_0 = 0,025$ при товстостінності заготовки t_0/d_0 : 1 – 0,35; 2 – 0,2

При цьому, чим вища товстостінність заготовки, тим більший використаний ресурс пластичності. Це зумовлено тим, що зі зростанням товщини стінки зростає деформація внутрішньої поверхні (рис. 3.36).

Таким чином, наведені результати дослідження свідчать про безсумнівний вплив кута α на інтенсивність накопичення пошкоджень. Причому, як впливає з рисунку 3.40, це накопичення пропорційне куту α . Крім того, наведені результати досліджень свідчать про необхідність оптимізації конструкції інструмента та схеми деформування, що дасть змогу зменшити вплив зони локальної пластичної деформації за ділянкою контакту, яка створює умови для інтенсивного вичерпання ресурсу пластичності та може спричиняти появу руйнування оброблюваного матеріалу на внутрішній поверхні. Враховуючи той факт, що зона локального пластичного деформування за ділянкою контакту утворюється за рахунок витікання оброблюваного матеріалу з неї на циліндричну стрічку, то один із методів зменшення використаного ресурсу пластичності є оптимізація форми циліндричної стрічки деформуючого елемента.

З позиції мінімізації використаного ресурсу пластичності матеріалу доцільно проводити ДПР деформуючими елементами з кутами $\alpha \leq 4^\circ$.

3.3.7. Вплив форми твірної деформуючого елементу на пластичність обробленої поверхні

Для визначення впливу форми твірної деформуючого елементу на використання ресурсу пластичності матеріалу на оброблених поверхнях заготовки проведено ряд досліджень з формами, які наведені на рис. 3.41.

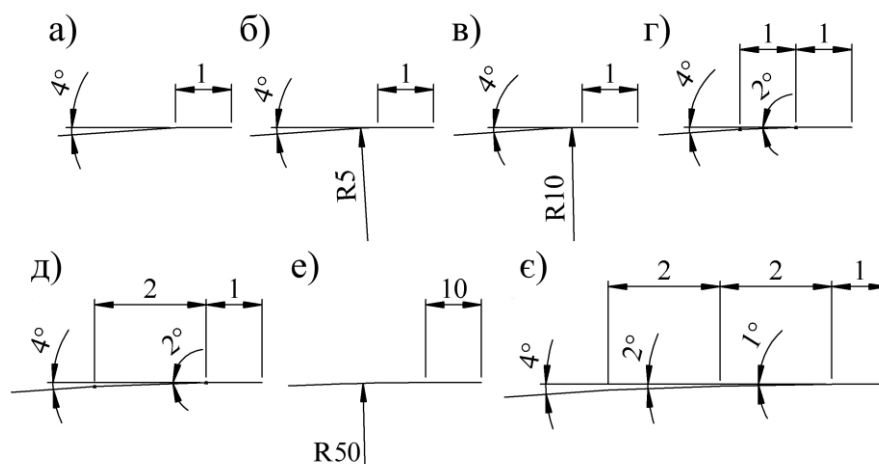


Рисунок 3.41 – Форми твірної деформуючого елемента

Обробка результатів моделювання та розрахунок згідно критерію Колмогорова дали змогу отримати значення використаного ресурсу пластичності матеріалу (рис. 3.42) на зовнішній і внутрішній поверхнях заготовки під час ДПР із використанням ДЕ різної форми твірної.

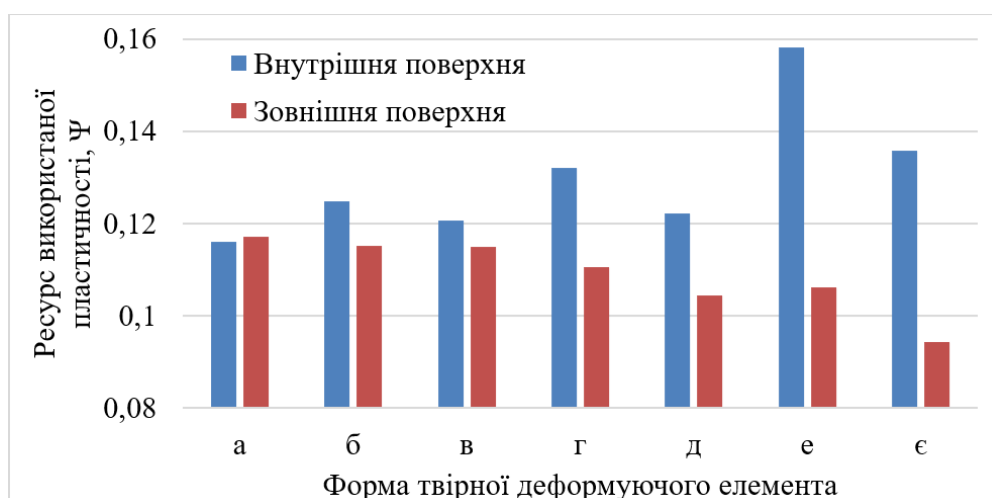


Рисунок 3.42 – Вплив форми твірної деформуючого елемента на використаний ресурс пластичності матеріалу

З рисунку 3.42 видно, що зміна форми твірної деформуючого елемента, відносно стандартної форми «а», суттєво впливає на вичерпання ресурсу пластичності як внутрішньої, так і зовнішньої поверхонь заготовки. У всіх випадках зміна форми призводить до збільшення використаного ресурсу пластичності на внутрішній поверхні, проте для форм «б», «в», «д» ця зміна незначна. Водночас форма «д» сприяє зниженню параметра ψ на зовнішній поверхні заготовки.

Таким чином, можна зробити висновок про доцільність подальших досліджень форми твірної деформуючого елемента на використання ресурсу пластичності матеріалу, що є особливо актуальним під час проєктування деформуючих протяжок із груповим розташуванням деформуючих елементів.

3.3.8. Шляхи управління використанням ресурсу пластичності матеріалу при ДПР

Аналіз результатів моделювання процесу деформування заготовок з різною товстостінністю зі сталі 12ХН3А робочими елементами з різною геометрією і режимами показує, що руйнування цих заготовок може відбутися як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях. При цьому тонкостінні заготовки, при деформуванні яких спостерігається наскрізна пластична деформація, здебільшого руйнуються на зовнішній поверхні, де має місце досить жорстке значення показника напруженого стану $\eta = +2$, тобто двовісний розтяг. Таке значення цього показника призводить до швидкого вичерпання ресурсу пластичності, а, отже, до руйнування заготовки. Як показують дані наведені на рисунку 3.30, зони локальної пластичної деформації, які є місцем різкого збільшення параметра $\Delta\psi$ (приріст ресурсу пластичності) при обробці тонкостінних заготовок є малопомітними. Тому внутрішня поверхня тонкостінних заготовок зазвичай

не є місцем появи руйнувань, а руйнування починається на зовнішній поверхні заготовки. Як показали наші дослідження, використаний ресурс пластичності на зовнішній поверхні тонкостінних заготовок залежить від натягу на елемент, причому менший використаний ресурс пластичності мають заготовки, оброблені з меншими натягами на елемент. Тому необхідну деформацію такої заготовки необхідно здійснювати більшим числом деформуючих елементів, але з меншими натягами на елемент.

Крім того на основі виконаних досліджень сформульована схема деформування з послідовним використанням ресурсу пластичності матеріалу спочатку на зовнішній, а потім на внутрішній поверхні заготовки. Наявність такої схеми дає змогу розробити рекомендації для проєктування протяжки при чорновій обробці заготовок зі значною товстінністю [142]. Як вказувалось вище, інструмент, спроектований згідно цієї схеми, забезпечує послідовне використання ресурсу пластичності, деформуючи заготовку групою елементів (рис. 3.43, поз. 2, 3) зі значними натягами $a/d_0 \geq 0,0375$, які здійснюють її основне формоутворення. При цьому використаний ресурс пластичності на зовнішній і внутрішній поверхні мінімізований. Далі обробку здійснюють групою елементів (рис. 3.43, поз. 4, 5) з малими натягами $a/d_0 \leq 0,0125$ та необхідною сумарною деформацією. Це 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.

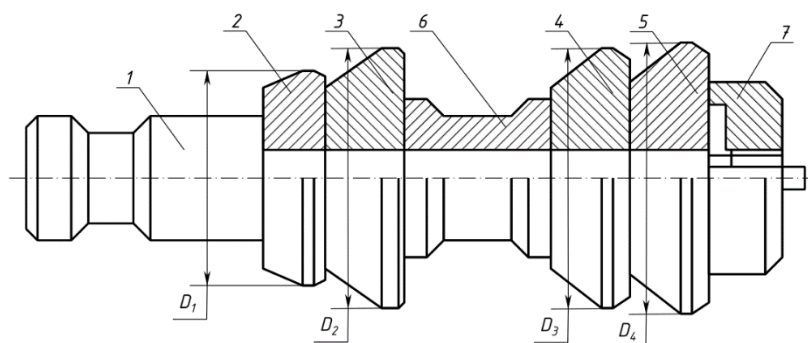


Рисунок 3.43 – Збірна деформуюча протяжка [142]

Кут α мало впливає на вичерпання ресурсу пластичності на зовнішній поверхні, тому особливих вимог для вибору значення кута α дотримуватися не варто. Хоча потрібно зазначити про перевагу використання при деформуванні, особливо внутрішньої поверхні, кута $\alpha \leq 4^\circ$.

На ресурс пластичності зовнішньої поверхні сприятливо впливає товстостінність заготовки, причому, чим більша товстостінність, тим менше вичерпання ресурсу пластичності. Тому в деяких випадках доцільно збільшувати товстостінність за рахунок обробки заготовки в жорсткому корпусі [1]. При такій обробці руйнування на зовнішній поверхні не спостерігається. Однак у цьому разі необхідно враховувати інтенсивне вичерпання ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки.

Аналіз результатів моделювання при визначенні параметрів, що впливають на використання ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні обробленої заготовки, показує, що при деформуванні товстостінних заготовок у місцях сполучення зон позаконтактної деформації з ділянкою контакту утворюються зони локального пластичного деформування (рис. 3.1, 3.2, 3.10, 3.30). Особливо помітні ці зони при деформуванні заготовок в умовах наявності критичного контактного тиску. Передня локальна зона збільшує протяжність ділянки контакту і зменшує розмір передньої позаконтактної зони. Задня утворюється при витіканні оброблюваного матеріалу з ділянки контакту на циліндричну стрічку ДЕ або в позаконтактну зону за ним і зменшує її висоту (рис. 3.4, б).

Наявність зони локальної пластичної деформації викликає появу осьових розтягуючих напружень, які призводять до різкого вичерпання ресурсу пластичності. При цьому, показник жорсткості напруженого стану стає рівним $\eta = +2$, а параметри $\Delta\psi$ і ψ різко збільшуються при наявності незначної деформації.

Зазначений факт, як вказано в пункті 3.3.5, може призвести до вичерпання ресурсу пластичності, особливо при наявності декількох циклів

деформування, і до появи руйнування матеріалу у вигляді лущення на внутрішній поверхні заготовки. Вказані зміни можуть проходити при практично повній відсутності зростання накопиченої деформації e_0 .

Тому важливою задачею є визначення можливості впливу на цю зону з метою зменшення росту пошкоджень. Для цього необхідно зменшити утворення зони локальної пластичної деформації в цьому місці.

Однією з таких можливостей є раціональне використання значень кутів α . Так із рисунку 3.40 випливає, що при використанні кутів $\alpha \leq 2^\circ$ різниця в значенні використаного ресурсу пластичності порівняно з використанням кута $\alpha = 8^\circ$ менша практично в 4 рази.

Раніше автори роботи [143] запропонували конструкцію деформуючого елемента, що може впливати на позаконтактну зону за ділянкою контакту. Ця конструкція використовувалась для усунення такого виду похибки як кривизна обробленої деталі. Авторами цієї роботи було встановлено, що ця зона є місцем нестійкості деформації і там під дією зовнішніх похибок, що спотворюють осесиметричність деформації, виникає такий вид похибки, як кривизна. Цю конструкцію, яка впливає на позаконтактну зону за ділянкою контакту, можна оптимізувати для впливу на зону локальної пластичної деформації і зменшити використаний ресурс пластичності матеріалу.

Також автори роботи [89] досліджували вплив форми робочої поверхні інструменту на неоднорідність деформації. З розглянутих варіантів форми найбільш ефективним є опукла форма робочої поверхні інструменту. Тому слід оцінити вплив такої форми, при заміні робочого конуса інструменту з прямої на радіусну або форми циліндричної стрічки на яку витікає метал з контактної зони, на позаконтактну зону за ділянкою контакту.

При використанні такого елемента, енерговитрати на процес практично не змінюються, а зона локального пластичного деформування

зменшується. Це дасть змогу зменшити вичерпання ресурсу пластичності, що особливо важливо при обробці заготовки значним числом циклів деформування, тобто при використанні великої кількості ДЕ.

3.4. Висновки за розділом 3

На основі методу скінчених елементів проведено аналіз напружено-деформованого стану в осередку деформації, який дав змогу вивчити механіку деформування при деформуючому протягуванні 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. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Вивчено НДС в осередку деформації при ДПР і встановлено, що НДС заготовки зі скінченною товщиною стінки має складний характер: у зоні контакту матеріал заготовки перебуває у напруженому стані, що відповідає інтенсивному об'ємному стиску, досягаючи показників $\eta = -8$, а на зовнішній поверхні – двовісному розтягу $\eta = +2$, тому найбільш небезпечним місцем з позиції появи руйнування заготовки є як її внутрішня поверхня, так і зовнішня;

2. Підтверджено, що при ДПР в умовах наявності на ділянці контакту критичного контактного тиску виникають суттєві зони локальної пластичної деформації в місцях з'єднання ділянки контакту з позаконтактними зонами. Для цього випадку уточнено відому схему осередку деформації при ДПР. 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 і зменшує висоту позаконтактної зони.

Представлені розрахункові та експериментальні дані, що підтверджують наявність цих зон. Їх наявність необхідно враховувати при розрахунку розмірів осередку деформації, використаного ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні та проектуванні інструменту. При наявності контактного тиску менше критичного геометричні розміри осередку деформації можна розраховувати за теоретичною моделлю осередку деформації, справедливої для тонкостінних заготовок, без врахування впливу локальних зон пластичного деформування;

3. Встановлено шляхи оптимізації формоутворення заготовки, що полягають у технологічному впливі режимів протягування і геометрії інструменту на діаметральні та осьові розміри обробленої заготовки, які дають змогу змінювати осьовий розмір від укорочення до подовження;

4. Виявлені умови виникнення руйнування поверхневого шару (мікролущення) 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 деформацію в позаконтактній зоні, приводить через деяке число циклів деформації до появи руйнування поверхневого шару отвору.

5. Підтверджені і розвинуті особливості деформування при обробці заготовки групою деформуючих елементів. При цьому накопичена деформація та використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні залежать від геометрії інструменту, товстостінності заготовки, сумарної деформації та від кількості елементів, що її виконують. На зовнішній

поверхні інтенсивність деформації і параметр пластичності залежать тільки від товстостінності заготовки, натягу на елемент і сумарного натягу. Показано, що на внутрішній поверхні накопичення ушкоджень має місце в зонах позаконтактної деформації та в задній локальній зоні пластичної деформації. Запропоновано залежності для визначення сумарної інтенсивності деформацій та сумарної пластичності при обробці заготовок групою елементів. У контактній зоні зі збільшенням інтенсивності деформації накопичення пошкоджень практично відсутнє, що також підтверджує наявність у контактній зоні умов, близьких до інтенсивного об'ємного стиснення.

6. Удосконалена відома схема деформування групою елементів за рахунок послідовного використання ресурсу пластичності матеріалу спочатку на зовнішній, а потім на внутрішній поверхні заготовки. На основі цієї схеми деформування з послідовним використанням ресурсу пластичності розроблені рекомендації для проєктування деформуючої протяжки з груповим розташуванням деформуючих елементів, яка використовується для чорнкової формоутворюючої обробки заготовок. Ці рекомендації полягають у тому, що основна частина деформації отвору здійснюється групою деформуючих елементів зі значними натягами на елемент $a/d_0 \geq 0,0375$. При цьому відбувається мінімізація використання ресурсу пластичності матеріалу на внутрішній поверхні заготовки. При здійсненні наступної обробки групою елементів 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 матеріалу 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.

РОЗДІЛ 4. КЕРУВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯМ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ ЗАГОТОВОК З КІНЦЕВОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ ІЗ ПЛАСТИЧНИХ МЕТАЛІВ

4.1. Деформації заготовки під час обробки деформуючим протягуванням та їх вплив на формоутворення

Для аналізу НДС матеріалу заготовки та вивчення зміни розмірів обробленої деталі розроблена скінченно-елементну (FEM) модель процесу ДПР. Моделювання НДС осесиметричної заготовки з пластичного матеріалу під час деформуючого протягування здійснювалося з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3DTMV 11.0 [82]. Методика моделювання описана в розділі 2.

Розглянемо результати моделювання. На рисунку 4.1 приведена зміна накопиченої деформації при симуляції процесу деформування тонкостінної і товстостінної заготовок.

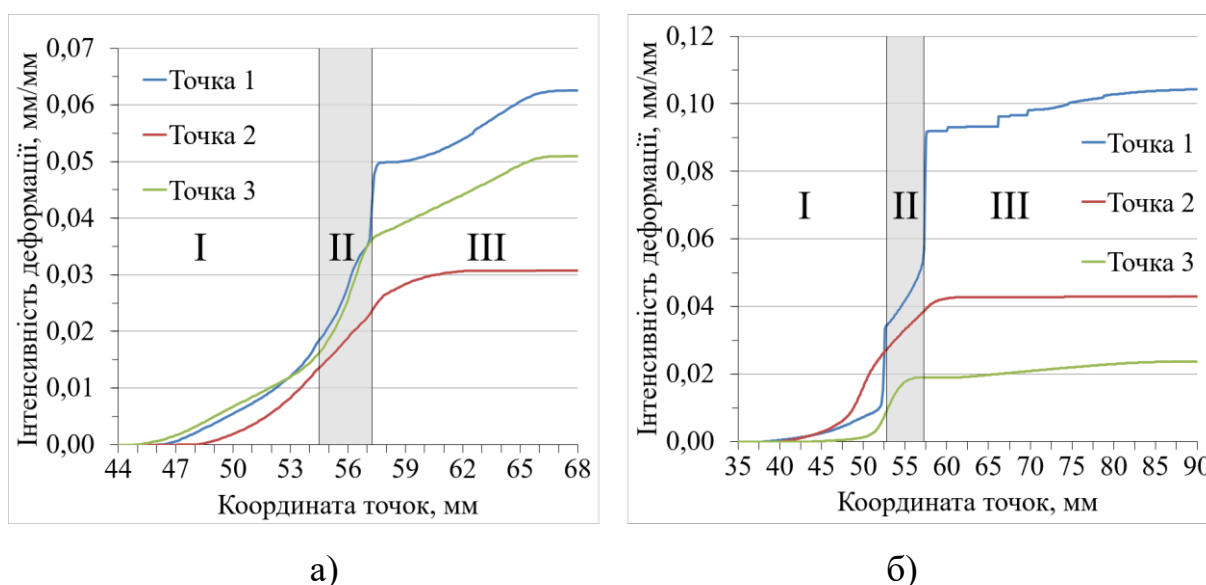


Рисунок 4.1 – Зміна параметра e_0 в осередку деформації при симулюванні процесу деформування заготовок із сталі 12ХН3А деформуючим елементом з натягом $a/d_0 = 0,025$ і товстостінності t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,35

Видно, що основна частина деформації відбувається в контактній зоні. В позаконтактних зонах має місце незначна частина деформації, причому вона приблизно рівна в кожній із них. Але незважаючи на незначну деформацію в позаконтактній зоні за ділянкою контакту, вона має дуже важливе значення для формоутворення заготовки. Характер зміни накопиченої деформації для тонкостінних і товстостінних заготовок схожі між собою, але мають деякі відмінності. В обох випадках значення максимальної накопиченої деформації відповідає внутрішній поверхні заготовки. Зі збільшенням радіусу заготовки вона зменшується. Але у тонкостінних заготовках є свої особливості. На зовнішній поверхні (точка 3) накопичена деформація більша, ніж на серединній поверхні (точка 2). У більш товстостінних заготовок такого факту не спостерігається. Там деформація зі збільшенням товстостінності поступово зменшується і її мінімальне значення відповідає зовнішній поверхні (точка 3). Як відзначалося вище у тонкостінній заготовці деформація по товщині стінки практично наскрізна і однорідна. Тому, як вказувалось вище в розділі 3, на зовнішній поверхні таких заготовок показник напруженого стану (рис. 3.13-3.14) рівний $\eta = +2$, що свідчить про наявність на зовнішній поверхні напруженого стану, близького до двухосного розтягування. Це приводить до збільшення накопиченої деформації на зовнішній поверхні в порівнянні зі серединною поверхнею. Гідростатичний тиск (рис. 3.13, а) для тонкостінних заготовок змінюється від -1000 МПа в зоні контакту до значення 400 МПа, а для товстостінних від -1600 МПа також до 400 МПа. Причому в обох випадках має місце перехід від значного від'ємного значення гідростатичного тиску до позитивного значення в позаконтактній зоні за ділянкою контакту. Така особливість, що має місце в осередку деформації, приводить до появи осьових розтягуючих напружень, що, як вказувалось вище, може викликати руйнування поверхневого шару, тобто лущення.

4.2. Деформації на зовнішній поверхні оброблених заготовок та забезпечення її розміру

Розглянемо зміну окружного компоненту тензора деформації, який визначає збільшення зовнішнього діаметру заготовки. На рисунку 4.2 наведені результати симуляції деформації тонкостінних і товстостінних заготовок.

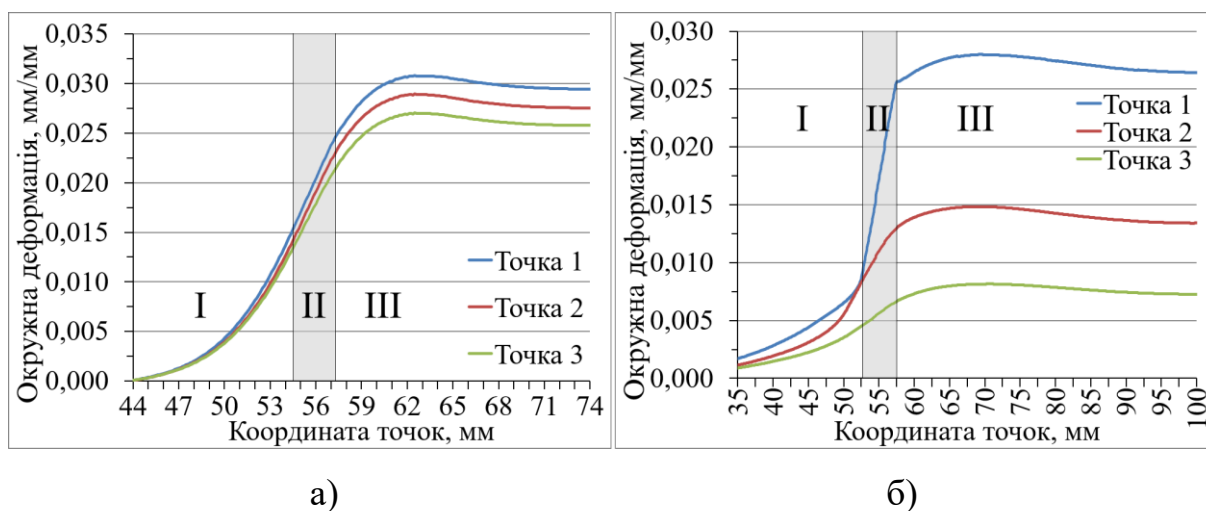


Рисунок 4.2 – Зміна значення окружного компоненту тензора деформації e_φ в осередку деформації при симулюванні процесу деформування заготовок із сталі 12ХН3А деформуючим елементом з натягом $a/d_0 = 0,025$ і товстостінності t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,35

Характер зміни цього параметру не залежить від товстостінності заготовки, хоча різниця між значенням e_φ для точок 1, 2, 3 незначна для тонкостінних заготовок, що свідчить про наскрізну однорідну деформацію в цьому випадку (рис. 4.2, а). Для товстостінних ця різниця значна. Максимальне значення відповідає внутрішній поверхні заготовки, мінімальне – зовнішній (рис. 4.2, б). Максимальне значення окружної деформації має місце в зоні контакту. В позаконтактних зонах значення e_φ незначне.

Вплив технологічних факторів і геометрії інструменту на окружну деформацію на зовнішній поверхні характеризує рисунок 4.3, де видно, що окружна деформація зовнішньої поверхні практично не залежить від кута α , а визначається тільки товстостінністю заготовки і натягом на елемент. Апроксимація даних, дозволила отримати залежність, по якій можна визначити необхідний натяг в залежності від потрібної окружної деформації:

$$e_{\varphi} = 0,95 \cdot a/d_0 - (1,95 \cdot a/d_0) \cdot t_0/d_0, \quad (4.1)$$

Звідси, необхідна сумарна деформація внутрішньої поверхні визначиться:

$$\sum a/d_0 = \frac{e_{\varphi}^*}{0,95 - 1,95 \cdot t_0/d_0}, \quad (4.2)$$

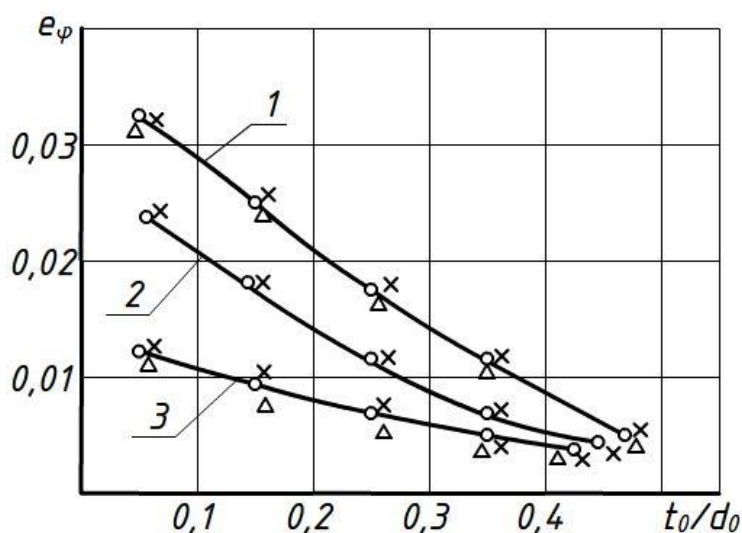


Рисунок 4.3 – Залежність окружної деформації e_{φ} від товстостінності заготовки t_0/d_0 при симуляції деформування заготовки з натягом на елемент a/d_0 : 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125 з різними кутами α :

$\circ$ – 4°; $\times$ – 8°; Δ – 2°

Тому при проектуванні технологічного процесу відновлення заготовки визначається окружна деформація, яка необхідна для компенсації зносу та забезпечення припуску під наступну механічну обробку. Потім по залежності (4.1) визначається необхідний сумарний натяг, який забезпечить

отримання цієї окружної деформації для конкретної товстостінності заготовки. Якщо є необхідність виконувати декілька циклів деформування, сумарний натяг розбивається на декілька переходів, причому:

$$\sum a/d_0 = a_1/d_0 + a_2/d_0, \quad (4.3)$$

Як показали наші дослідження, наведені в розділі 3, оцінка ступеня використання пластичності матеріалу важлива в тому випадку, коли після пластичного деформування виконується термічна або хіміко-термічна обробка. У цьому разі властивості попередньо зміцненого матеріалу значною мірою залежать від ступеня використання запасу пластичності матеріалу, накопиченої на попередніх операціях. Тому, як вказано у розділі 1, рекомендується обмежувати значення використаного ресурсу пластичності матеріалу в межах, наведених у формулі (1.9).

Після визначення необхідної деформації зовнішньої поверхні та відповідного сумарного натягу отвору необхідно перевірити заготовку на використаний ресурс пластичності як на зовнішній так і на внутрішній поверхнях.

4.3. Деформації на внутрішній поверхні оброблених заготовок та забезпечення її розміру

Розглянемо питання визначення розміру обробленого отвору після його деформування. Для цього проаналізуємо схему взаємодії інструменту з виробом (рис. 1.4), з якого зрозуміло, що позаконтактна зона після ділянки контакту збільшує діаметр отвору по відношенню до діаметра ДЕ на подвоєну величину своєї висоти. Потім відбувається пружне відновлення обробленого отвору. Виходячи з цієї схеми, автори робіт [1, 3] пропонують геометричну залежність для визначення діаметру обробленого отвору.

$$d = D_k + 2h_2 - U_d, \quad (4.4)$$

де: D_k – зовнішній діаметр деформуючого елементу, мм;

$2h_2$ – подвоєна висота позаконтактної зони за ДЕ, мм;

U_d – пружне відновлення обробленого отвору, мм.

У нашому випадку, при деформуванні виробів із пластичних матеріалів зі значними наскрізними деформаціями, висота позаконтактної зони вимірюється десятими долями міліметра і 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 елемента (рис. 1.4). Зміна твірної отвору в осередку деформації, яка повторює зміну значень окружного компонента тензора деформацій (рис. 4.2), чітко вказує на наявність позаконтактної зони за деформуючим елементом та пружного відновлення. Але використати ці дані для визначення пружного відновлення не представляється можливим, тому що вони відповідають тільки окружному компоненту тензора деформацій, а інтенсивність накопичених деформацій, яка відповідає інтенсивності напружень, складається з трьох компонентів тензора деформацій, а саме: окружної e_φ , радіальної e_r та осьової e_z . Тому для отримання достовірного результату по визначенню пружного відновлення була уточнена відома методика, запропонована авторами [1].

Вони пропонують залежність для розрахунку пружного відновлення обробленого отвору:

$$U_d = \frac{D_k \cdot \sigma_i}{\sqrt{3} \cdot E} \cdot [K_1^2 \cdot (1 - \mu) + (1 + \mu)], \quad (4.5)$$

де: σ_i – напруження, що визначається по кривій течії, яка отримана при розриві зразка із досліджуваного матеріалу, що відповідає сумарній деформації втулки e_{cp} по середньому діаметру;

E – модуль пружності першого роду оброблюваного матеріалу;

μ – коефіцієнт Пуассона;

$K_1 = d/D$;

$$e_{\text{ср}} = \frac{d + t}{d_0 + t_0} - 1, \quad (4.6)$$

Але в той же час формула (4.5) має певні недоліки при її користуванні. По перше, для визначення σ_i необхідно знати деформацію по середньому діаметру обробленої заготовки, тобто для того, щоб визначити σ_i , яке в подальшому використовується для визначення пружного відновлення, необхідно деформувати втулку, а це вносить певні труднощі. Крім того, визначення деформації по середньому діаметру має певні похибки, що вносять зі своєї сторони похибки при визначенні σ_i . Для отримання кривої течії оброблюваного матеріалу необхідно виконати операції по розриву зразка із оброблюваного матеріалу.

Тому ця методика була удосконалена за рахунок використання результатів симулювання процесу деформуючого протягування. Знаючи інтенсивність напружень (рис. 3.10) ми визначаємо σ_i в потрібному місці осередку деформації і його значення підставляємо в залежність (6.5) для розрахунку пружного відновлення.

Використовуючи теорію подібності [132–134, 144] отримуємо в безрозмірному вигляді залежність пружного відновлення від факторів процесу та розмірів заготовки.

$$U_d/d_0 = f(d_0/t_0, \sum a/d_0), \quad (4.7)$$

На рисунку 4.4. представлені результати визначення пружного відновлення від сумарної деформації при виконанні її різним числом деформуючих елементів з різними натягами.

Статистична обробка результатів, наведених на рис. 4.4, дозволила отримати інтерполяційну залежність (4.8) для розрахунку пружного відновлення в залежності від сумарного натягу і натягу на один ДЕ.

$$U_d/d_0 = -0,201 \cdot \left(\sum \frac{a}{d_0}\right)^2 + 1,093 \cdot \left(\frac{a}{d_0}\right)^2 + 0,169 \cdot \frac{a}{d_0} \cdot \sum \frac{a}{d_0} + 0,0262 \cdot \sum \frac{a}{d_0} - 0,0941 \cdot \frac{a}{d_0} + 0,0036, \quad (4.8)$$

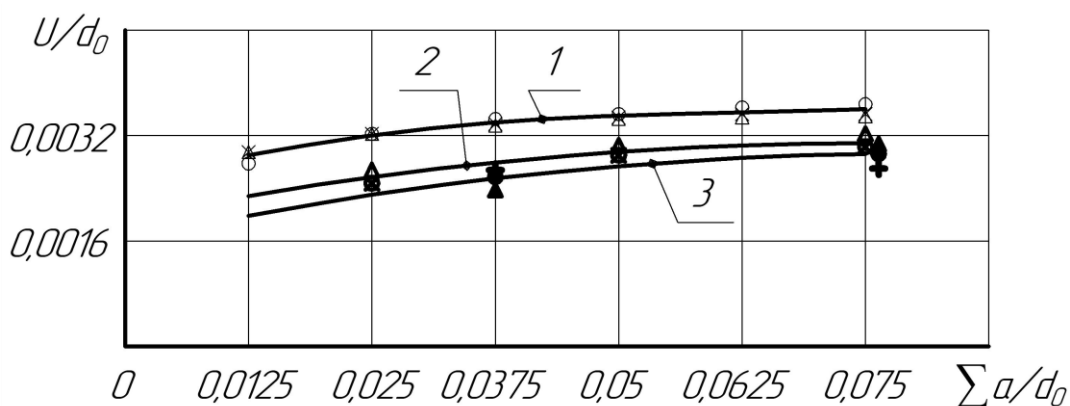


Рисунок 4.4 – Залежність зміни усадки отвору від сумарної деформації:

1 – деформація отвору з натягом $a/d_0 = 0,0125$ при t_0/d_0 : $\circ$ – 0,05; $\times$ – 0,2; Δ – 0,35; 2 – деформація отвору з натягом $a/d_0 = 0,0375$ при t_0/d_0 : $\circ$ – 0,05; $\times$ – 0,2; Δ – 0,35; 3 – деформація отвору з натягом $a/d_0 = 0,025$ при t_0/d_0 : $\bullet$ – 0,05; $+$ – 0,2; $\blacktriangle$ – 0,35

Рисунок 4.4 показує, що пружне відновлення зі зростанням сумарного натягу збільшується пропорційно, що пояснюється зміцненням обробленого матеріалу з ростом деформації отвору. Більш того, при виконанні однакової сумарної деформації більшим числом деформуючих елементів за рахунок зменшення натягу на них, значення інтенсивності напружень σ_i також пропорційно зростає незалежно від товстостінності (рис. 4.5), причому найвище значення інтенсивності напружень відповідає $t_0/d_0 = 0,35$.

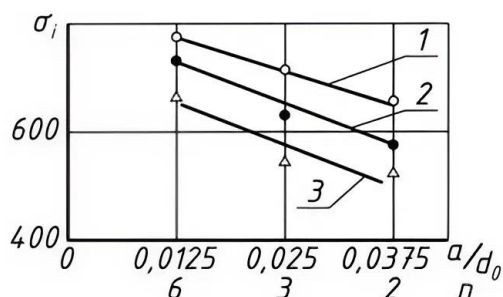


Рисунок 4.5 – Залежність інтенсивності напружень на внутрішній поверхні

заготовки сталі 12ХН3А при симуляції її деформування з сумарним натягом $a/d_0 = 0,075$ робочими елементами з кутом $\alpha = 4^\circ$ від натягу на елемент і числа деформуючих елементів, що здійснюють сумарну деформацію при товстостінності t_0/d_0 : 1 – 0,35; 2 – 0,2; 3 – 0,05

Зі збільшенням натягу на елемент, тобто зі зменшенням числа елементів, які виконують сумарну деформацію, найменше значення σ_i відповідає натягу на елемент $a/d_0 = 0,0375$. Це знаходить своє відображення в розрахунках U/d_0 , де пружне відновлення, що відповідає випадку коли сумарна деформація виконується максимальним числом елементів (рис. 4.4, крива 1), вище ніж пружне відновлення, яке відповідає натягам $a/d_0 = 0,0375$ і $0,025$ (рис. 4.4, крива 2, 3).

Статистична обробка результатів розрахунку σ_i , наведених на рис. 4.5, дозволила отримати залежність (4.9), згідно якої можна розрахувати значення σ_i для конкретного натягу та товстостінності заготовки:

$$\sigma_i = 700 + 400 t_0/d_0 - [-2824(t_0/d_0)^2 + 1062(t_0/d_0) + 4829] a/d_0, \quad (4.9)$$

Наступний компонент, який входить в залежність (4.4), необхідний для знаходження діаметра обробленого отвору це $2h_2$ – подвоєна висота позаконтактної зони за деформуючим елементом. Визначення цього компоненту виконувалося згідно удосконаленої методики по зміні твірної в осередку деформації і фіксації перевищення висоти позаконтактної зони над діаметром деформуючого елемента. На рис. 4.6 представлена залежність параметра $2h_2$ від товстостінності заготовки, з якої випливає, що зі збільшенням товстостінності заготовки параметр $2h_2$ пропорційно зменшується. Це також підтверджується даними, наведеними на рисунку 3.6, де залежність цього фактору від товстостінності має немонотонний характер. Але дані, наведені на рисунку 4.6, характерні для товстостінності, яка починається з $t_0/d_0 = 0,05$ і відповідно збільшується. В цьому діапазоні товстостінності дані роботи [3] і дані, наведені на рисунку 4.6, співпадають.

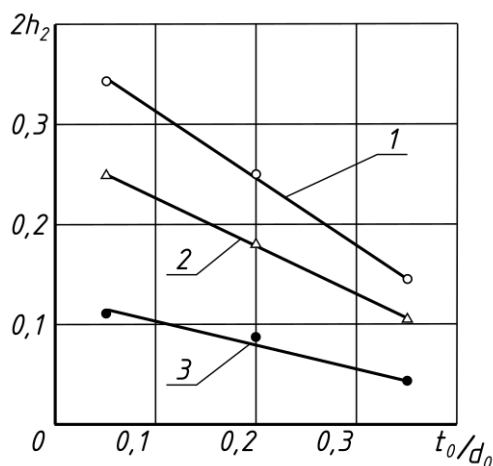


Рисунок 4.6 – Залежність параметра $2h_2$ від товстостінності на внутрішній поверхні заготовки із сталі 12ХН3А при симуляції її деформування з сумарним натягом $\sum a/d_0 = 0,075$ з натягами на елемент a/d_0 :

1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,125

Статистична обробка результатів, наведених на рис. 4.6, дозволила отримати залежність для визначення параметру $2h_2$:

$$2h_2 = 10,1 a/d_0 - (17,4 a/d_0) t_0/d_0, \quad (4.10)$$

На рисунку 4.7 наведені розрахунки для визначення внутрішнього діаметру обробленого отвору при симуляції обробки заготовки із сумарним натягом $\sum a/d_0 = 0,075$ і різною товстостінністю.

При обробці тонкостінної заготовки значними натягами на елемент (рис. 4.7, а) має місце розбивка отвору, тобто діаметр обробленого отвору більший ніж діаметр деформуючого елемента. Проте в даному випадку при деформуванні з натягом $a/d_0 = 0,0125$ має місце усадка отвору, тобто діаметр обробленого отвору менший ніж деформуючий елемент.

Також усадка спостерігається майже у всіх випадках обробки з товстостінністю заготовки $t_0/d_0 = 0,35$ (рис. 4.7, в), крім випадку, при якому деформування виконується з натягом $a/d_0 = 0,0375$. При цьому має місце незначна розбивка отвору.

Що стосується деформування заготовки з товстостінністю $t_0/d_0 = 0,2$ (рис. 4.7, б), то в залежності від натягу на деформуючий елемент має

місце усадка отвору за використання натягу $a/d_0 = 0,0125$, а за використання відповідно натягів a/d_0 : 0,025 та 0,0375 спостерігається невелика розбивка отвору. Це пояснюється значним впливом товстостінності заготовки на висоту позаконтактної зони. На тонкостінних заготовках при роздачі зі значними натягами на елемент висота позаконтактної зони значна і перевищує значення пружного відновлення. Зі зростанням товстостінності заготовки висота позаконтактної зони пропорційно знижується (рис. 4.6) і пружне відновлення починає перевищувати її значення, тобто має місце усадка отвору.

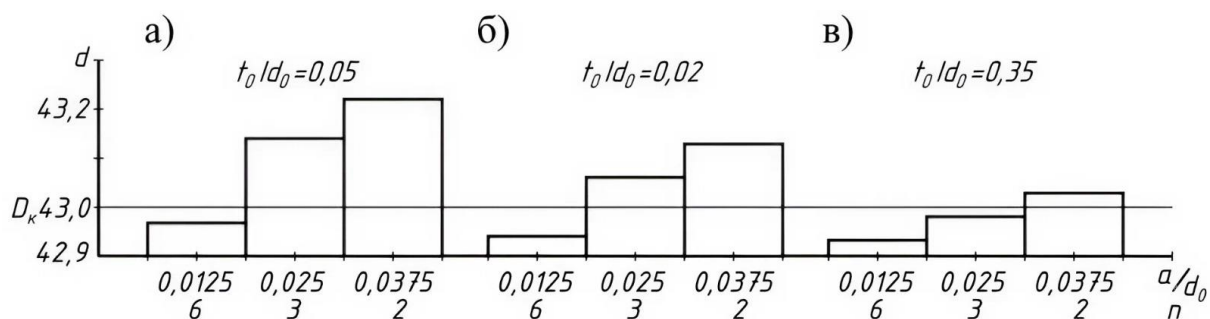


Рисунок 4.7 – Зміна діаметру обробленого отвору при симуляції

деформування заготовки із сталі 12ХН3А сумарним натягом

$\sum a/d_0 = 0,075$ і товстостінністю t_0/d_0 : а) 0,05; б) 0,2; в) 0,35. Діаметр останнього деформуючого елементу $D_k = 43,0$ мм

Таким чином, представлений матеріал дає можливість прогнозувати значення необхідного діаметру отвору за рахунок вибору режимів протягування та товстостінності заготовки.

Після визначення кількості деформуючих елементів і натягів на них та враховуючи суттєвий вплив деформуючих елементів на величину накопиченої деформації (розділ 3, рис. 3.32) перевіряємо використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні обробленого отвору. Визначивши кількість елементів і натяг на них, вибираємо схему деформації. Це можуть бути схеми: стиснення, розтягнення та зі зміною опорного торця [70].

4.4. Осьові деформації та формоутворення довжини заготовки

В попередніх підрозділах аналіз отриманих результатів при симулюванні процесу деформування заготовок з різною товстостінністю та натягами на елемент дозволив здійснити управління формоутворенням зовнішньої та внутрішньої поверхні обробленої заготовки. Розглянемо питання про управління отриманням необхідного осьового розміру деформованої заготовки.

Спочатку було визначено по залежності (4.1) натяг на елемент, який забезпечує необхідне збільшення зовнішнього діаметру заготовки. Далі визначаємо кут α , який забезпечить необхідну осьову деформацію заготовки. Як відомо з наукових праць [3, 11], присвячених визначенню деформації заготовок при деформуючому протягуванні спостерігається укорочення деталей, тобто під час роздачі внутрішнього отвору збільшується зовнішній діаметр заготовки, а її довжина зменшується. Однак, в деяких роботах [57, 145] відзначається, що крім укорочення заготовки може бути її подовження, яке можна використати для відновлення зношеного осьового розміру деталі, а також для розрахунку довжини заготовки. Це свідчить про можливість впливу на зміну осьових деформацій заготовки. Для цього було виконано симуляцію процесу деформування заготовки із сталі 12ХН3А з визначенням її осьових розмірів в широкому діапазоні зміни товстостінності деталі, натягів на елемент та кута α . Результати симуляції приведені на рисунках 3.16, б та 3.17, б відповідно для тонкостінних та товстостінних заготовок.

Видно, що при деформуванні тонкостінних деталей (рис. 3.17, б) має місце укорочення заготовки, в той же час при деформуванні товстостінних деталей (рис. 3.17, б) присутнє подовження заготовки. Якщо є укорочення і подовження, то має бути нульова зміна осьового розміру заготовки. Результати симуляції, які свідчать про наявність нульового розміру

обробленої заготовки в залежності від її товстостінності та натягу на елемент, наведені на рисунку 4.8.

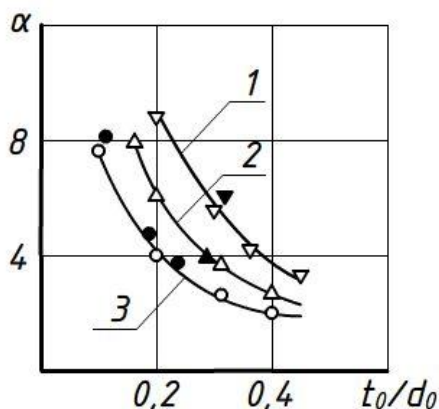


Рисунок 4.8 – Залежність кута α , який забезпечує відсутність осьових деформацій від товстостінності заготовки, отримана при симуляції процесу деформування заготовки із сталі 12ХН3А з різними натягами a/d_0 :
1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125; ●, ▲, ▼ – використані дані, отримані експериментально [63]

Для порівняння розрахункових результатів з експериментальними на криві (рис. 4.8), отримані шляхом моделювання, нанесли експериментальні дані (Додаток Є), отримані методом візіопластичності [96], а також експериментальні дані, взяті з роботи [63].

Апроксимація даних, наведених на рисунку 4.8, дозволила отримати аналітичну залежність для визначення кута α , який забезпечує відсутність осьових деформацій в залежності від товстостінності заготовки і натягу на елемент:

$$\alpha^* = \frac{0,35(1 + 100 a/d_0)}{t_0/d_0}, \quad (4.11)$$

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 (4.1), визначали необхідний сумарний натяг на елемент $\sum a$ по залежності (4.2).

Якщо деталь в процесі обробки піддається термічним або хімічно-термічним операціям, обов'язково виконується перевірка на використаний ресурс пластичності на відновленій поверхні деталі.

Далі по залежності (4.5) з використанням залежностей (4.8 – 4.10) 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. Це здійснюється за отриманою по результатам моделювання розрахунковою залежністю (4.11).

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 $\alpha = \alpha^*$.

Проведені дослідження забезпечили побудову схеми технологічного управління формоутворенням заготовки (рис. 4.9).

Розроблену схему побудови технологічного процесу відновлення або обробки порожнистої осесиметричної деталі з використанням пластичного деформування можна застосовувати при проектуванні технологічних процесів відновлення зношених або обробки нових деталей.

Елементи наведеної схеми можуть бути використані при чорновому деформуванні трубної заготовки згідно ДСТУ, ДПР якої забезпечує отримання деталі з мінімальним припуском під наступну механічну обробку.

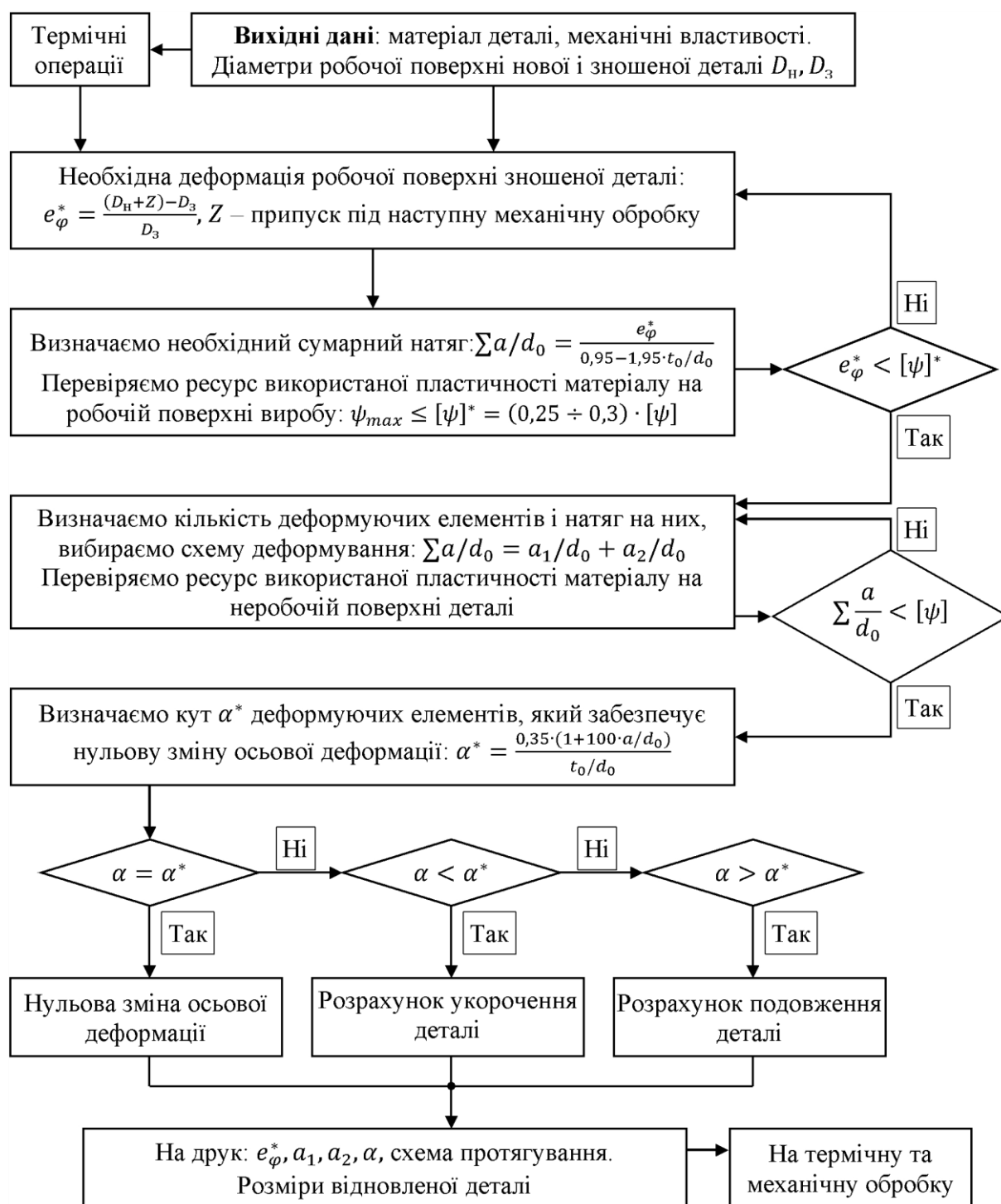


Рисунок 4.9 – Схема технологічного процесу відновлення або обробки циліндричних виробів з використанням пластичного деформування

4.5. Розробка технологічного процесу обробки деталі «втулка» з використанням деформуючого протягування

Деталь «втулка», каталожний номер 809/00127, використовується у шарнірах штока гідроциліндра задньої стріли екскаватора-навантажувача JCB моделей: 3CX, 3CX Super, 4CX (рис. 4.10, поз. 15), а також є уніфікована та застосовується в аналогічних шарнірних з'єднаннях будівельної і сільськогосподарської техніки інших виробників, зокрема CASE, FOTON, А.ТОМ. Вона служить опорою для пальця та забезпечує рухоме з'єднання зменшуючи знос корпусних деталей вузла. Втулка має наступні габаритні розміри: внутрішній діаметр – 50 мм, зовнішній діаметр – 60 мм, довжина – 30 мм. Основними відповідальними поверхнями є внутрішня циліндрична поверхня отвору та зовнішня посадкова поверхня.

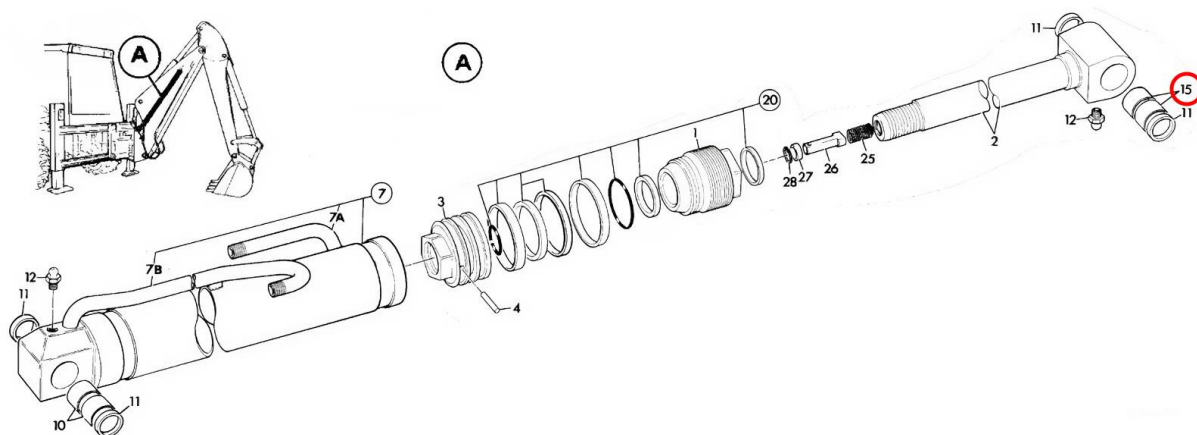


Рисунок 4.10 – Схема гідроциліндра екскаватора-навантажувача JCB [146]

Компанія JCB впевнено тримає лідируючі позиції як на світовому ринку та і на ринку України [148, 149] займаючи $\approx 50\%$ його частки. В Україні активно експлуатується від 8000 до 12000 одиниць техніки JCB моделей 3CX, 3CX Super, 4CX. В залежності від року випуску та модифікації на кожній машині може стояти від 2 до 4 штук деталей «втулка» з номером 809/00127, та ще 6...10 інших типорозмірів. На вторинному ринку України на різних інтернет-майданчиках у продажі виставлено від

400 до 700 оголошено як нових так і уживаних машин зазначених моделей [149, 150]. Згідно сервісного керівництва при належному догляді втулки до заміни проходять 4000...5000 мотогодин [151]. Одна машина може напрацювати від 1000 до 3000 мотогодин на рік в залежності від інтенсивності експлуатації. В результаті наведеного аналізу можна визначити наближені потреби ринку України у даній деталі тільки для техніки JCB, без врахування, що інші компанії використовують аналогічні за типорозмірами втулки:

$$n = \frac{10000 \text{ машин} \cdot 2 \text{ деталі}}{3 \text{ роки}} \approx 6600 \text{ шт/рік.}$$

Розглянемо існуючий технологічний процес обробки деталі який використовується для забезпечення власних потреб в групі «А.ТОМ» компанії «Пак-Трейд» (ФОП Томчук А.М.), Житомирської обл. Ця деталь виготовляється із гарячекатаної труби 63,5×9 ДСТУ EN 10216-1 [147], матеріал втулки – сталь 40Х (рис. 4.11). Заготовка втулки обробляється різанням по внутрішній і по зовнішній поверхні. Спочатку проводиться чорнове та чистове розточування отвору втулки у розмір 49,4 Н11 ($^{+0,16}_0$). У подальшому різанням формуються розміри її зовнішньої поверхні за рахунок обточки її в розмір готової деталі 60 р6 ($^{+0,051}_{+0,032}$), а також підрізаються торці втулки та виконуються фаски.



Рисунок 4.11 – Втулка екскаватора JCB каталожний номер 809/00127

Далі проводять термічну обробку збоку отвору, яка виконується поверхневим загартуванням ТВЧ до твердості 52–55 HRC в поверхневому шарі отвору на глибину 2–3,5 мм. Після загартування виконується шліфування отвору у розмір готової деталі – 50 H9 ($^{+0,062}_0$), з забезпеченням шорсткості поверхні Ra 0,8 ... 1,6 мкм.

Для захисту заготовки від корозії при зберіганні проводять фосфатування – наносять чорне покриття.

Наведений технологічний процес виготовлення втулки має недоліки, які стосуються значних витрат на відходи різання, тому що він затратний по матеріалоемності. Вага одного метру такої труби – 12,1 кг.

Тому пропонується новий технологічний процес виготовлення такої втулки з використанням деформуючого протягування. Враховуючи наявність наскрізного деформування, при якому збільшуються внутрішній та зовнішній діаметр заготовки та змінюється її довжина, вибираємо заготовку для виготовлення цієї втулки. Задачею деформуючого протягування є наближення розмірів вихідної заготовки до розмірів деталі, щоб значно зменшити витрати на її матеріали. Тому після аналізу розмірів труб по ДСТУ EN 10216-1 вибираємо в якості вихідної заготовки трубу 60,3×6,3 ДСТУ EN 10216-1, матеріал – сталь 45, вага одного метру 8,4 кг, що на 30% менше в порівнянні з заводською технологією. Слід зазначити, що розміри гарячекатаних труб задаються через зовнішній діаметр та товщину стінки, причому допуск на діаметр становить – $\Delta_D = \pm 1\%$, а на товщину – $\Delta_T = \pm 12,5\%$.

Враховуючи вищесказане, товщина стінки заготовки може знаходитися в межах 5,5 ... 7,1 мм, тоді мінімальний розмір внутрішнього діаметру буде 46,1 мм, а максимальний 49,3 мм. Мінімальний та максимальний розмір зовнішнього діаметра з врахуванням можливих відхилень може відповідно становити: 59,7 мм та 60,9 мм.

Для знаття чорнового шару металу в отворі заготовки використаємо чистову різальну секцію. Припуск на чистові зубці при протягуванні по 9-му квалітету точності рекомендується приймати $a_{0 \text{ чист.}} = 0,1 \text{ мм}$ [11].

Для досягнення розміру зовнішньої поверхні $60 \text{ p}6 \begin{pmatrix} +0,051 \\ +0,032 \end{pmatrix}$, необхідно провести чорнове та чистове точіння. Припуск під чистове точіння приймаємо $0,15 \dots 0,25 \text{ мм}$. Фактичний припуск під чорнове точіння буде залежати від похибок як зовнішньої поверхні заготовки, так і від її товщини стінки, тому що після деформуючого протягування всі можливі похибки вийдуть на зовнішню поверхню. При цьому за мінімально необхідний припуск під чорнову обробку приймаємо $0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$.

Визначмо окружну деформацію зовнішньої поверхні за отриманою залежністю (4.1) для варіантів з максимально і мінімально допустимою стінкою заготовки:

$$e_{\varphi \text{ max}} = 0,95 \cdot \frac{49,9 - 46,1}{46,1} - \left(1,95 \cdot \frac{49,9 - 46,1}{46,1} \right) \cdot \frac{7,1}{46,1} = 0,0535;$$

$$e_{\varphi \text{ min}} = 0,95 \cdot \frac{49,9 - 49,3}{49,3} - \left(1,95 \cdot \frac{49,9 - 49,3}{49,3} \right) \cdot \frac{5,5}{49,3} = 0,0089;$$

Мінімальний діаметр зовнішньої поверхні після деформуючого протягування може становити:

$$D_{\text{min}}^* = e_{\varphi \text{ min}} \cdot D_0 + D_0 = 0,0089 \cdot 60,3 + 60,3 = 60,8 \text{ мм.}$$

Отже, для отримання зовнішньої поверхні $\varnothing 60 \text{ p}6$ шляхом точіння припуску буде достатньо.

За умови максимально допустимої товщини стінки заготовки сумарний відносний натяг на деформування становить $\sum a/d_0 = 0,0824$.

Також слід перевірити використаний ресурс пластичності на зовнішній поверхні по залежності (3.9) за умови обробки максимальної товщини стінки заготовки, при якій окружна деформація $e_{\varphi \text{ max}} = 0,0535$.

$$\psi = \left[\frac{0,29822 + 9,96667 \cdot 0,0125 - 0,48444 \cdot 0,144 - 249,6 \cdot (0,0125)^2}{6} - \frac{0,9333 \cdot (0,144)^2 + 13,6 \cdot 0,0125 \cdot 0,144}{6} \right] + [0,29822 + 9,96667 \cdot 0,035 - 0,48444 \cdot 0,154 - 249,6 \cdot (0,035)^2 - 0,9333 \cdot (0,154)^2 + 13,6 \cdot 0,035 \cdot 0,154] = 0,363$$

Термічна обробка проводиться тільки зі сторони отвору, тому використаний ресурс пластичності є задовільним.

Деформування отвору виконується двома групами елементів, розміри яких та натяг на кожний визначені згідно наших рекомендацій, а саме: перша група виконує максимальну пластичну деформацію отвору, мінімізує використаний ресурс пластичності по внутрішній поверхні заготовки; друга група виконує незначну пластичну деформацію з мінімально-необхідними натягами. Тому перша група буде налічувати 2 елементи з натягом на кожний – $a/d_0 = 0,035$, а друга група 1 елемент з натягом – $a/d_0 = 0,0125$. Таким чином сумарний можливий натяг буде становити $\sum a/d_0 = 2 \cdot 0,035 + 0,0125 = 0,0825$. Слід зауважити, що при значеннях товщини стінки заготовки менших за максимально граничні натяг на першому деформуючому елементі буде меншим за 0,035.

Як вказано в підрозділі 4.3, розмір отвору визначається згідно залежності (4.4) розміром деформуючого елементу та висотою позаконтактної зони за ним мінус пружне відновлення. Пружне відновлення визначається згідно залежності (4.8). Для першої групи деформуючих елементів, у яких натяг на елемент дорівнює 0,035 пружне відновлення буде становити:

$$U_d/d_0 = -0,201 \cdot (0,07)^2 + 1,093 \cdot (0,035)^2 + 0,169 \cdot 0,035 \cdot 0,07 + 0,0262 \cdot 0,07 - 0,0941 \cdot 0,035 + 0,0036 = 0,0029$$

Звідси:

$$U_d = 0,0029 \cdot 46,1 = 0,134 \text{ мм.}$$

Для другої групи деформуючих елементів, у яких натяг на елемент дорівнює 0,0125 пружне відновлення буде становити:

$$U_d/d_0 = -0,201 \cdot (0,0125)^2 + 1,093 \cdot (0,0125)^2 + 0,169 \cdot 0,0125 \cdot 0,0125 + 0,0262 \cdot 0,0125 - 0,0941 \cdot 0,0125 + 0,0036 = 0,0026$$

Звідси:

$$U_d = 0,0026 \cdot 49,3 = 0,13 \text{ мм.}$$

Висота позаконтактної зони визначається за залежністю 4.10:

$$2h_2 = 10,1 \cdot 0,0125 - (17,4 \cdot 0,0125) \cdot 7,1/49,3 = 0,095 \text{ мм.}$$

Таким чином із залежності 4.4 при відомій висоті позаконтактної зони, пружного відновлення та необхідного діаметру отвору з врахуванням припуску під різальну зону можемо визначити необхідний діаметр останнього деформуючого елемента:

$$D_k = d - a_{\text{очист.}} - 2h_2 + U_d = 50 - 0,1 - 2 \cdot 0,095 + 0,13 = 49,84 \text{ мм.}$$

Приймаємо: $D_k = 49,8 \text{ мм.}$

Діаметри інших деформуючих елементів розраховуємо в залежності від натягу на них та вже відомому діаметрі останнього деформуючого елемента. Для зручності отримані значення зведемо у таблицю 4.1.

За залежність (3.10) визначаємо використаний ресурс пластичності на внутрішній поверхні заготовки:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{1080,8 \cdot (0,0125)^2 - 69,059 \cdot 0,0125 + 1,299}{6} \\ &\quad + (1080,8 \cdot (0,035)^2 - 69,059 \cdot 0,035 + 1,299) \\ &= 0,101 + 0,206 = 0,307 \end{aligned}$$

Враховуючи, що після обробки буде проводитися термічна обробка отвору граничне значення використаного ресурсу пластичності обмежується 0,25...0,3. Так як розрахунок проводився для мінімально можливого діаметра заготовки, який за законом нормального розподілу малоімовірно буде зустрічатися, і фактичний натяг буде меншим, то отримане значення $\psi = 0,307$ можна вважати прийнятним.

Таблиця 4.1 – Параметри деформуючо-різальної протяжки для обробки
отвору втулки

Робочі елементи протяжки	Натяг або припуск, мм	Діаметр, мм	Крок, мм	Допуск на діаметр, мм	Ширина циліндричної	Кут нахилу твірної ДЕ, мм	Висота деформуючих
Деформуючі перша група	1,6*	47,6	78	-0,02	1	2	33
	1,6*	49,2					33
Деформуючі друга група	0,6	49,8	78	-0,02	1	4	16
Різальні	0,1	49,92	13	-0,02	$\leq 0,05$	—	—
		49,94	15				
		49,96	17				
		49,98	13				
		50,00	15				
		50,02	17				
Калібруючі	—	50,02	13	-0,01	0	—	—
		50,02	15				
		50,02	17				

Примітка: * – натяг може зменшуватися в залежності від фактичного розміру отвору заготовки.

Кут нахилу твірної деформуючих елементів першої групи вибирається $\alpha = 2^\circ$, що також забезпечує мінімізацію використаного ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки. Для забезпечення висотних параметрів шорсткості в діапазоні $Ra\ 0,8$ мкм кут α для другої групи вибирається $\alpha = 4^\circ$.

$$\alpha^* = \frac{0,35(1 + 100 a/d_0)}{t_0/d_0} = \frac{0,35(1 + 100 \cdot 0,035)}{0,154} = 10^\circ$$

Після отримання необхідного розміру отвору виконують точіння по зовнішній поверхні, підрізку торців та фаски. Після цього деталь поступає на термообробку. Враховуючи вагу одного метра заготовки по існуючому технологічному процесу, яка становить 12,1 кг та вагу заготовки по новому технологічному процесу, яка становить 8,4 кг, видно суттєву економію матеріалу при переході на новий технологічний процес. Коефіцієнт використання матеріалу при заводському технологічному процесі рівний: $K_{\text{в.м.}} = 0,198/0,385 = 0,51$, запропонованому нами – $K_{\text{в.м.}} = 0,198/0,267 = 0,74$.

4.6. Висновки за розділом 4

Управління схемою формоутворення є важливим аспектом розробки технологічного процесу обробки нових та відновлення зношених деталей з використанням деформуючого протягування. Це дозволяє здійснити отримання необхідних розмірів деталей після їх деформування. При обробці нових деталей забезпечується отримання необхідних припусків під подальшу обробку, а при відновленні зношених деталей – отримання розмірів зношеної поверхні, які компенсують знос і забезпечують припуск під подальшу механічну обробку.

Для реалізації управління формоутворення заготовки при деформуючому протягуванні розроблена методика вивчення НДС за рахунок симулювання процесу деформування заготовок з різною товстостінністю в широкому діапазоні зміни режимів протягування та геометрії інструменту при використанні програмного комплексу DEFORM 2D/3D™V 11.0. Проведений аналіз результатів, отриманих за допомогою розробленої методики, дозволив отримати наступні результати:

1. Встановлено взаємозв'язок необхідної окружної деформації зовнішньої поверхні e_φ з сумарним натягом на отвір. Показано, що параметр e_φ не залежить від кута α , а визначається товстостінністю заготовки і сумарним натягом. Отримана залежність для визначення необхідного натягу, який забезпечує необхідне значення параметра e_φ .

2. 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. Встановлений зв'язок діаметра обробленого отвору з режимами протягування та товстостінністю заготовки.

3. 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. 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 $\alpha > \alpha^*$.

4. Розроблено схему технологічного управління формоутворенням порожнистої осесиметричної деталі, що дозволило визначити необхідні режими протягування і геометрію інструменту, які забезпечать отримання необхідних розмірів обробленої або відновленої деталі.

5. Проведено розробку технологічного процесу виготовлення деталі «втулка», каталожний номер 809/00127, з використанням деформуючого протягування, що дає змогу скоротити металоємність заготовок до 30%. Розроблений технологічний процес та результати наукового дослідження 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 сформувати 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) перед нею виникає зона локальної пластичної деформації, яка являє собою наплив матеріалу з ділянки контакту і збільшує її протяжність за рахунок зменшення позаконтактної зони перед нею;

– 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 натурного 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 (мікролущення) 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 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 значенням кута 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інженерія деталей, оброблених протягуванням : монографія / Е. К. Посвятенко та ін. ; ІНМ ім. Бакуля НАН України, ЦНТУ МОН України. Кропивницький : видавець Лисенко В. Ф., 2021. 466 с.
2. Research on the development of the machine-building industry of Ukraine: state and prospects : multi-authored monograph / S. F. Smerichevskyi et al. ; ed. S. F. Smerichevskyi. Latvia : Izdevniecība "Baltija Publishing", 2017. 200 p.
3. Розенберг А. М., Розенберг О. А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / Отв. ред. П. Р. Родин. К. : Наук. думка, 1990. 320 с.
4. Немировский Я. Б. Особенности расчета геометрических, кинематических параметров очага деформации при деформирующем протягивании. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград : КНТУ, 2013. Вип. 26. С. 100–111.
5. Немировский Я. Б., Цеханов Ю. А., Балаганская Е. А. Исследование изменения размеров полых осесимметричных заготовок при раздаче их деформирующим протягиванием. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*. 2005. № 2. С. 12–15.
6. Немировский Я. Б., Цеханов Ю. А. Применение вариационных принципов для анализа энергетических и кинематических параметров процесса деформирующего протягивания. *Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб.* Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2001. Вып. 60. С. 154–159.

7. Посвятенко Е. К., Немировський Я. Б., Шепеленко І. В. Протягування та протяжний інструмент : монографія. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2020. 298 с.
8. Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании. Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж, 2001. 200 с.
9. Розенберг О. А., Цеханов Ю. А., Немировский Я. Б. Исследование деформирования трубы в зонах вне контакта при протягивании. *Прикл. механика*. Т. : XIX, 1983. №10. С. 78–83.
10. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. К. : Наук. думка, 1981. 288 с.
11. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, Э. И. Гриценко, Э. К. Посвятенко. К. : Наук. думка, 1977. 188 с.
12. Проскуряков Ю. Г., Романов В. Н., Исаев А. Н. Объёмное дорнование отверстий. М. : Машиностроение, 1984. 224 с.
13. Кривошея В. В., Петасюк Г. А. Изменение геометрических размеров обрабатываемой детали при деформирующем протягивании. *Резание и инструмент в технологических системах*. Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2000. Вып. 57. С. 136–144.
14. Немировский Я. Б. Технологическое обеспечение точности при обработке отверстий деформирующим протягиванием. *Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб.* Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2013. Вып. 83. С. 195–207.
15. Hurey I.; Maruschak P.; Augousti A.; Flowers A.; Gurey V.; Dzyura V.; Prentkovskis O. Resistance to wear during friction without lubrication of steel-cast iron pairing with nanocrystalline structure-reinforced surface layers. *Lubricants*. 2023. 11. P. 418. URL : <https://doi.org/10.3390/lubricants11100418>.

16. Hurey I., Hurey T., Gurey V. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium. In: Ivanov V., et al. (Eds.), *Advances in design, simulation and manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer: Cham, Switzerland, 2020. P. 572–580. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_57.
17. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания / А. М. Розенберг и др. К. : Наук. думка, 1978. 256 с.
18. Wan N., Zhao B., Ding W., He Q. Advancements in cold extrusion anti-fatigue manufacturing technology for connecting holes. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025. Vol. 314. P. 110764. URL : <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110764>.
19. Wan N., Zhao B., Ding W., He Q. Research status and tendency on cold expansion anti-fatigue manufacturing technology for aircraft structural fastening holes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 141. P. 319–335. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.068>.
20. Fu Y., Ge E., Su H., Xu J., Li R. Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures: A review and prospect. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2015. Vol. 28. P. 961–973. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.05.006>.
21. Phillips J. L. Sleeve coldworking of fastener holes. Air force materials laboratory report AFML-TR-74-10. Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA, 1974. 320 p.
22. Rodman G. A, Creager M. Split mandrel versus split sleeve coldworking: dual methods for extending the fatigue life of metal structures. NASA : Langley research center, 1994. P. 1077-1086.
23. Hou S., Zhu Y., Cai Z., Wang Y., Ni Y., Du X. Effect of hole cold expansion on fatigue performance of corroded 7B04-T6 aluminium alloy. *International*

- Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 126. P. 210–220. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.05.008>.
24. Mostefa B., Aid A., Ali B., Mohamed B. Effect of hardening induced by cold expansion on damage fatigue accumulation and life assessment of Aluminum alloy 6082 T6. *Materials Research*. 2012. Vol. 15. P. 981–985. URL : <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000123>.
 25. Calaf-Chica J., Marín M. M., Rubio E. M., Teti R., Segreto T. Parametric analysis of the mandrel geometrical data in a cold expansion process of small holes drilled in thick plates. *Materials*. 2019. Vol. 12(24). P. 4105. URL : <https://doi.org/10.3390/ma12244105>.
 26. Baltach A., Djebli A., Bendouba M., Besseghier E. H., Aid A. Numerical analysis and optimization of the residual stresses distribution induced by cold expansion technique. *Frattura ed integrità strutturale*. 2018. Vol. 12. P. 252–265. URL : <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.46.23>.
 27. Curto-Cárdenas D., Calaf-Chica J., Bravo Díez P.M., Preciado Calzada M., Garcia-Tarrago M.-J. Cold expansion process with multiple balls-numerical simulation and comparison with single ball and tapered mandrels. *Materials*. 2020. Vol. 13(23). P. 5536. URL : <https://doi.org/10.3390/ma13235536>.
 28. Su M., Amrouche A., Mesmacque G., Benseddig N. Numerical study of double cold expansion of the hole at crack tip and the influence on the residual stresses field. *Computational Materials Science*. 2008. Vol. 41. P. 350–355. URL : <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.04.022>.
 29. Yuan X., Yue Z. F., Wen S. F., Li L., Feng T. Numerical and experimental investigation of the cold expansion process with split sleeve in titanium alloy TC4. *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 77. P. 78–85. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.03.014>.
 30. Liu Y., Xiaojun S., Jun L., Zhufeng Y. Finite element method and experimental investigation on the residual stress fields and fatigue

- performance of cold expansion hole. *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. P. 1208–1215. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.031>.
31. Seibi A. C., Barsoum I., Molki A. Experimental and numerical study of expanded aluminum and steel tubes. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. P. 3049–3055. URL : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.505>.
 32. Avasse M., Priarone P. C., Scattina A. Experimental and numerical characterization of a mechanical expansion process for thin-walled tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. P. 1143–1152. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.011>.
 33. Liu K., Zhou L., Yang X., Li M., Wang W., Zhu W. Finite element simulation of the cold expansion process with split sleeve in 7075 aluminum alloy. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2021. Vol. 102. P. 361–374. URL : <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00648-6>.
 34. Morovic L., Kritikos M., Sobrino D. R. D., Bilik J., Sobota R., Kapustova M., A Statistical approach in the analysis of geometrical product specification during the cold tube drawing process. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 676. URL : <https://doi.org/10.3390/app12020676>.
 35. Yue F., Sha Z., Sun H., Chen D., Liu J. Research on the optimization of TP2 copper tube drawing process parameters based on particle swarm algorithm and radial basis neural network. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. P. 11203. URL : <https://doi.org/10.3390/app142311203>.
 36. Kajikawa S., Kawaguchi H., Kuboki T., Akasaka I., Terashita Y., Akiyama M. Tube drawing process with diameter expansion for effectively reducing thickness. *Metals*. 2020. Vol. 10(12). P. 1642. URL : <https://doi.org/10.3390/met10121642>.
 37. Nemyrovskiy Y., Shepelenko I., Storchak M. Plasticity resource of cast iron at deforming broaching. *Metals*. 2023. Vol. 13(3). 551. URL : <https://doi.org/10.3390/met13030551>.

38. Lüchinger M., Velkavrh I., Kern K., Baumgartner M., Klien S., Diem A., Schreiner M., Tillmann W. Development of a constitutive model for friction in bulk metal forming. *Lubricants*. 2018. Vol. 6(2). P. 42. URL : <https://doi.org/10.3390/lubricants6020042>.
39. del Rey J. C., Guerrero-Vacas G., Ochoa-Rodríguez M., Rodríguez-Alabanda O. Effect of die design and lubricant on ZnAl15% wire drawing: an experimental approach with pressure/hydrodynamic and conventional drawing dies. *Lubricants*. 2025. Vol. 13(11). P. 481. URL : <https://doi.org/10.3390/lubricants13110481>.
40. Farhangdoost K., Hosseini A. The effect of mandrel speed upon the residual stress distribution around cold expanded hole. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. P. 2184–2189. URL : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.361>.
41. Yao S. L., Lei X. L., Wang R. Z., He C. Y., Zhang X. C., Tu S. T. A novel cold expansion process for improving the surface integrity and fatigue life of small-deep holes in Inconel 718 superalloys. *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 154. P. 106544. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106544>.
42. Lv G., Wang Z., Qu L., Li J., Liu C. Mechanism of friction reduction in surface micro-textured mandrels during hole cold expansion. *Coatings*. 2025. Vol. 15(7). P. 789. URL : <https://doi.org/10.3390/coatings15070789>.
43. Su R., Huang L., Xu C., He P., Wang X., Yang B., Wu D., Wang Q., Dong H., Ma H. Factors influencing residual stresses in cold expansion and their effects on fatigue life – A review. *Coatings*. 2023. Vol. 13(12). P. 2037. URL : <https://doi.org/10.3390/coatings13122037>.
44. Davidson T. E., Barton C. S., Reiner A. N., Kendall D. P. New approach to the autofrettage of high-strength cylinders. *Experimental Mechanics*. 1962. Vol. 2. P. 33–40. URL : <https://doi.org/10.1007/BF02325691>.

45. Gibson M. C. Determination of residual stress distributions in autofrettaged thick-walled cylinders : Ph.D. thesis. Cranfield University, Cranfield, 2008. 302 p.
46. On the contact interaction between hard-alloy deforming broaches and a workpiece during the shaping of grooves in the holes of tubular products / S. Y. Sheykin et al. *Journal of Superhard Materials*. 2021. Vol. 43. P. 222–230. URL : <https://doi.org/10.3103/S1063457621030096>.
47. Грушко А. В. Визначення зміцнення при деформуючому протягуванні товстостінних труб. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2014. 2(14E). С. 18–26.
48. Tsekhanov Yu. O., Sheykin S. Ye., Studenets S.F. Regularities of surface strengthening during deforming broaching of parts with finite wall thickness. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2026. Vol. 62(1). P. 127-137. URL : <https://doi.org/10.15407/pcmm2026.01.127>.
49. Shepelenko I., Tsekhanov Y., Nemyrovskiy Y., Posviatenko E. Improving the efficiency of antifriction coatings by means of finishing the antifriction non-abrasive treatment. In: Tonkonogyi V. et al. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham : Springer, 2020. P. 309–318. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30.
50. Schwenzfeier W. F., Harrer O. Pressendes aus streckendes aufweiten von nahtlos gezogenen rohren. *Maschinenmarkt*. 1977. N 28. S. 541–546.
51. Стрижак В. И. Исследование процесса холодной раздачи труб : автореф. дис. ... канд. / Трубный институт. Днепропетровск, 1963. 18 с.
52. Avitzur B. Metal forming: The application of limit analysis (Manufacturing engineering and materials processing series). New York : Marcel Dekker, 1980. 208 p.

53. Розенберг А. М., Розенберг О. А., Бусел Ю. Ф., Крицкий А. Д. Прочность твердосплавных рабочих элементов деформирующих протяжек / УкрНИКТИССМИ. К. : «Техніка», 1971. 124 с.
54. Levitas V. I., Nemirovskiy Y. B., Polotnyak S. B. Structural strength of hard-alloyed working elements of deforming broaches. *Strength Problems*. 1998. № 12. P. 62–68.
55. Nemirovskiy Ya. B., Derevets L. I., Polotnyak S. B. Influence of geometry of a deforming element on its strength. *Superhard Materials*. 2004. № 2. P. 60–65.
56. Nemyrovskiy Y., Posvyatenko E., Sardak S. Technical-economic aspects of the use of technological process of deforming broaching. In: Ivanov V., et al. *Advances in design, simulation and manufacturing II. DSMIE 2019*. Lecture notes in mechanical engineering. Springer, Cham, 2020. P. 238–247. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_24.
57. Krivosheya V. V. Effect of the deformation angle on the extension of cylindrical holes : monograph. Saarbrücken : LAMBERT Academic Publishing, 2015. 127 p.
58. Mathematical modeling of the process of deforming broaching / E. A. Balaganskaya, B. A. Golodenko, Y. B. Nemirovsky, Yu. A. Tsekhanov ; Voronezh State Technological Academy. Voronezh : Voronezh State Technological Academy, 2009. 194 p.
59. Немировський Я. Б., Деревець Л. І. Відновлення поршневих пальців на основі деформуючого протягування. *Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвідом. темат. наук. зб.* 2003. Вип. 87. С. 269–278.
60. Nemyrovskiy Ya. B. Accuracy control for products manufactured by deforming broaching. *Metallurgical and mining Industry*. 2017. № 7. P. 6–18.

61. Чепурко М. И. Внеконтактная деформация при производстве труб и ее влияние на сопротивление деформации. *Бюллетень науч.-техн. Информации*. УкрНИИТИ. Харьков : Metallurgizdat, 1958. № 4/5. С. 38–50.
62. 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.
63. Немировский Я. Б., Геровский А. И., Наталенко В. А., Копьев О. А. Восстанавливаем поршневые пальцы. *Электрическая и тепловая тяга*. Днепропетровск, 1993. № 11. С. 22–23.
64. Биков І. А., Кузнецов Т. А. Виготовлення заготовок поршневих пальців в автомобільній промисловості. *Автомобільне виробництво*. Київ, 1994. С. 4–9.
65. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Є. А. Фролов, С. І. Кравченко, С. В. Попов, С. М. Гнітько. Полтава, 2019. 201 с.
66. Теоретичні основи та технологічні процеси відновлення деталей машин : навчальний посібник / М. І. Черновол та ін.. Харків : «Діса плюс», 2025. 347 с.
67. Надійність машин та обладнання : навчальний посібник. Ч. 2. Ремонт машин та відновлення деталей / З. В. Ружи́ло та ін.. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 310 с.
68. 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. *The international scientific journal problems of tribology*. 2024 V. 29, No 3/113. P. 31-42. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-113-3-31-42>.

69. Капелюшний Ф. М. Вплив експлуатаційних факторів на зношування поршневих пальців дизельних двигунів. *Праці Таврійської держ. агротехн. акад.* Мелітополь, 2001. Т. 17, вип. 2. С. 113–117.
70. Немировський Я. Б. Вплив умов базування на точність деталей, оброблених деформуючим протягуванням. *Вісник Тернопільського національного технічного університету: Наук. журнал.* Тернопіль : ТНТУ, 2014. № 3(75). С. 144–157.
71. Johnson W, Mellor P. B. Engineering Plasticity. Chichester : Ellis Horwood Ltd., 1983. – 647 p.
72. Singh S. Theory of Plasticity & Metal Forming Process. Delhi : Khanna Publishers, 1980. – 580 p.
73. Лопатенко С. Г. Особенности деформирующего протягивания неравножестких деталей из чугуна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01. ИСМ НАН Украины. Киев, 1998. 18 с.
74. Розенберг О. А., Бусел Ю. Ф., Крицкий А. Д. Контактные давления при обработке отверстий твердо-сплавными деформирующими протяжками. *Вестн. машиностроения.* 1979. № 5. С. 47–51.
75. А. с. 724980 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ определения границ фактического контакта инструмента с изделием при волочении и раздаче / О. А. Розенберг, Ю. Ф. Бусел, А. Д. Крицкий, Я. Б. Немировский. № 7619991/25–28 ; заявл. 30.05.1978 ; опубл. 30.03.1980, Бюл. № 12. 2 с.
76. Hill R. The mathematical theory of plasticity. Oxford : Clarendon Press, 1998. 355 p.
77. Зайцев Д. Е., Дель В. Д., Дель Г. Д. Напряженное состояние при деформирующем протягивании. *Вестн. Машиностроения.* 1973. № 6. С. 63–65.
78. Del G. D., Novikov N. A. Method of dividing meshes. M.: Mashino-building, 1989. 144 p.

79. Грушко А. В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монография. Винница : ВНТУ, 2015. 348 с.
80. Ogorodnikov V. A., Dereven'ko I. A., Sivak R. I. On the influence of curvature of the trajectories of deformation of a volume of the material by pressing on its plasticity under the conditions of complex loading. *Materials Science*. 2018. № 54. P. 326–332. URL : <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x>.
81. Цеханов Ю. А. Анализ напряженного состояния в контактной зоне при деформирующем протягивании. *Повышение эффективности протягивания (совершенствование процессов обработки)*. Рига : Риж. политехн. ин-т. 1988. С. 90–93.
82. Deform-User Manual SFTC-Deform V11.0.2, Columbus (OH), USA. 2014.
83. Studenets S. F., Yeromin P. M., Chernyavsky O. V. Influence of deformation conditions during the machining of hard-alloy combined broaches on the structure and hardening of the surface layer of cast irons. *Superhard materials*. 2015. № 4. P. 91–99. URL : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/126205>.
84. Liu Y., Liu J., Herrmann M., Schenck C., Kuhfuss B. Material flow in infeed rotary swaging of tubes. *Materials*. 2021. Vol. 14(1) : 58. 18 p. URL : <https://doi.org/10.3390/ma14010058>.
85. Ghaei A., Movahhedy M.R., Karimi Taheri A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel. *Materials & Design*. 2008. № 29. P. 867–872. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.03.013>
86. Lahoti G. D., Liuzzi L., Altan T. Design of dies for radial forging of rods and tubes. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1977. Vol. 1, № 1. P. 99–109.
87. Kuboki T., Tasaka S., Kajikawa S. Examination of working condition for reducing thickness variation in tube drawing with plug. In COMPLAS XIV, Proceedings of the XIV International Conference on Computational

- Plasticity: Fundamentals and Applications, 5–7 September 2017. CIMNE : Barcelona, Spain, 2017. P. 63–71.
88. Liu Y., Schenck C., Herrmann M., Kuhfuss B. Plastic deformation components in mandrel free infeed rotary swaging of tubes. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 27. P. 33–38. URL : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.040>.
 89. Sanjari M., Saidi P., Karimi Taheri A., Hossein-Zadeh M. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test. *Materials & Design*. 2012. Vol. 38. P. 147–153. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.048>.
 90. Wu Y., Dong X., Yu Q. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 93. P. 102–110. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>.
 91. Fan L., Wang Zh., Wang H. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014. Vol. 16, № 2. P. 329–334. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.01.005>.
 92. Serajzadeh S., Karimi Taheri A., Nejati M., Izadi J., Fattahi M. An investigation on strain inhomogeneity in hot strip rolling process. *J. Mater. Process. Technol*. 2002. Vol. 128. P. 88–99.
 93. Bridgman P. W. Studies in large plastic flow and fracture. New York : McGraw-Hill, 1952. 362 p.
 94. Kachanov L. M. Fundamentals of plasticity theory (2nd ed.). Kyiv : Nauka, 1989. 420 p.
 95. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Київ : Вища школа, 1983. 175 с.
 96. Tsekhanov Yu. Stress-strain state of thick-walled pipes under multicycle deforming broaching. *Journal Problems of Strength, Institute of Strength Problems*. Kiev, 2002. Vol. 6. P. 26–33.

97. Огородников В. А., Алиева Л. И., Деревенько И. А. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии. *Вісник Нац. техн. ун-ту України «КПІ». Серія «Машинобудування»*. 2012. № 64. С. 201–207.
98. Hrushko O., Kyrytsia I. Criteria of deformity taking into account the properties of the material in the parameter of the stress state. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. № 1(51). С. 30–37. URL : [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)30](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)30).
99. Хоменко О. В. Інтенсивна пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. т. 24, №2. 20 с. URL : <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.
100. Огородніков В. А., Архіпова Т. Ф. Про технологічну спадковість при обробці тиском. *Матеріали XLV Науково-технічної конференції ВНТУ*, Вінниця, 23-24 березня 2016 р. Вінниця, 2016. 3 с. URL : <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2016/paper/view/1378>.
101. Гайдамак О. Л. Закономірності відновлення запасу пластичності та методика його розрахунку за деформування проміжним термообробленням. *Металофізика та новітні технології*. 2023. Т. 45. Вип. 10. С. 1189-1204.
102. Кириця І. Ю. Особливості розрахунку параметрів напружено-деформованого стану та побудови діаграм пластичності в зоні локалізації деформації під час розтягу циліндричних зразків. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 2. С. 101–107.
103. Огородніков В. А., Кириця І. Ю., Перлов В. Є. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2015. 164 с.

104. Lakhtin Yu. M., Kalner V. D., Sedukov V. K., Smirnova T. A. Influence of preliminary cold deformation on steel cementation. *Metallovedenie and Thermic Treatment of Metals*. 1991. Vol. 12. P. 22–26.
105. Афанасьєва О. В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. Посібник. Харків : ХНУРЕ, 2016. 188 с.
106. Левитас В. И. Большие упруго-пластические деформации материалов при высоком давлении. Киев : Наук. думка, 1987. 231 с.
107. Del G. D., Soloviev O. V., Tsekhanov Yu. A. Investigation of stresses and deformations in workpieces during deforming broaching. *Increasing the Efficiency of Broaching. Processing Quality*. Riga : Riga Polytechnic Institute, 2000. P. 82–88.
108. Del G. D., Rosenberg O. A., Solov'ev O. V., Tsekhanov Yu. A. Strength of the tubular workpieces under the cyclic distribution. *Problems of Strength*. 1992. Vol. 6. P. 81–85.
109. Михалевич В., Грушко О., Добранюк Ю., Тютюнник О. Напружений стан товстостінної труби під дією внутрішнього тиску та осьової сили. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2025. Том. 20. № 2. С. 92–98. URL : <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.92>.
110. 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. URL : [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d2).
111. Сивак Р. І. Розвиток наукових основ механіки немонотонного пластичного деформування та удосконалення технологічних процесів обробки металів тиском : автореф. дис. ... д. т. н. : спец. 05.03.05. Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2019. 43 с.
112. Сивак Р. І., Огородніков В. А., Архіпова Т. Ф. Немонотонна пластична деформація в процесах обробки металів тиском. *Вісник НТУ*

- «ХІІІ». Серія: Технології та обробка матеріалів у машинобудуванні. 2022. № 1. С. 92–97.
113. Сердюк О. В. Удосконалення технології обкочування роликом із застосуванням теорії деформовності : дис. ... к. т. н. : спец. 05.03.05. Вінниця, 2019. 183 с.
 114. Ogorodnikov V. A., Grushko O. V., Huang Xichen. Product quality management and prediction of technological heritage in modern high technologies of metal forming. *Scientific Notes: Inter-university Collection*. Lutsk : State Technical University, 1999. P. 172–187.
 115. Архіпова Т. Ф. Критерії деформованості та якість виробів, отриманих обробкою тиском. *Матеріали ІІ Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту»*, Вінниця, 13-15 травня 2021 р. Вінниця, 2021. 4 с. URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/paper/viewFile/13386/11263>.
 116. Kamaya M. Ramberg-Osgood type stress-strain curve estimation using yield and ultimate strengths for failure assessments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016. Vol. 137. P. 1–12. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.04.001>.
 117. Dell H., Gese H., Kepler L., Werner H., Hooputra H. Continuous failure prediction model for nonlinear load paths in successive stamping and crash processes. *New sheet steel products and sheet metal stamping (SP-1614)*. SAE 2001 World congress, Michigan, March 5–8, 2001. P. 113–122.
 118. Кириця І. Ю. Вплив об'ємності схеми напруженого стану на оцінку використаного ресурсу пластичності при холодному пластичному деформуванні. *Збірник тез доповідей ІІ-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021»*. Вінниця : ВНТУ, 2021. С.70–72.

119. Грушко О. В., Кириця І. Ю. Критерії деформовності з врахуванням властивостей матеріалу в параметрі напруженого стану. Обробка матеріалів тиском. 2022. № 1(51). С. 30–37. URL : [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)30](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)30).
120. Криця І. Ю. Феноменологічні критерії руйнування. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 3(309). С. 75–81. URL : <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-75-81>.
121. Dell H., Gese H., Oberhofer G. Crach FEM–A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. *AIP Conference Proceedings*. 2007. Vol. 908. P. 165–170.
122. Forming limit diagram (FLD), forming limit curve (FLC) : URL : <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/sheet-metal-forming/cupping-test/forming-limit-curve-flc-iso-12004>.
123. Шепеленко І. В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування : дис. ... д. т. н. : 05.02.08. Київ, 2021. 465 с.
124. Прикладне матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації / Сушко О. В., Посвятенко Е. К., Кюрчев С. В., Лодяков С. І. Мелітополь : ТПЦ «Forward press», 2019. 352 с.
125. Марочник сталі і сплавів. Характеристика матеріалу 12ХН3А. URL : https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=180 (дата звернення: 22.10.2024).
126. Steel Group. Сталь 12ХН3А. URL : <https://steelgroup.com.ua/chornyj-metal/12hn3a> (дата звернення: 22.10.2024).
127. Kyryliv V. I., Chaikovs'kyi B. P., Maksymiv O. V., Shal'ko A. V. Contact fatigue of 20KHn3A steel with surface nanostructure. *Materials Science*. 2016. Vol. 51. P. 833–838. URL : <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9909-1>.

128. Kyryliv V. I., Chaikovs'kyi B. P., Maksymiv O. V., Shal'ko A. V. Contact fatigue of 20KhN3A and 55SMFA steels with surface nanostructured layers in corrosive-abrasive media. *Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 508–513. URL : <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0103-5>.
129. Посвятенко Е. К., Будяк Р. В. Дослідження процесу обробки гільз циліндрів гідросистем машин. *Вісник Національного транспортного університету*. К., 2009. Вип. 19. С. 17–20.
130. Будяк Р. В. Підвищення надійності гідроциліндрів машин технологічними методами. *Зб. наук. праць ВДАУ: технічні науки*. Вінниця, 2010. Вип. 4. С. 66 – 68.
131. Єрємін П. М. Підвищення ефективності обробки отворів у деталях із чавунів комбінованим протягуванням : автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.03.01. ; КНТУ. Кіровоград. 2015. 20 с.
132. Barenblatt G. I. *Scaling*. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 171 p.
133. Baker W. E., Westine P. S., Dodge F. T. *Similarity methods in engineering dynamics: Theory and practice of scale modeling*. London : Elsevier Applied Science, 1991. 384 p.
134. Louda P., Marasanov V., Sharko A., Stepanchikov D., Sharko A. The theory of similarity and analysis of dimensions for determining the state of operation of structures under difficult loading conditions. *Materials*. 2022. Vol. 15. 1191 p. URL : <https://doi.org/10.3390/ma15031191>.
135. Fu W., Tang S., Wang D. Similarity design method and experimental study on torque transmission capacity of interference fit. *J Mech Sci Technol*. 2025. Vol. 39. P. 7661–7670. URL : <https://doi.org/10.1007/s12206-025-1126-0>.
136. Розенберг А. М., Розенберг О. А., Цеханов Ю. А., Немировский Я. Б., Кривошея В. В. К вопросу использования алмазов для изучения контактного взаимодействия инструмента с деталью при

- деформирующем протягивании. *Сверхтвердые материалы*. 1984. № 3. С. 39–43.
137. Немировський Я. Б. Наукові основи забезпечення точності при деформуючому протягуванні : дис. ... д. т. н. : 05.02.08. Київ. 2018. 423 с.
 138. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Chernovol M., Kyrychenko A., Vasylenko I. Deformation zone scheme clarification during deforming broaching. *Advances in design, simulation and manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture notes in mechanical engineering*. Cham: Springer, 2022. P. 324–333.
 139. Nemyrovskiy Y., Otamanskyi V., Melnyk O., Shepelenko I., Nochvai V. Stress-strain state during deforming broaching of plastic materials workpieces. *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer*. Cham. 2025. P. 545–556.
 140. 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.
 141. Tsekhanov Y. A., Sheikin S. E., Balaganskaya E. A. Theoretical calculation of the microroughness height during deforming broaching. *Superhard Materials*. 1998. Vol. 5. P. 32–37.
 142. 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.
 143. А. с. 1539050 СССР, МКИ В 24 В 39/02, В 23 Д 43/02. Способ деформирующего протягивания / Я. Б. Немировский, А. И. Геровский, В. В. Кривошея. № 4443763/31–27 ; заявл. 06.05.88 ; опубл. 30.01.90, Бюл. № 4. 3 с.

144. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів : монографія / Посвятенко Е. К., Немировський Я. Б., Чернявський О. В., Єрємін П. М. Кропивницький : Кіровогр. нац. техн. ун-т, 2017. 286 с.
145. 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.
146. Сервіс JCB. URL : <https://servicepro.jcb.com/login> (дата звернення: 22.12.2025).
147. ДСТУ EN 10216-1 :2016. Труби сталеві безшовні для роботи під тиском. Технічні умови постачання. Частина 1. Труби з нелегованих сталей з нормованими властивостями за кімнатної температури. Чинний від 2017-10-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 18 с. (Національний стандарт України).
148. Динаміка ринку екскаваторів 2022-2025, ціни та попит. URL : <https://machineryline.ua/blog/dynamika-rynku-ekskavatoriv-2022-2025-tsiny-ta-popyt/> (дата звернення: 23.12.2025).
149. Еволюція та революція: історія успіху JCB. URL : <https://traktorist.ua/articles/334-evolyutsiya-ta-revolyuetsiya-istoriya-uspihu-jcb> (дата звернення: 23.12.2025).
150. Machineryline – інтернет-майданчик з продажу будівельної техніки, промислового обладнання, складської техніки і запчастин. URL : <https://machineryline.ua/-/ekskavatori-navantazhuvachi/JCB--c165tm2618> (дата звернення: 23.12.2025).
151. Service Manual 3CX, 4CX, 214e, 214, 215, 217 & Variants. Published by the technical publications department of JBC service : England : No. 9803/3280 Issue 4.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Акт про апробацію результатів наукового дослідження на підприємстві

АКТ

про апробацію результатів наукового дослідження

Отаманського Валентина Владиславовича

Дана довідка засвідчує, що науково-практичні результати дисертаційного дослідження старшого викладача кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Отаманського Валентина Владиславовича на тему: «Технологічне забезпечення розмірних параметрів циліндричних виробів деформуючим протягуванням», апробовано та рекомендовано для впровадження, оскільки становлять практичний інтерес для інженерно-технічних працівників, які займаються процесами механічної обробки на «Пак-Трейд» (ФОП Томчук А. М.).

На основі науково-практичних результатів дисертаційного дослідження Отаманського Валентина Владиславовича розроблено рекомендації щодо умов застосування деформуючого протягування при виготовленні нових деталей типу втулок з каталожними номерами 809/00126, 809/00127, 809/00128, що дає змогу скоротити металоємність заготовок до 30%. Також надано рекомендації щодо застосування деформуючого протягування при відновленні працездатності зношених деталей типу втулок.

Цей документ не є підставою для подальших взаємних фінансових розрахунків.

Директор



Томчук А.М.

ДОДАТОК Б

Довідка про впровадження результатів в освітній процес Державного
університету «Житомирська політехніка»



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

Phone/fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015
QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015

Від 25.02.2026 № 44-06.01/236
На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукового дослідження Отаманського Валентина
Владиславовича в сфері механічної обробки матеріалів у машинобудуванні в
освітній процес Державного університету «Житомирська політехніка»

Засвідчую, що науково-практичні результати дисертаційного дослідження старшого викладача кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Отаманського В.В. на тему: «Технологічне забезпечення розмірних параметрів циліндричних виробів деформуючим протягуванням» використовуються в освітньому процесі Державного університету «Житомирська політехніка» при підготовці фахівців за освітнім ступенем «бакалавр» зі спеціальності 274 «Автомобільний транспорт», «магістр» зі спеціальності G9 «Прикладна механіка», а також за освітнім ступенем «доктор філософії» зі спеціальності 131 «Прикладна механіка».

Зокрема, науково-практичні результати даного дисертаційного дослідження впроваджені в структуру та зміст таких навчальних дисциплін як: «Технологія виробництва та ремонту автомобілів», «Технологічні методи забезпечення надійності» та «Чисельне моделювання процесів механічної обробки різання».

Висновки, наведені в дисертації, сприяють удосконаленню освітнього процесу та підвищенню якості підготовки фахівців машинобудівного профілю в частині засвоєння ними аспектів використання деформуючого протягування при відновленні зношених циліндричних виробів, а також чисельного моделювання процесу деформуючого протягування.

Використання в навчальному процесі результатів дисертаційного дослідження Отаманського В.В. свідчить про їх завершеність, ґрунтовність та цінність для впровадження в освітній процес закладів вищої освіти.

Довідка видана для представлення до Спеціалізованої вченої ради.

Проректор з науково-педагогічної
роботи та інноваційного розвитку



Димитрій ГРИЦИШЕН

Патент



(11) 161508

(19) UA

(51) МПК (2025.01)
B23D 43/00

(21) Номер заявки:	u 2025 02990	(72) Винахідники:
(22) Дата подання заявки:	20.06.2025	Немировський Яків
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	11.12.2025	Борисович, UA, Шепеленко Ігор Віталійович, UA, Отаманський Валентин Владиславович, UA, Мельник Олександр Леонідович, UA, Сторчак Михайло Григорович, UA, Василів Тарас Іванович, UA, Шумляківський Володимир Петрович, UA
(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня:	10.12.2025, Бюл. № 50	(73) Володілець: ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА", вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005, UA

(54) Назва корисної моделі:

ЗБІРНА ДЕФОРМУЮЧА ПРОТЯЖКА

(57) Формула корисної моделі:

1. Збірна деформуюча протяжка, що містить стержень, на якому послідовно розміщені групи із двох деформуючих елементів, яка **відрізняється** тим, що діаметр першого елемента першої групи перевищує діаметр вихідного отвору заготовки на величину a_1 , діаметр другого елемента першої групи перевищує діаметр першого елемента групи на величину a_2 , діаметр першого деформуючого елемента другої групи перевищує діаметр другого елемента першої групи на величину a_3 , діаметр другого елемента другої групи перевищує діаметр першого елемента другої групи на величину a_4 .

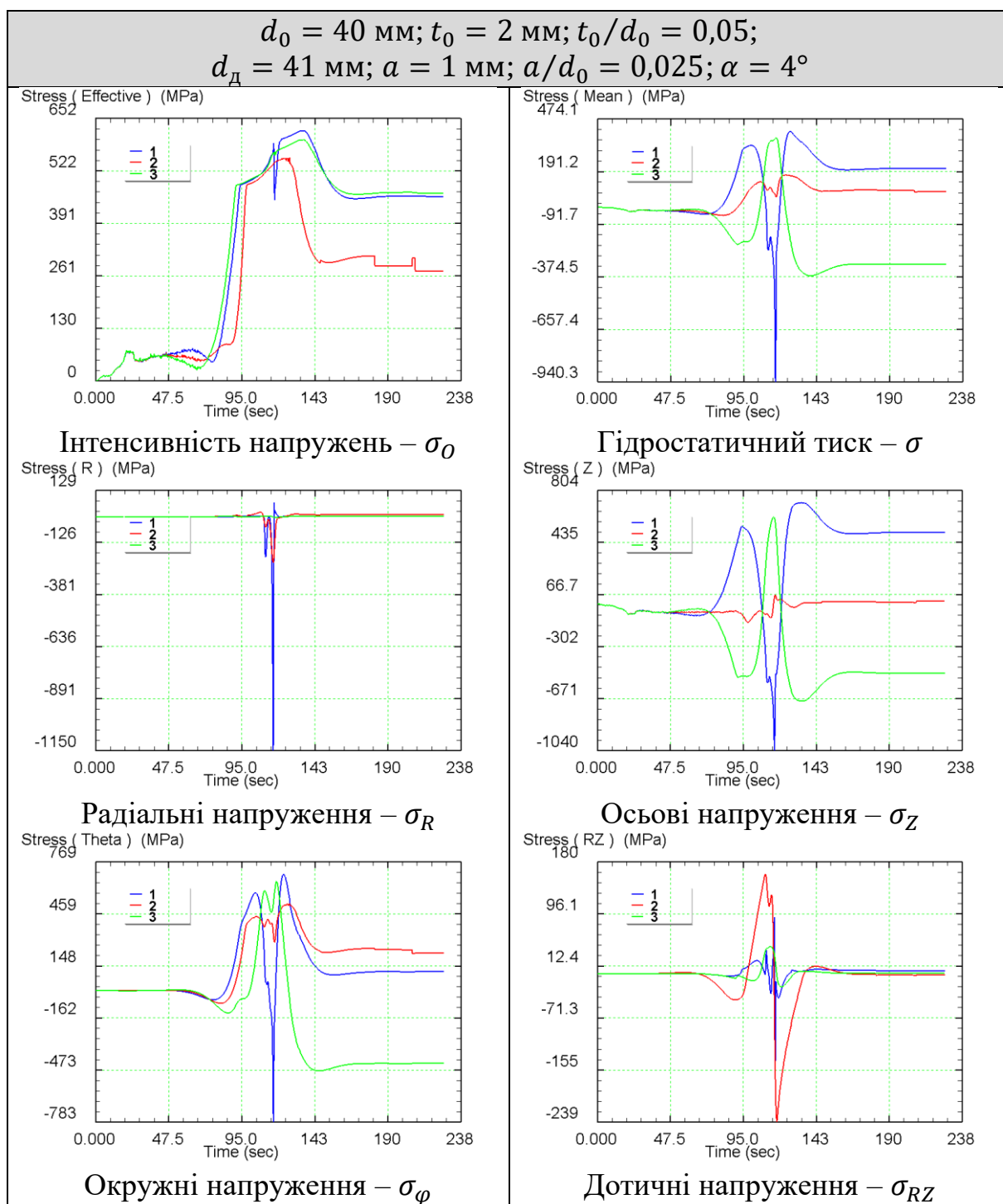
2. Збірна деформуюча протяжка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що величини натягів a_1 , які визначають різницю діаметра першого елемента першої групи та вихідного діаметра отвору заготовки, поділеною на вихідний діаметр отвору заготовки та a_2 , який визначають різницю діаметра другого елемента першої групи та діаметра першого елемента першої групи, поділеною на вихідний діаметр отвору заготовки, знаходяться в межах від 0,0375 до 0,05, а величини натягів a_3 , які визначають різницю діаметра першого елемента другої групи та діаметра другого елемента першої групи, поділеною на вихідний діаметр отвору заготовки та a_4 , який визначають різницю діаметра другого елемента другої групи та діаметра першого елемента другої групи, поділеною на вихідний діаметр отвору заготовки - в межах від 0,006 до 0,0125.

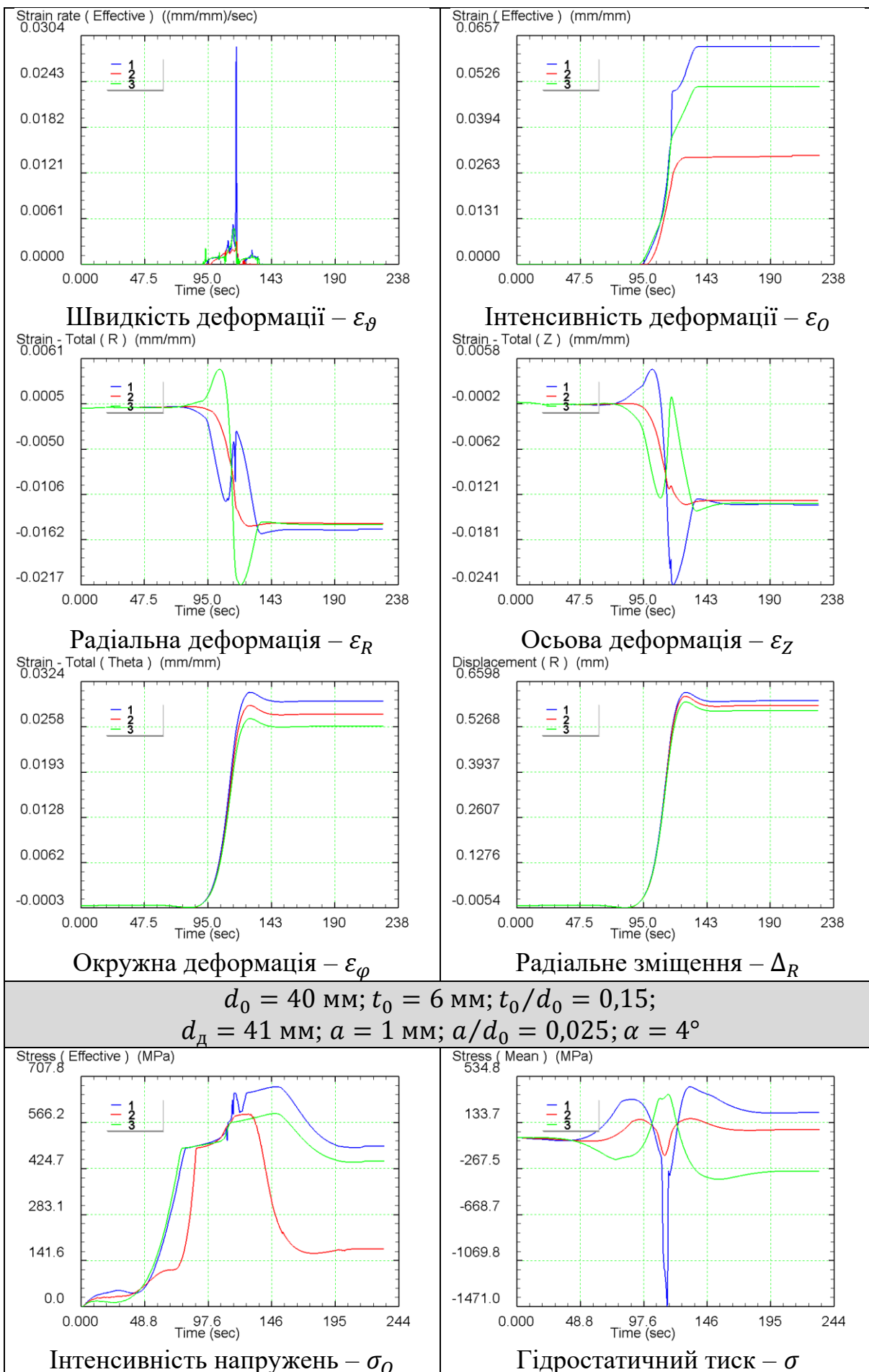
(11) **161508**

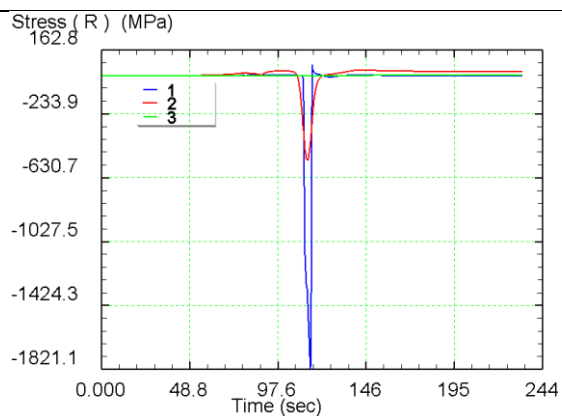
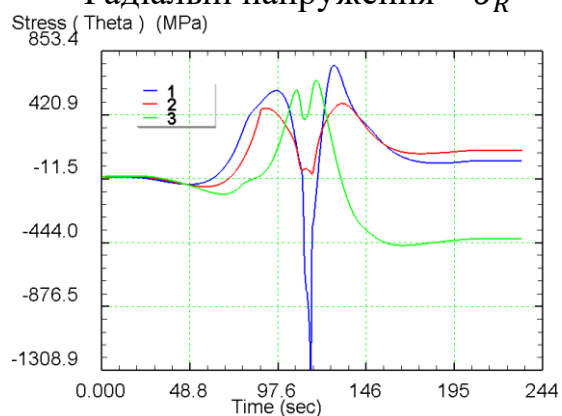
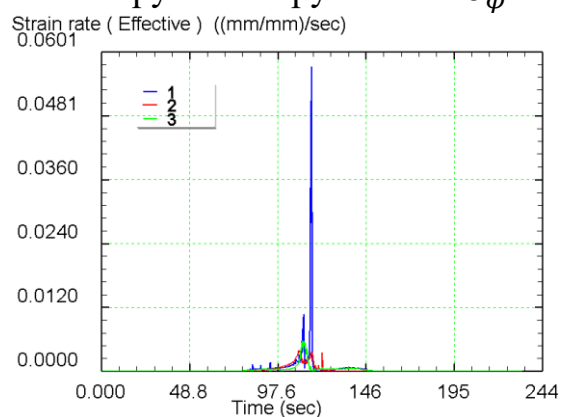
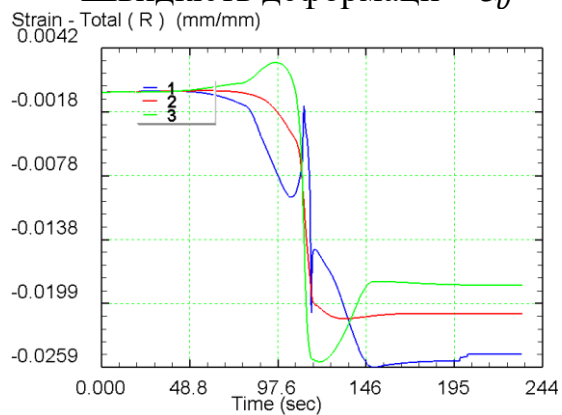
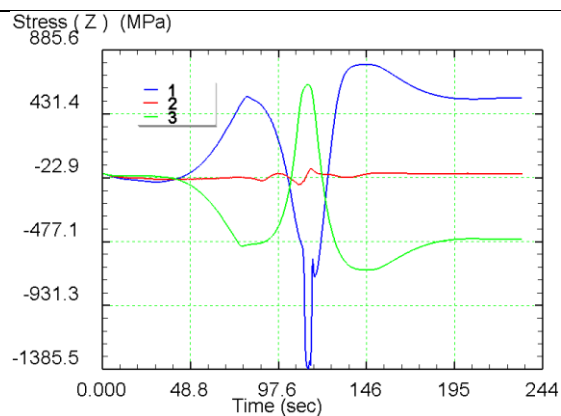
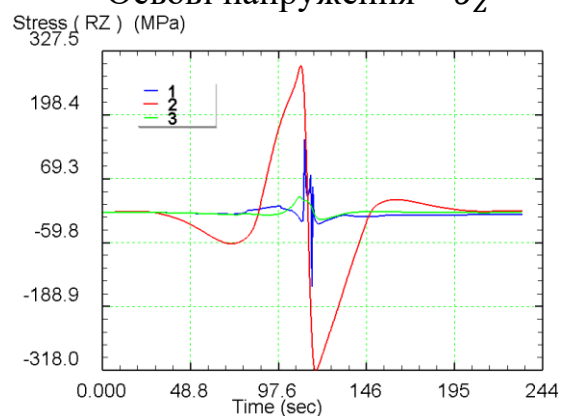
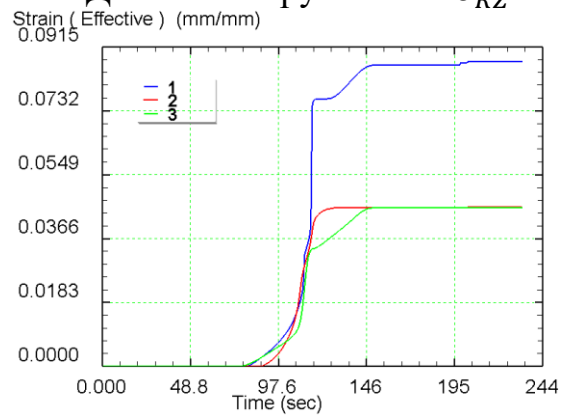
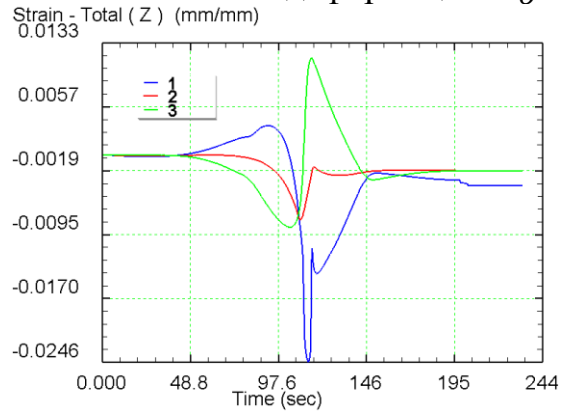
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» (УКРНОІВІ)
Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами. Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 1511101225 необхідно: 1. Перейти за посиланням https://sis.nipo.gov.ua. 2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу. 3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документу та натиснути «Завантажити». Уповноважена особа УКРНОІВІ   І.Є. Матусевич 10.12.2025

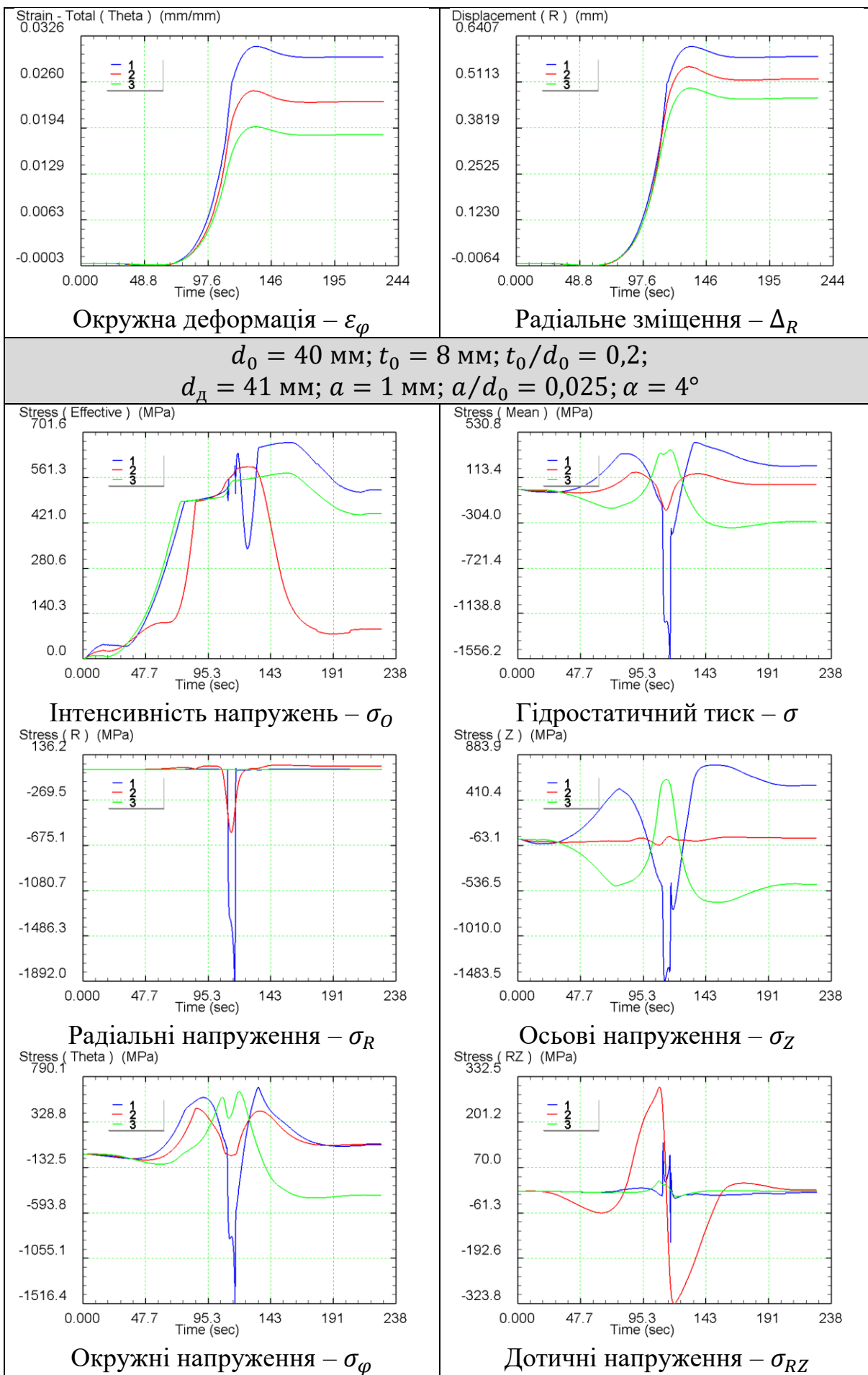
ДОДАТОК Г

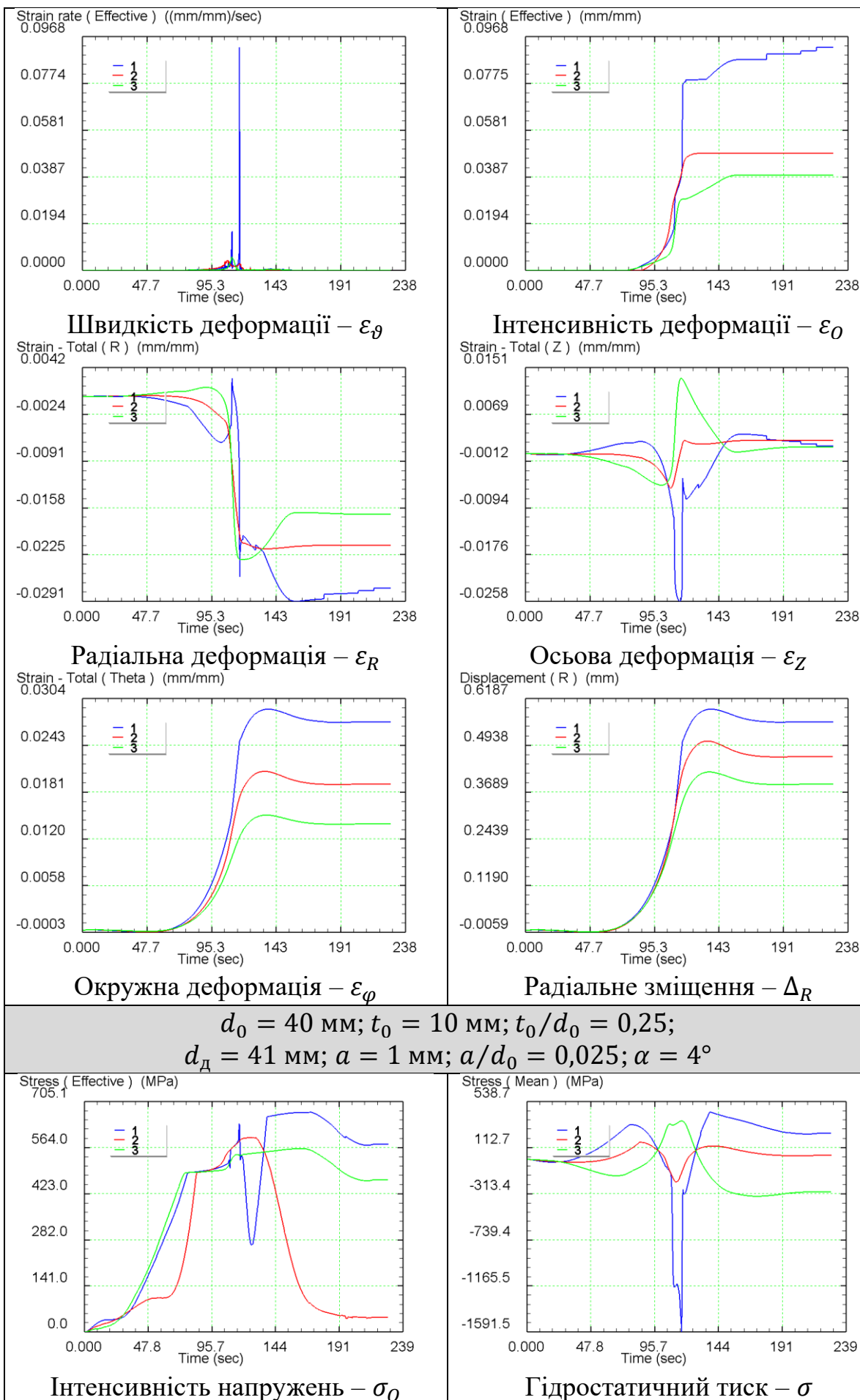
Результати моделювання напружено-деформованого стану при деформуючому протягуванні одним деформуючим елементом

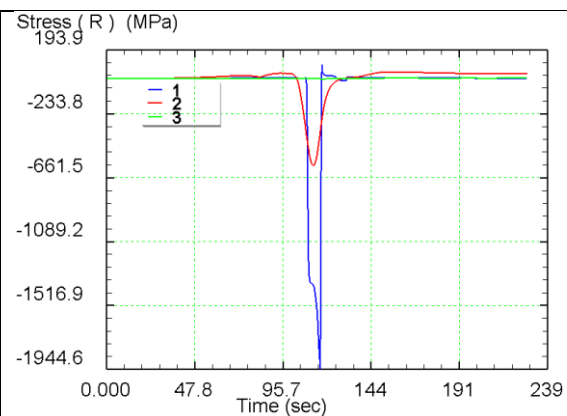
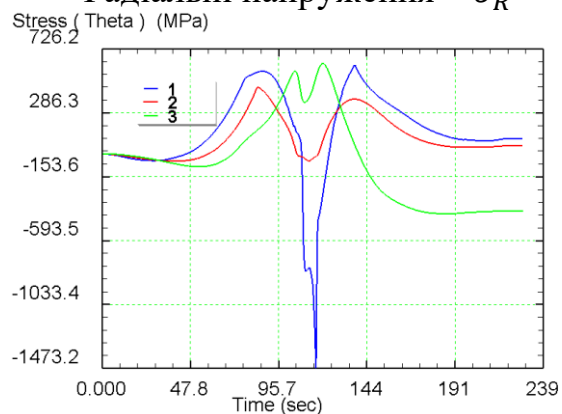
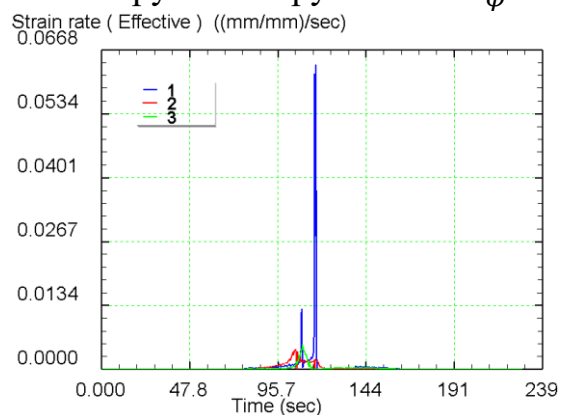
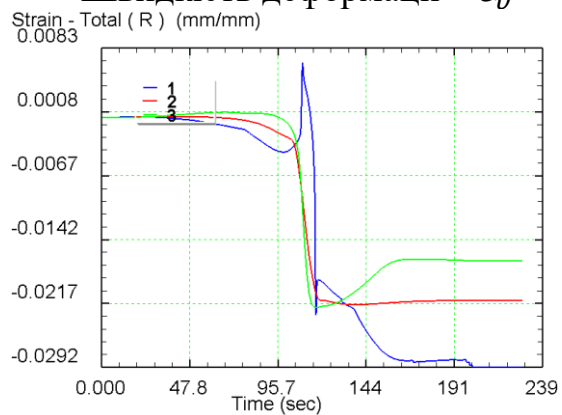
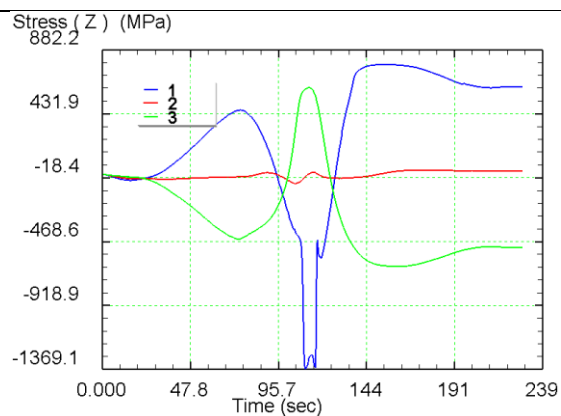
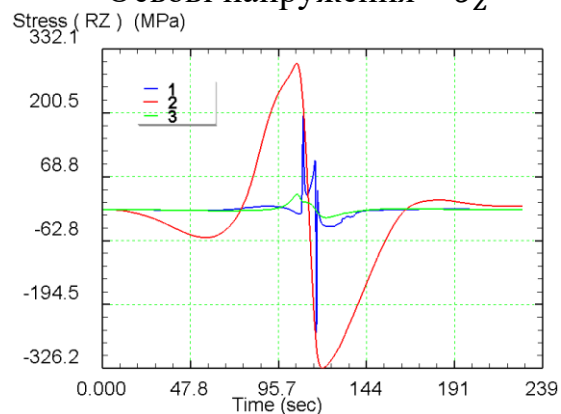
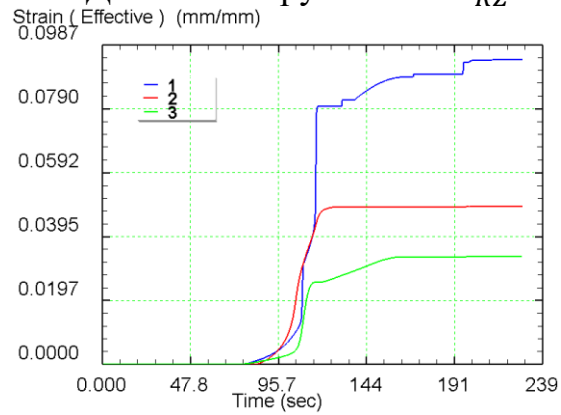
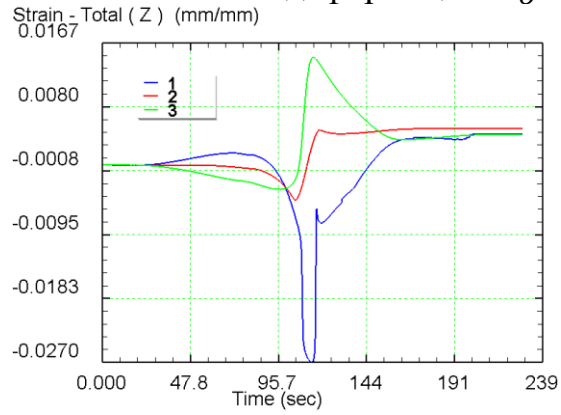


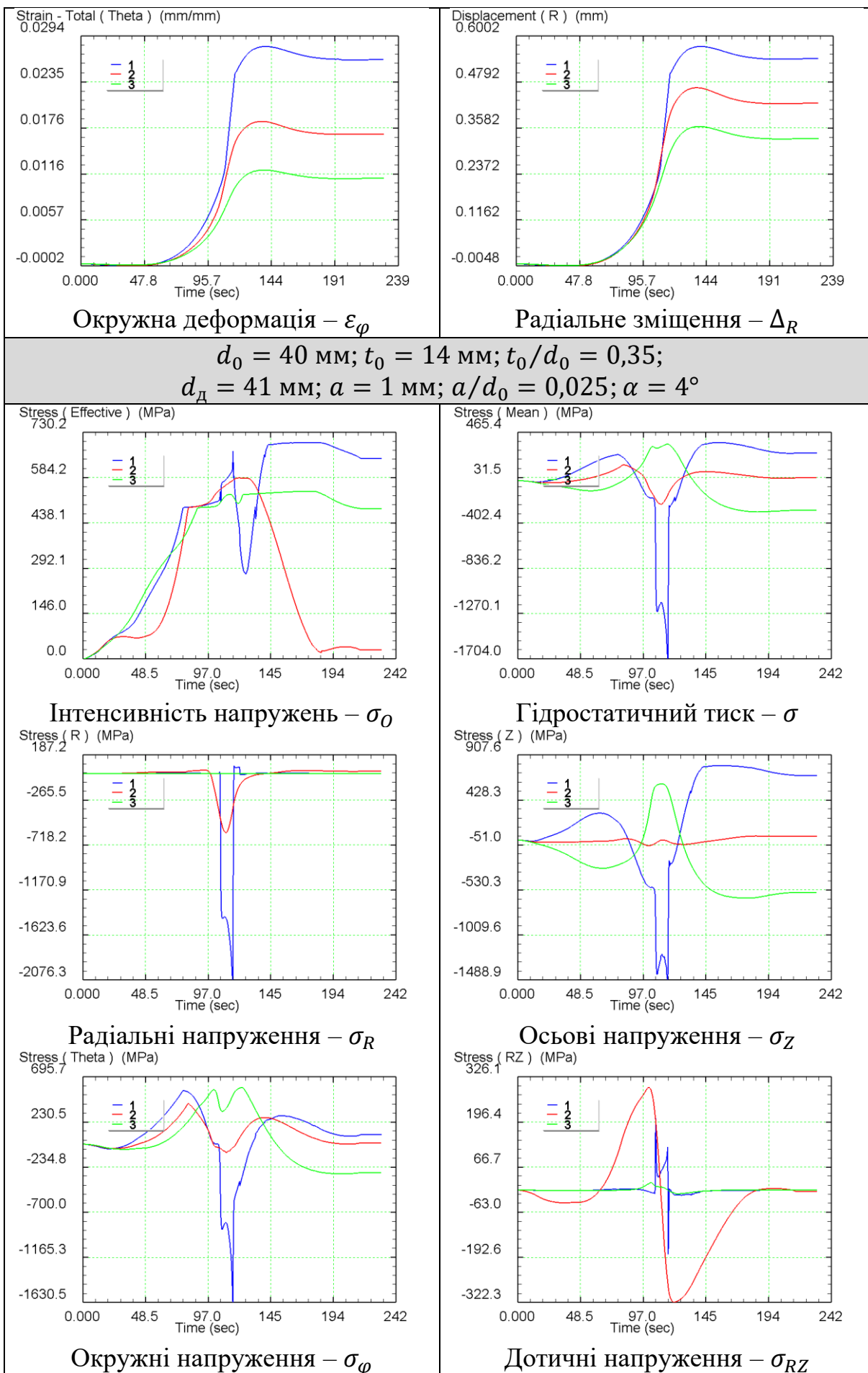


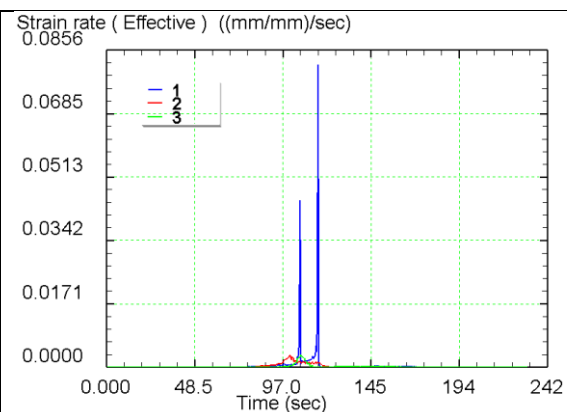
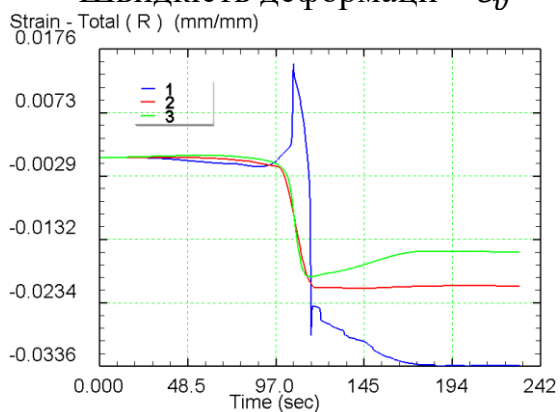
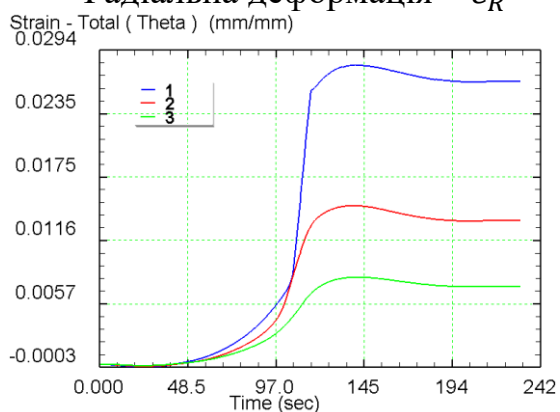
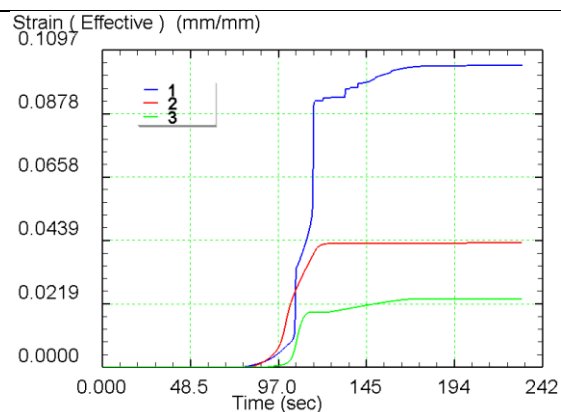
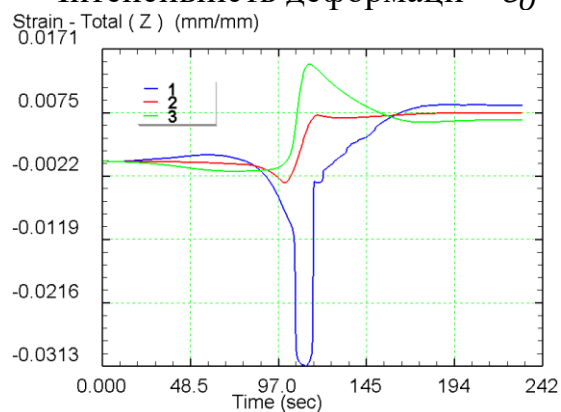
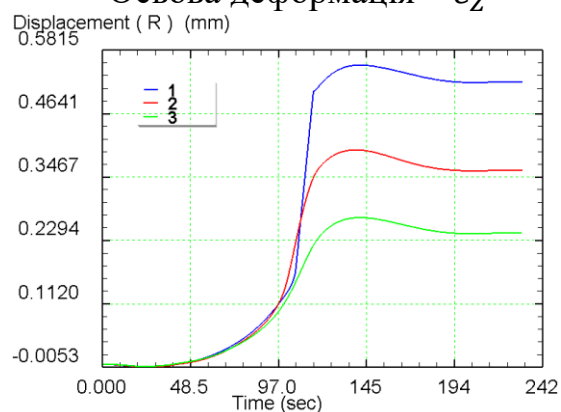
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\phi$ Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_O Осьова деформація – ϵ_Z





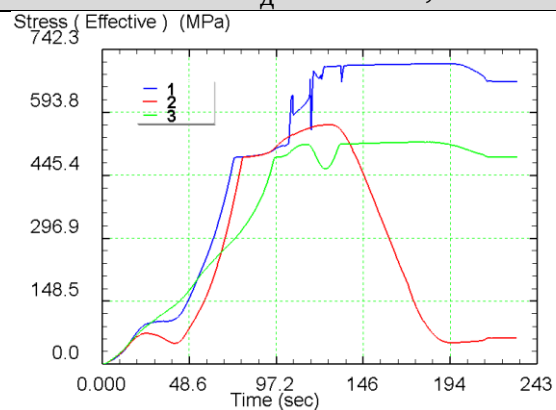
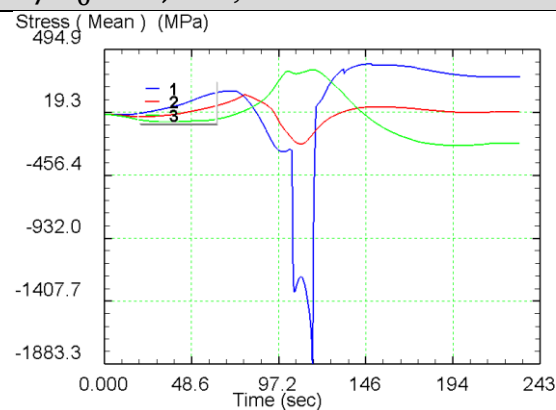
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – ϵ_d Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_0 Осьова деформація – ϵ_Z

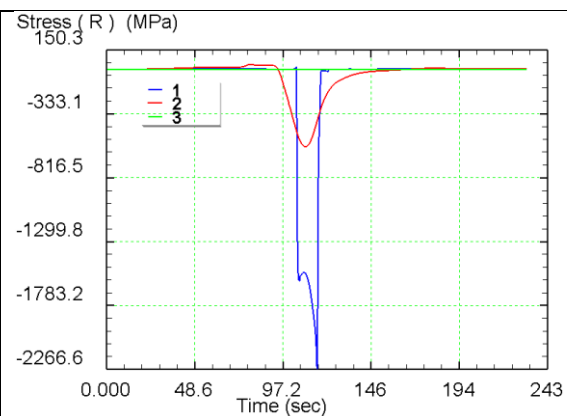
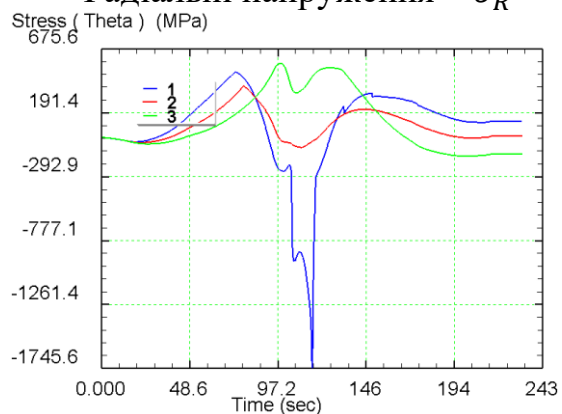
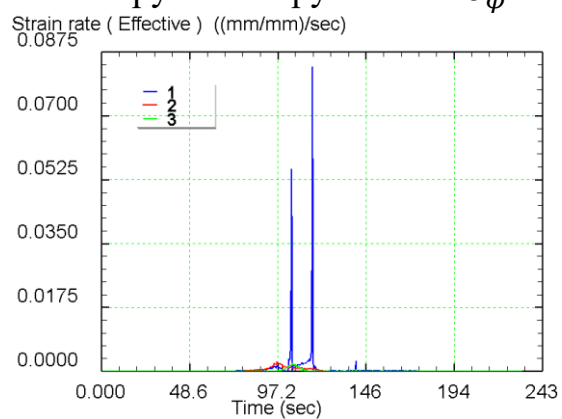
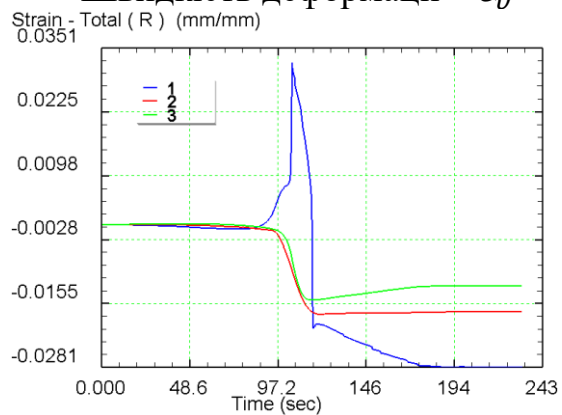
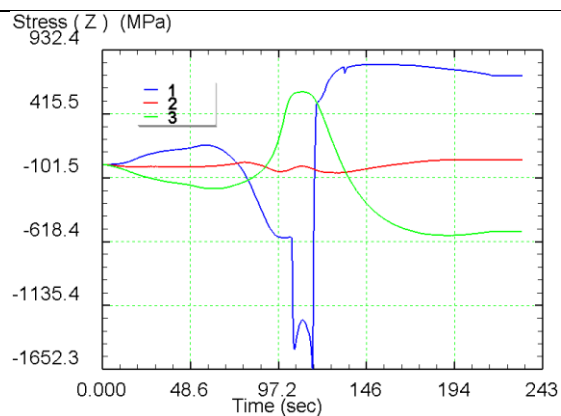
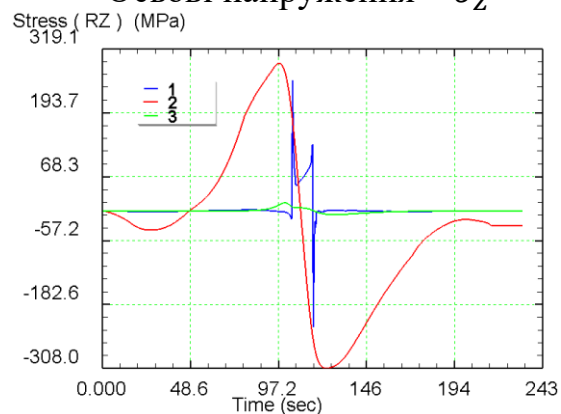
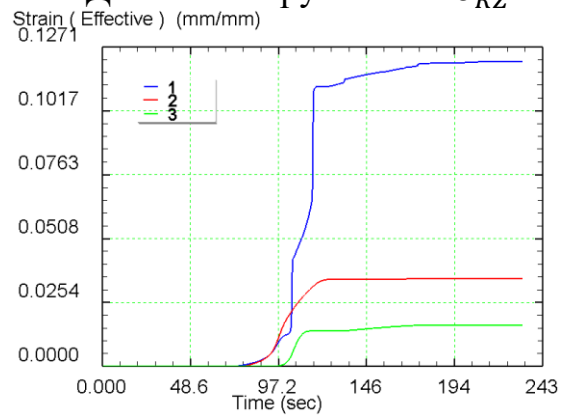
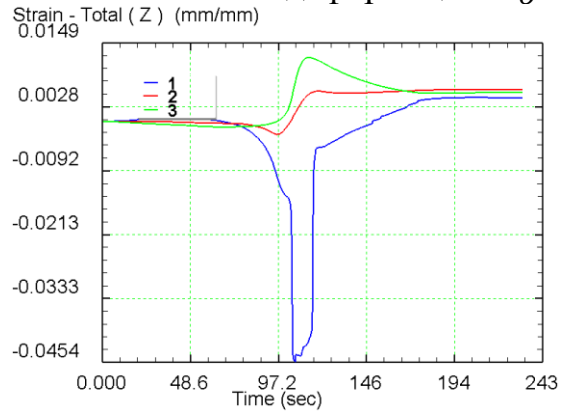


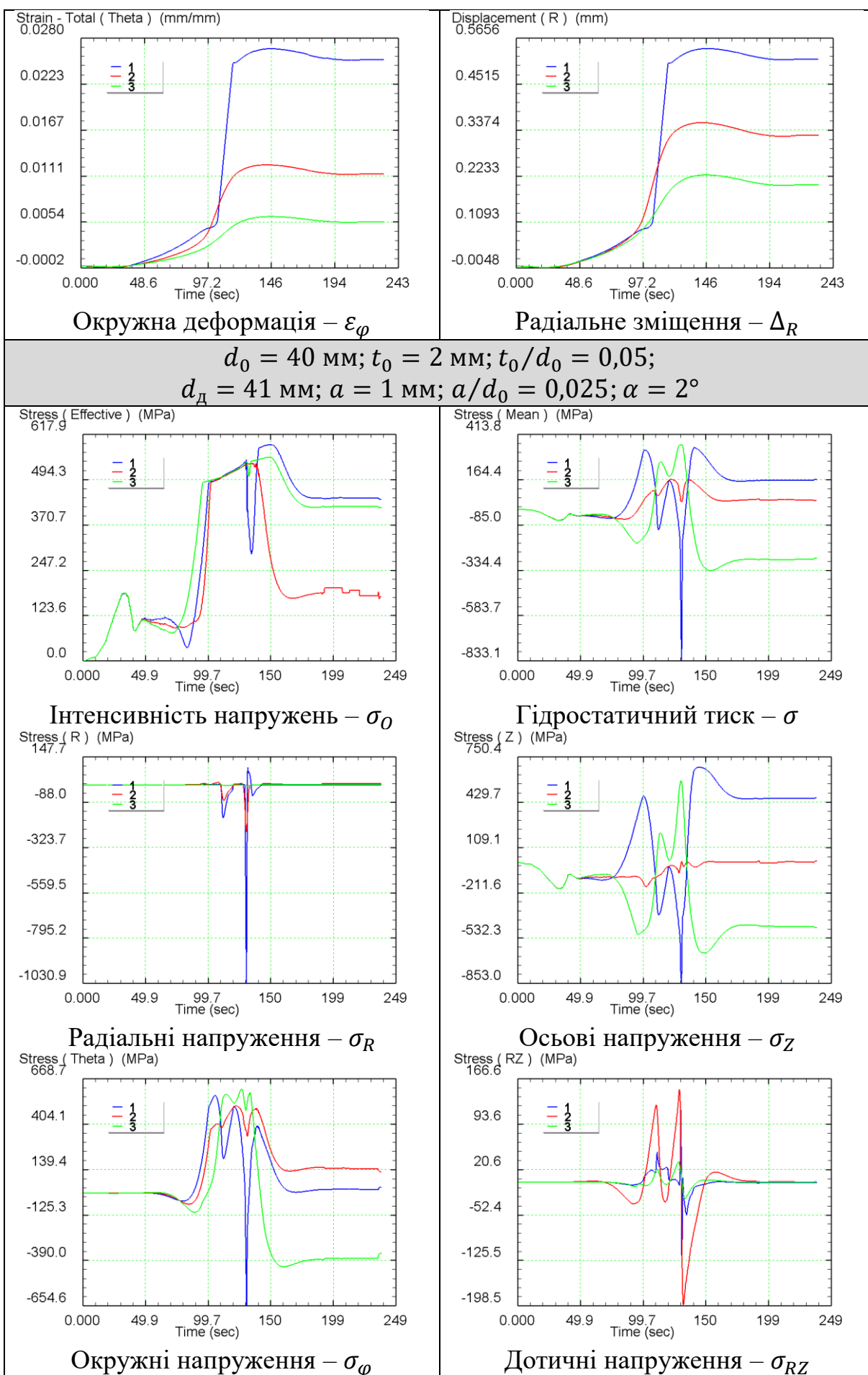
Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\vartheta$ Радіальна деформація – ϵ_R Окружна деформація – ϵ_φ Інтенсивність деформації – ϵ_O Осьова деформація – ϵ_Z Радіальне зміщення – Δ_R

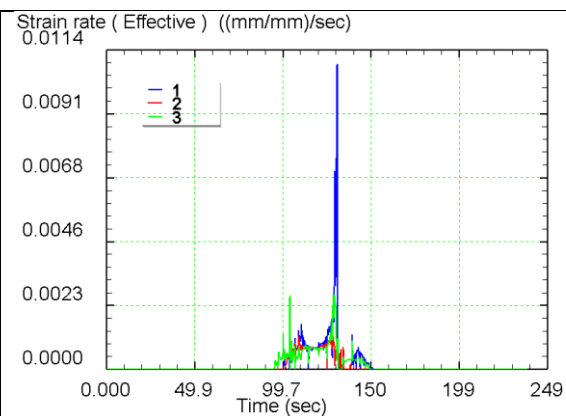
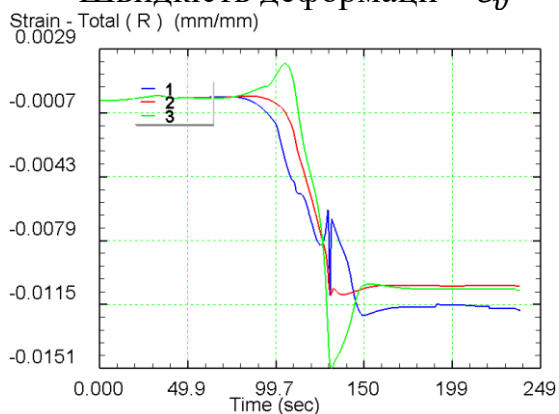
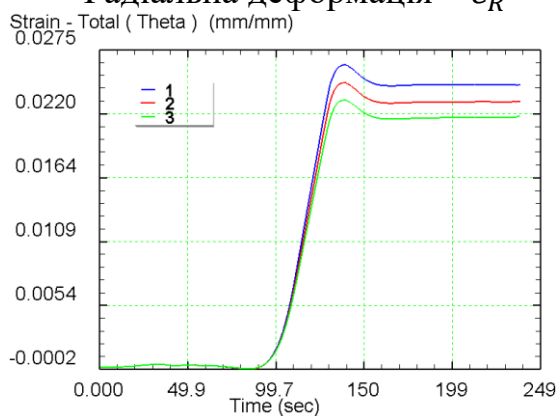
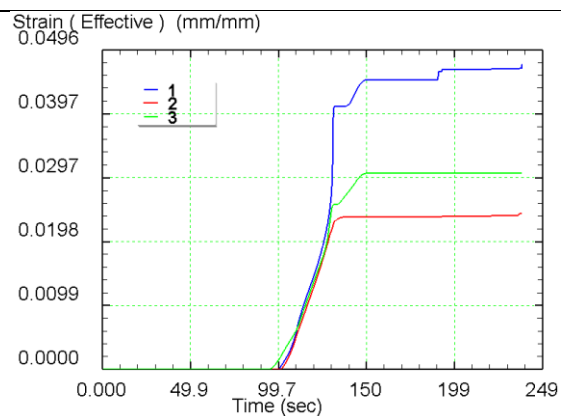
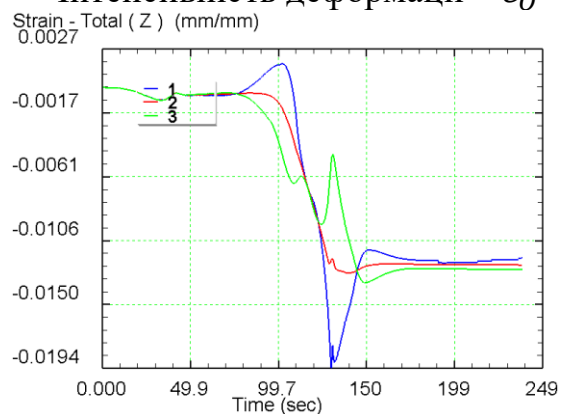
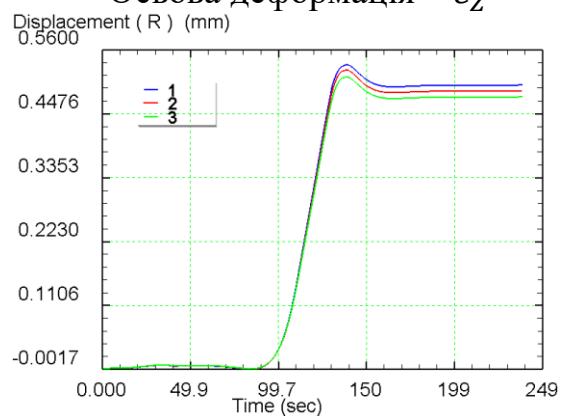
$$d_0 = 40 \text{ мм}; t_0 = 18 \text{ мм}; t_0/d_0 = 0,45;$$

$$d_d = 41 \text{ мм}; a = 1 \text{ мм}; a/d_0 = 0,025; \alpha = 4^\circ$$

Інтенсивність напружень – σ_O Гідростатичний тиск – σ

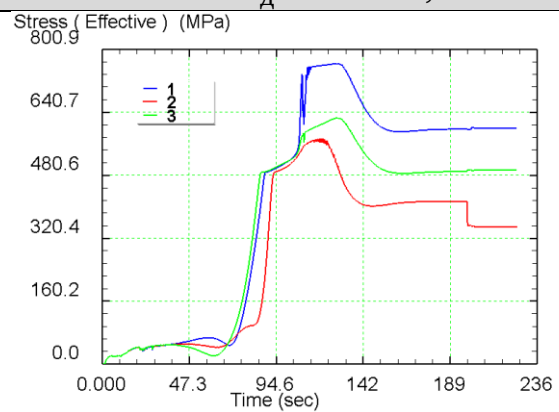
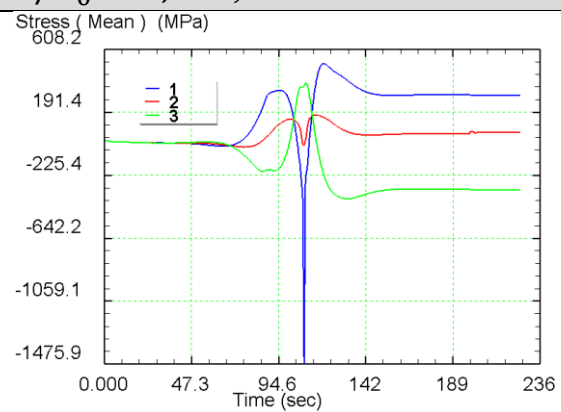
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – ϵ_d Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_0 Осьова деформація – ϵ_Z

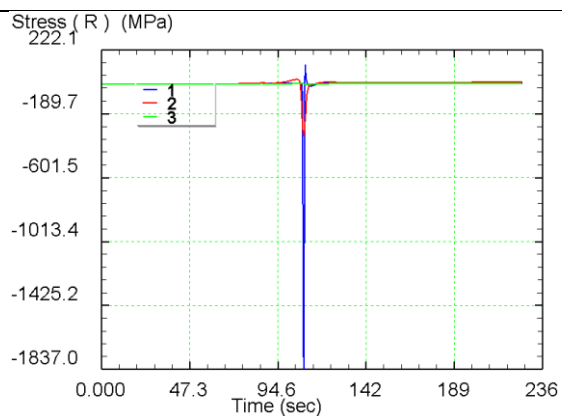
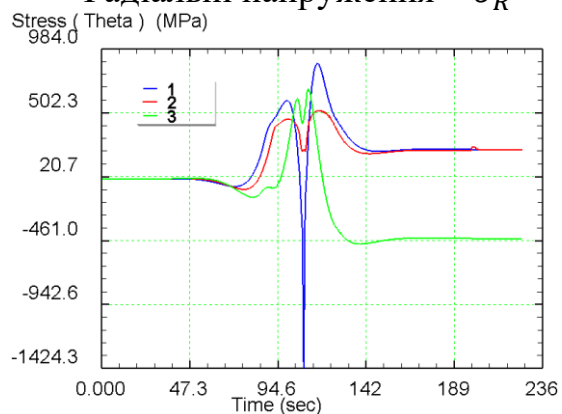
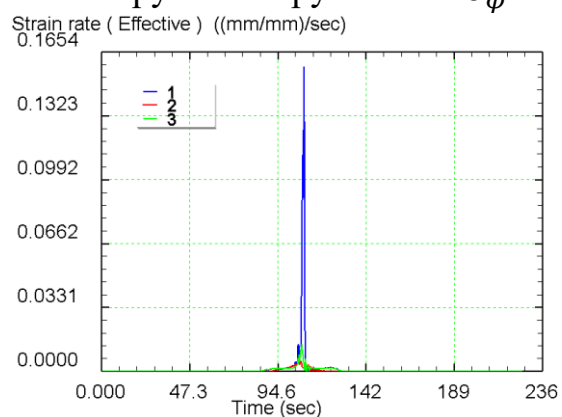
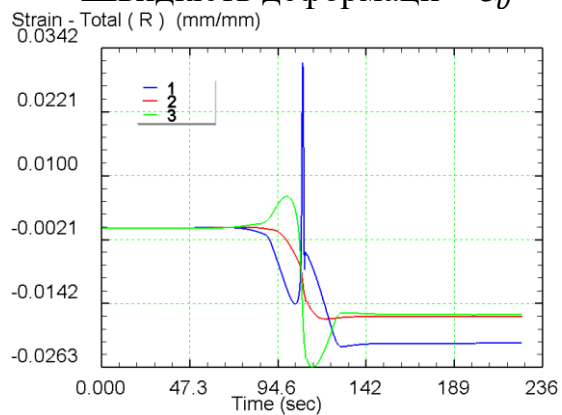
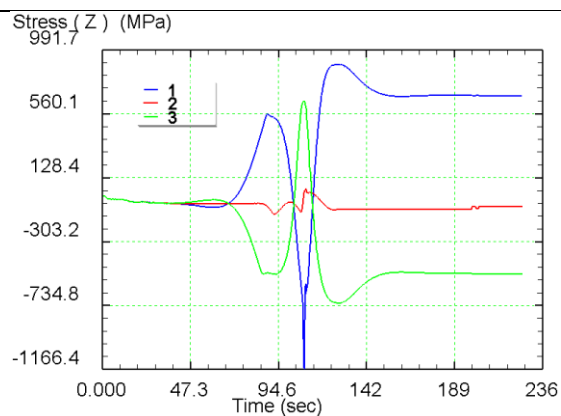
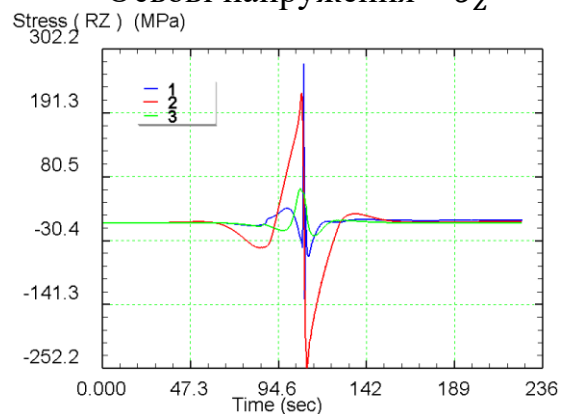
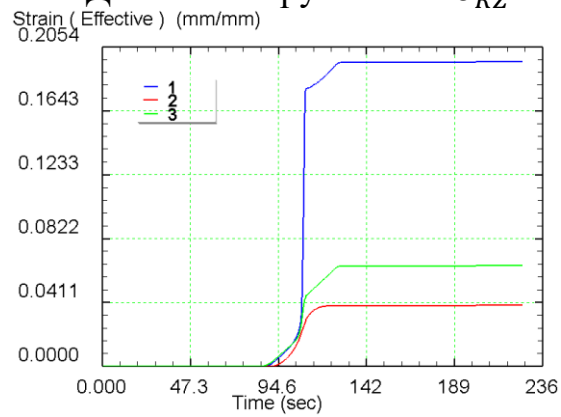
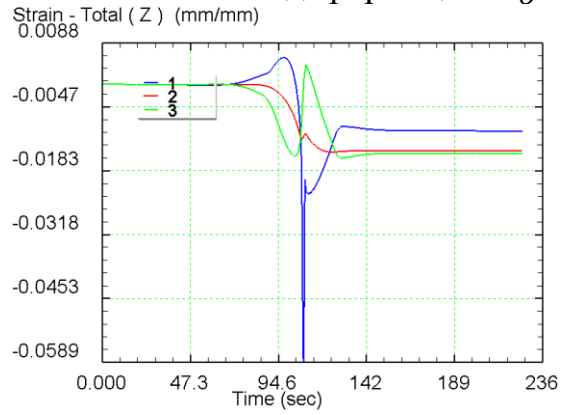


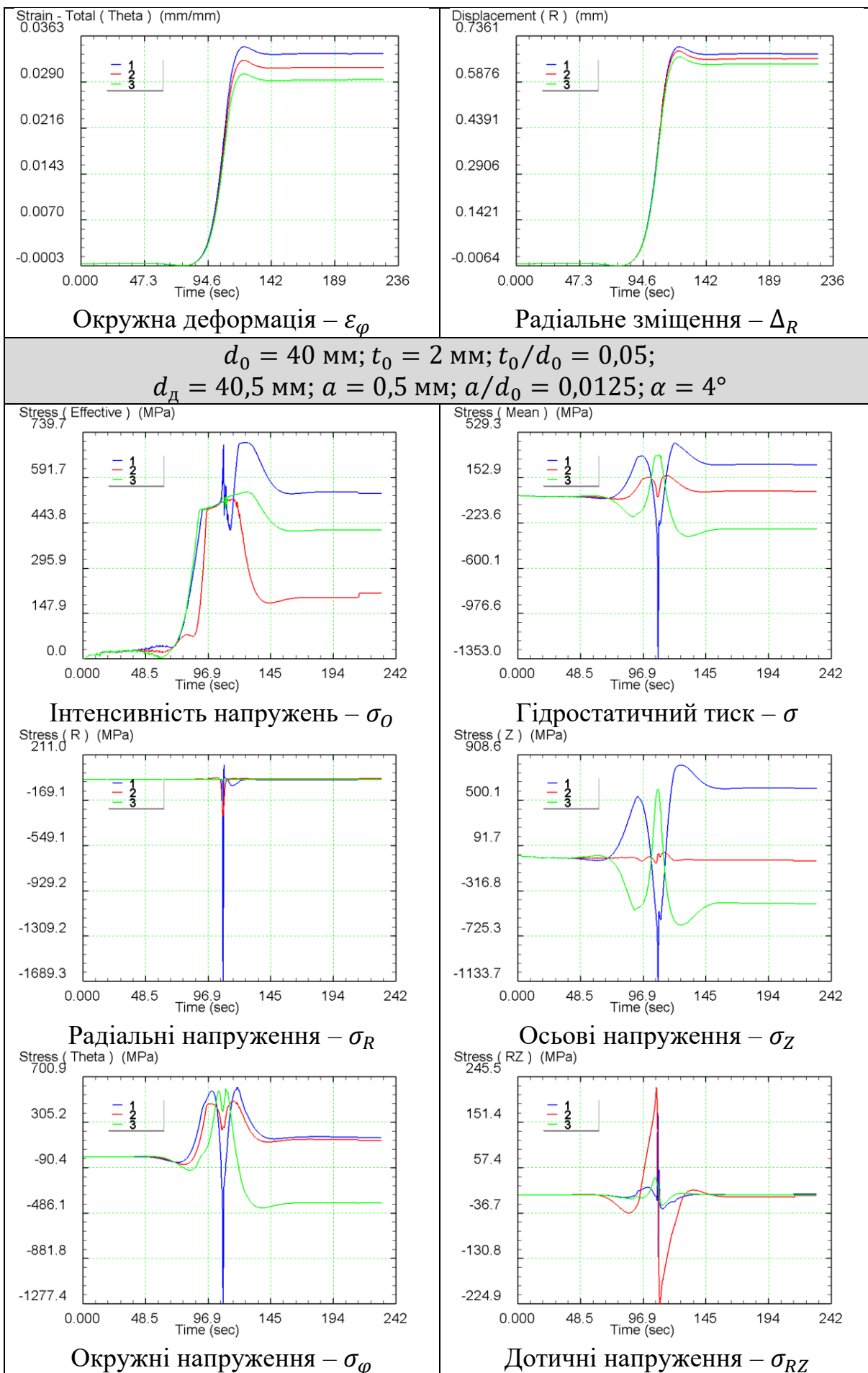
Швидкість деформації – $\varepsilon_{\dot{\varphi}}$ Радіальна деформація – ε_R Окружна деформація – ε_{φ} Інтенсивність деформації – ε_O Осьова деформація – ε_Z Радіальне зміщення – Δ_R

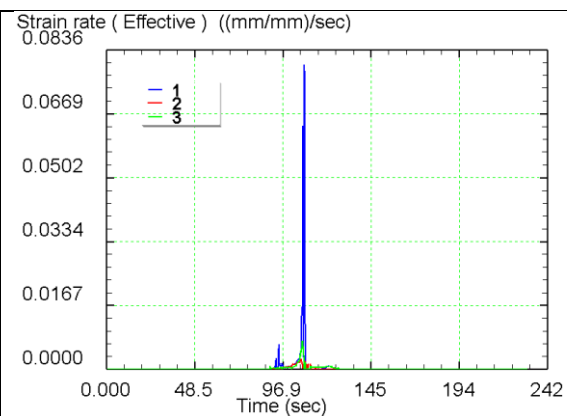
$$d_0 = 40 \text{ мм}; t_0 = 2 \text{ мм}; t_0/d_0 = 0,05;$$

$$d_d = 41 \text{ мм}; a = 1 \text{ мм}; a/d_0 = 0,025; \alpha = 8^\circ$$

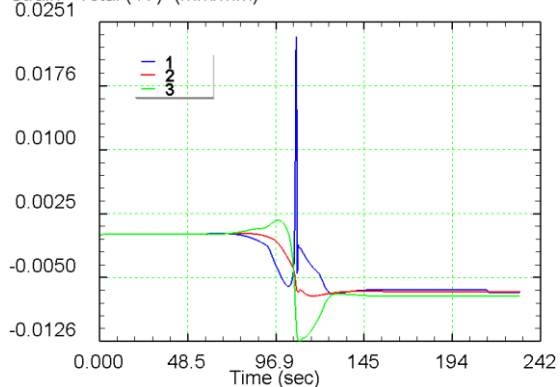
Інтенсивність напружень – σ_O Гідростатичний тиск – σ

Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – ε_d Радіальна деформація – ε_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ε_0 Осьова деформація – ε_Z

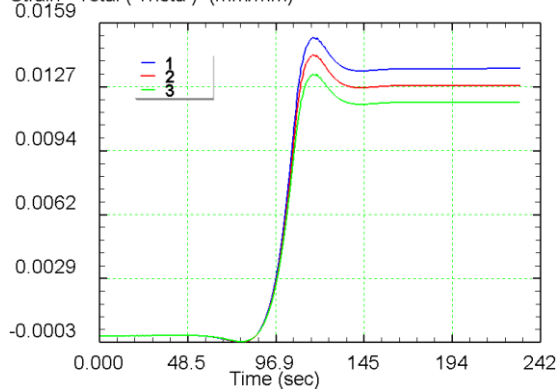
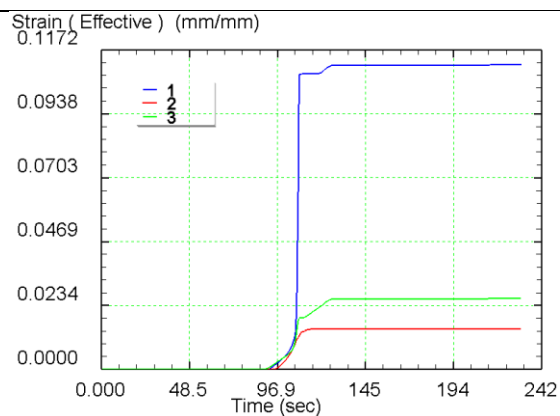


Швидкість деформації – $\varepsilon_{\dot{\varphi}}$

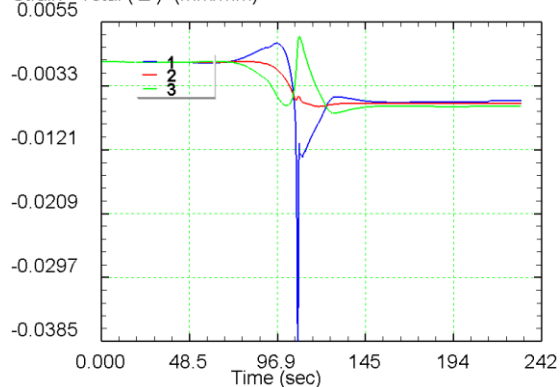
Strain - Total (R) (mm/mm)

Радіальна деформація – ε_R

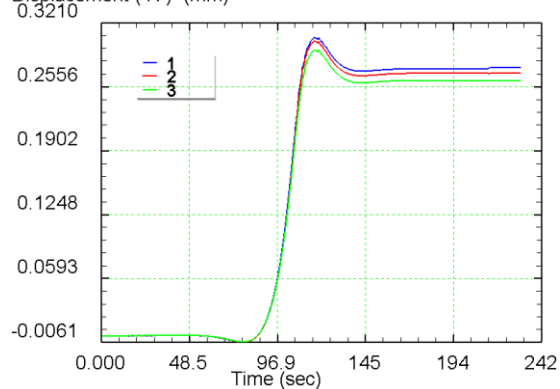
Strain - Total (Theta) (mm/mm)

Окружна деформація – ε_{φ} Інтенсивність деформації – ε_O

Strain - Total (Z) (mm/mm)

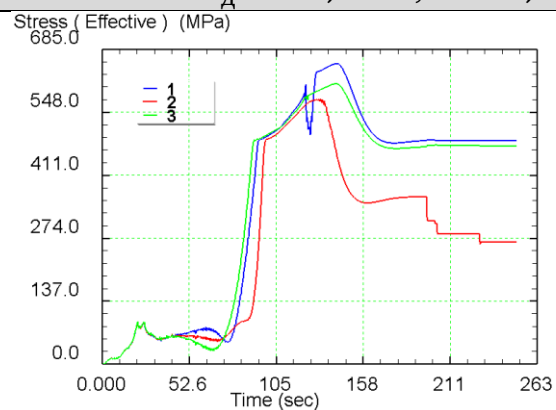
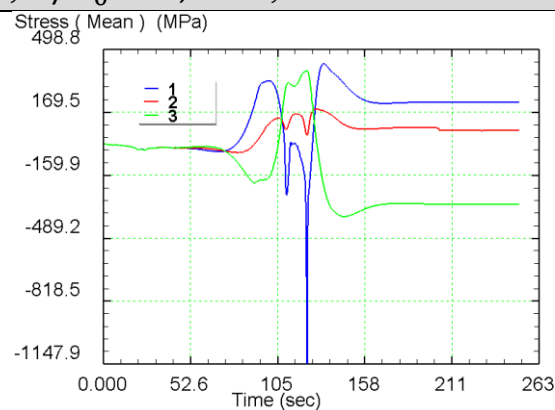
Осьова деформація – ε_Z

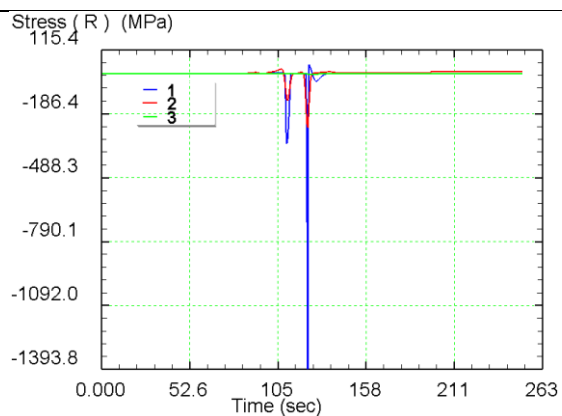
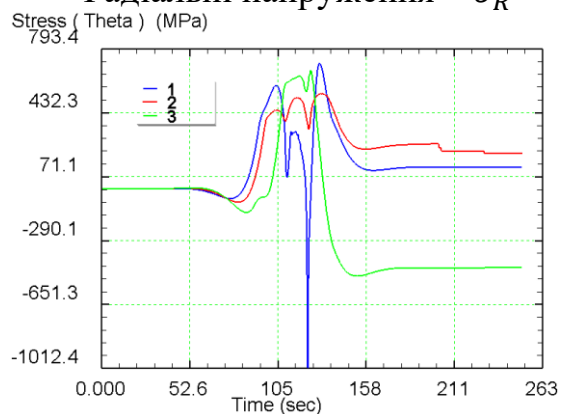
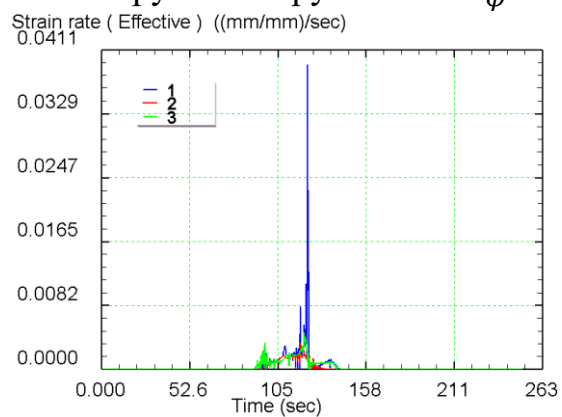
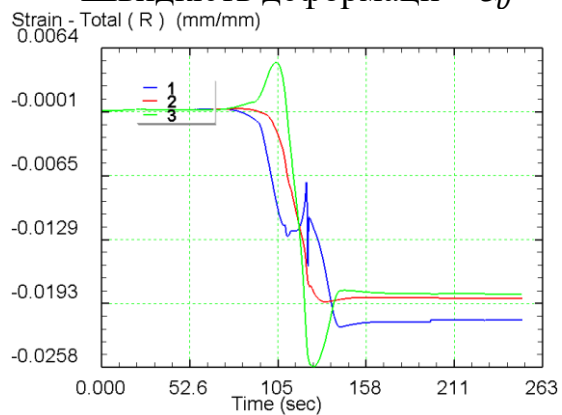
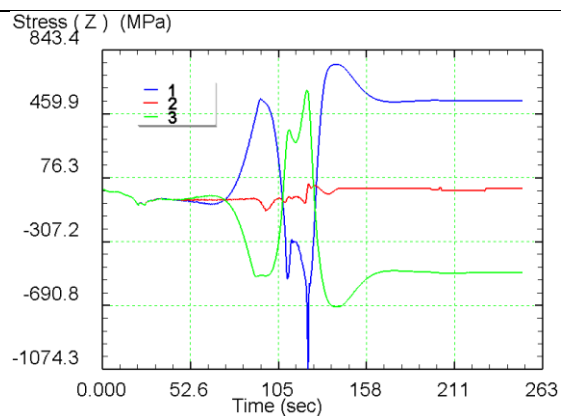
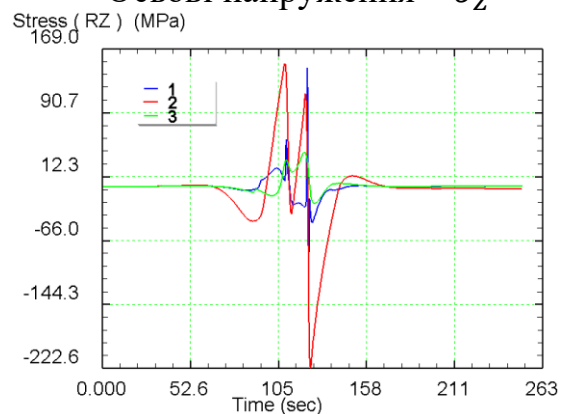
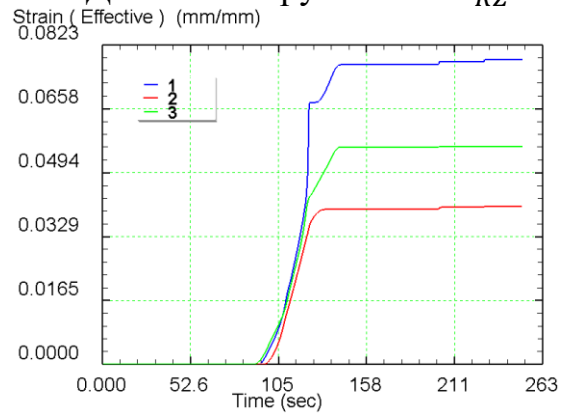
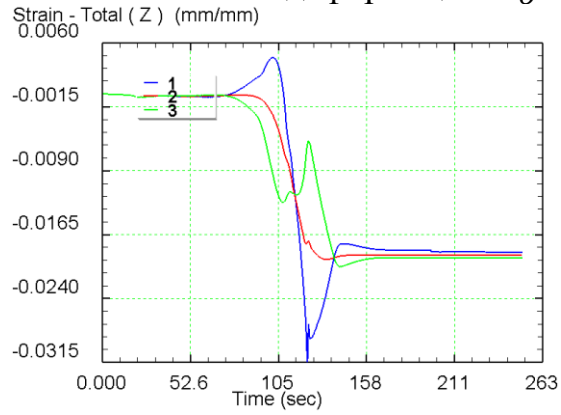
Displacement (R) (mm)

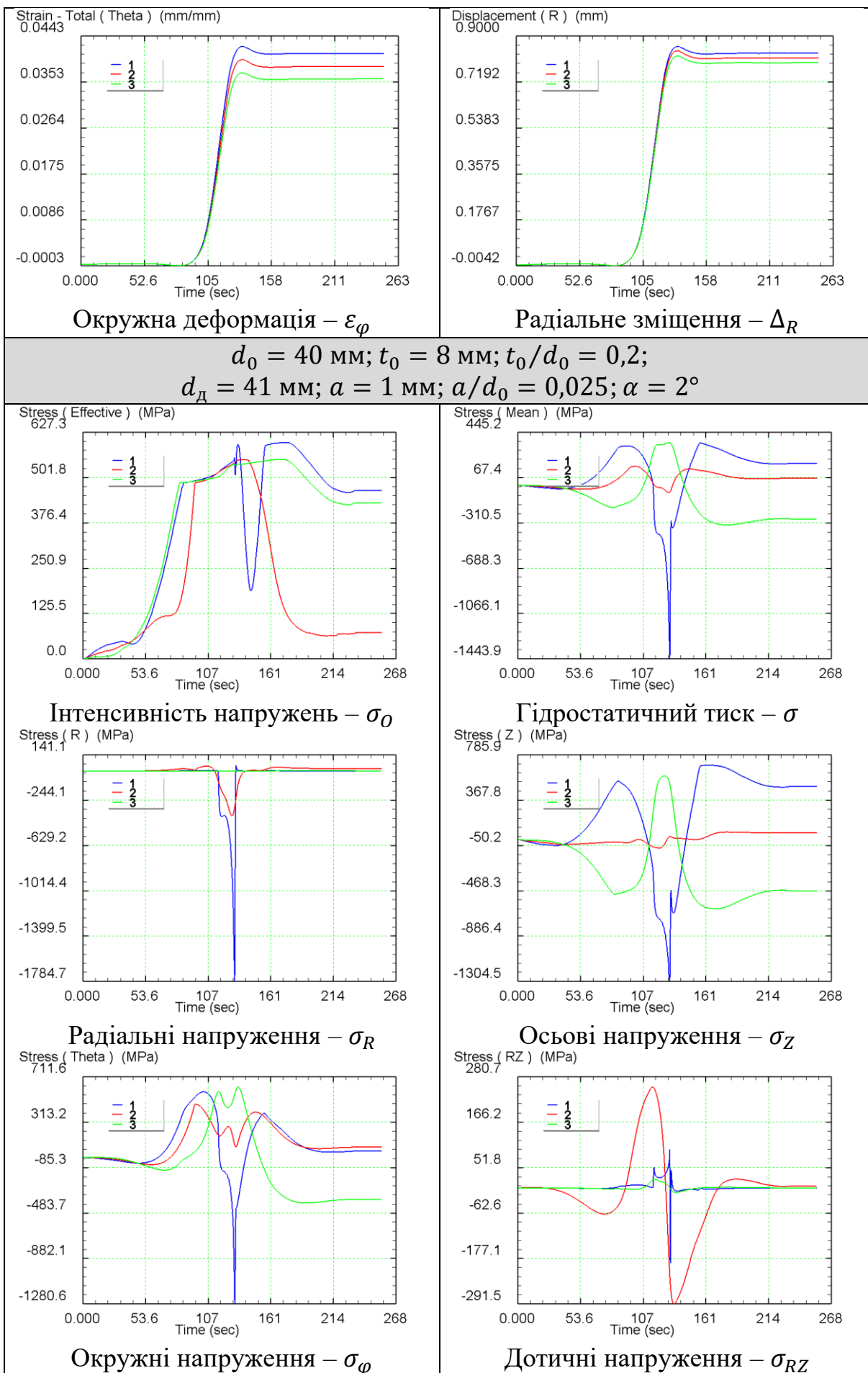
Радіальне зміщення – Δ_R

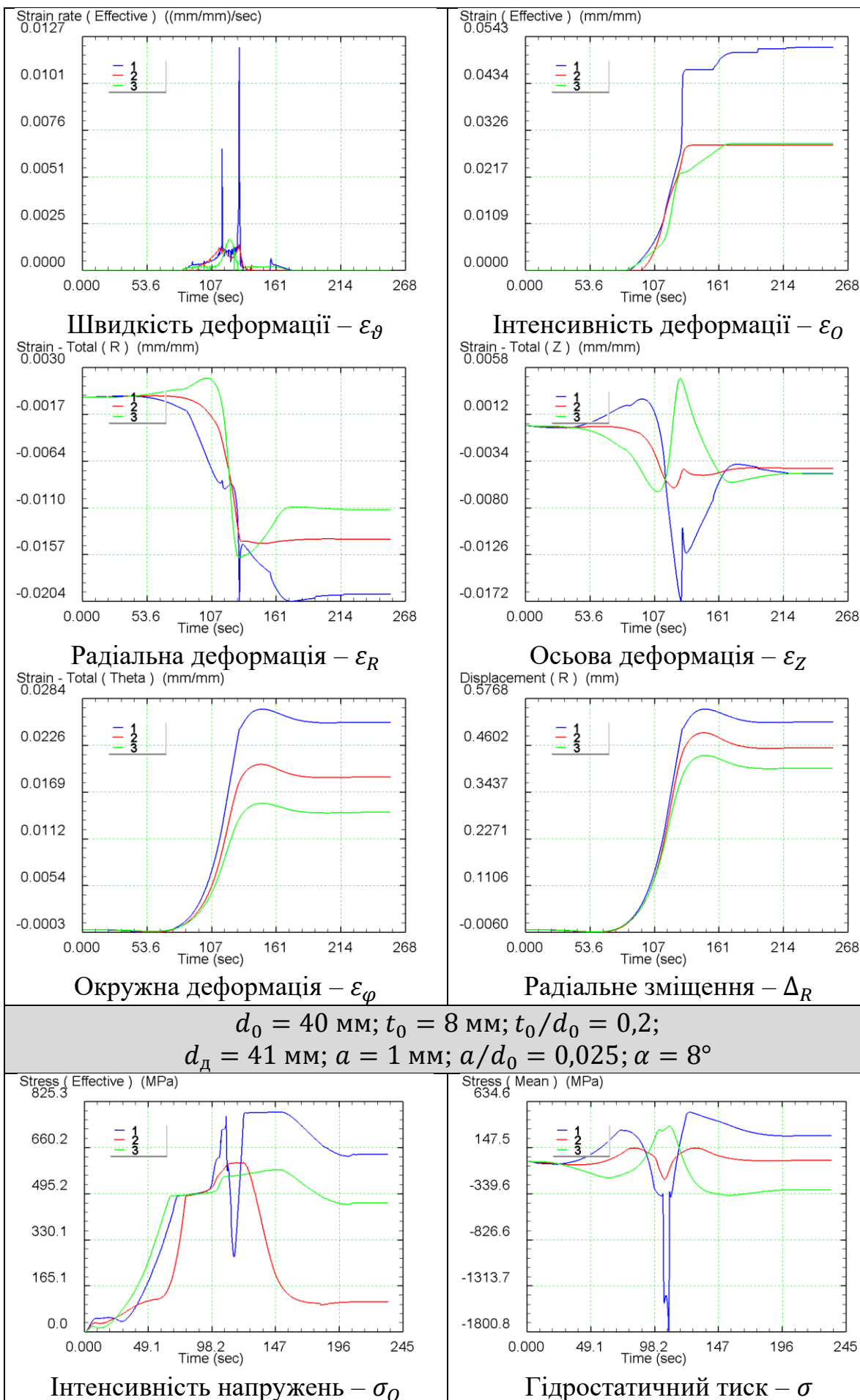
$$d_0 = 40 \text{ мм}; t_0 = 2 \text{ мм}; t_0/d_0 = 0,05;$$

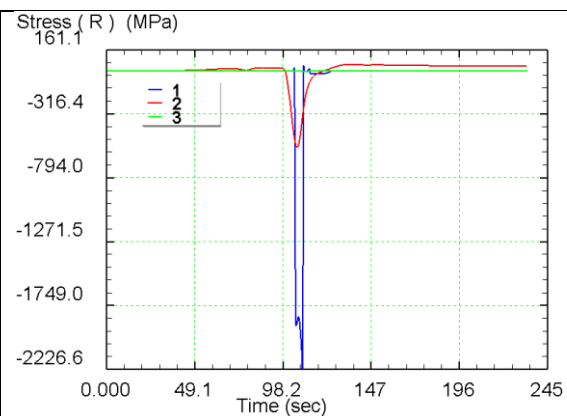
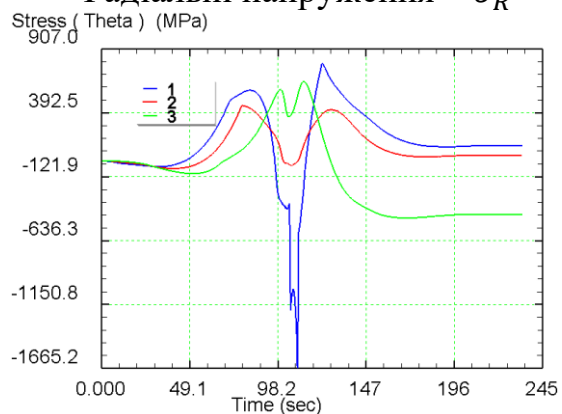
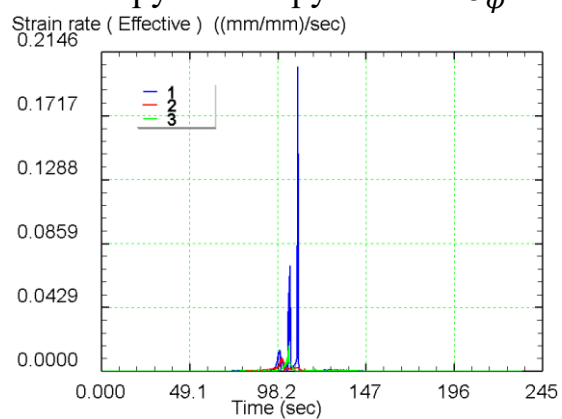
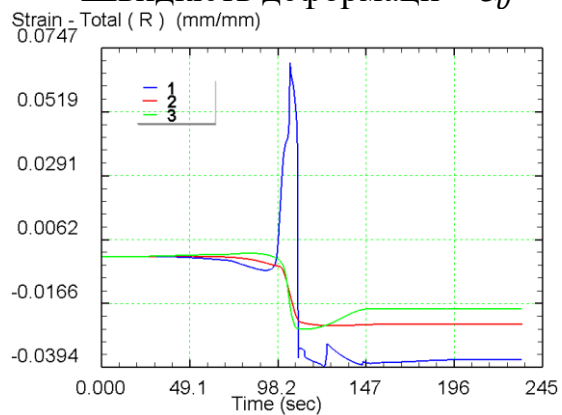
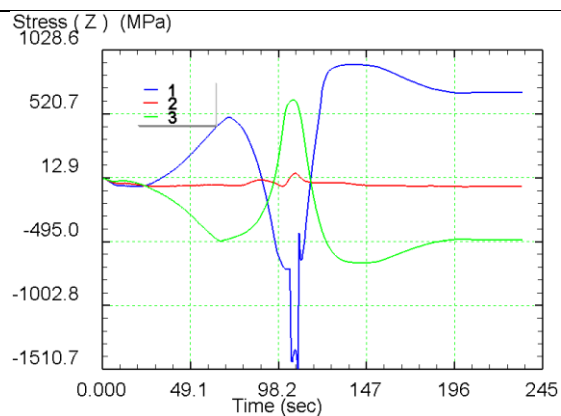
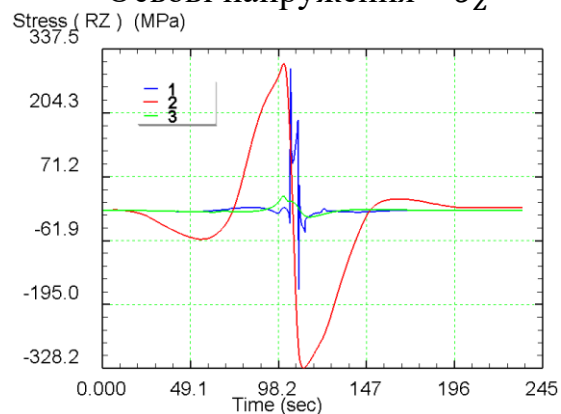
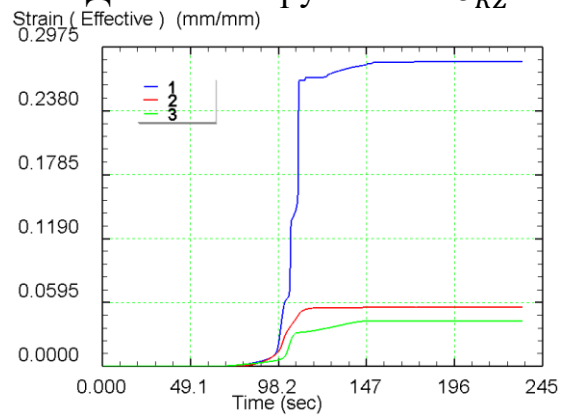
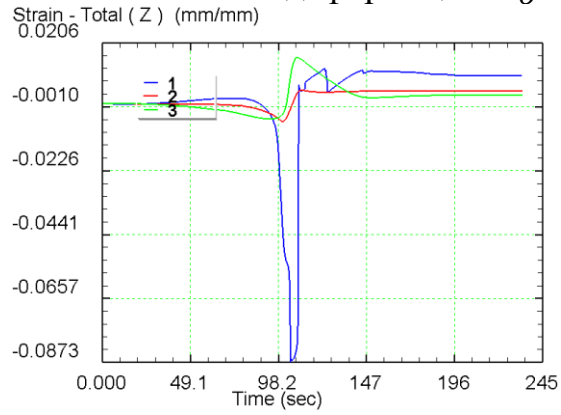
$$d_d = 41,5 \text{ мм}; a = 1,5 \text{ мм}; a/d_0 = 0,0375; \alpha = 4^\circ$$

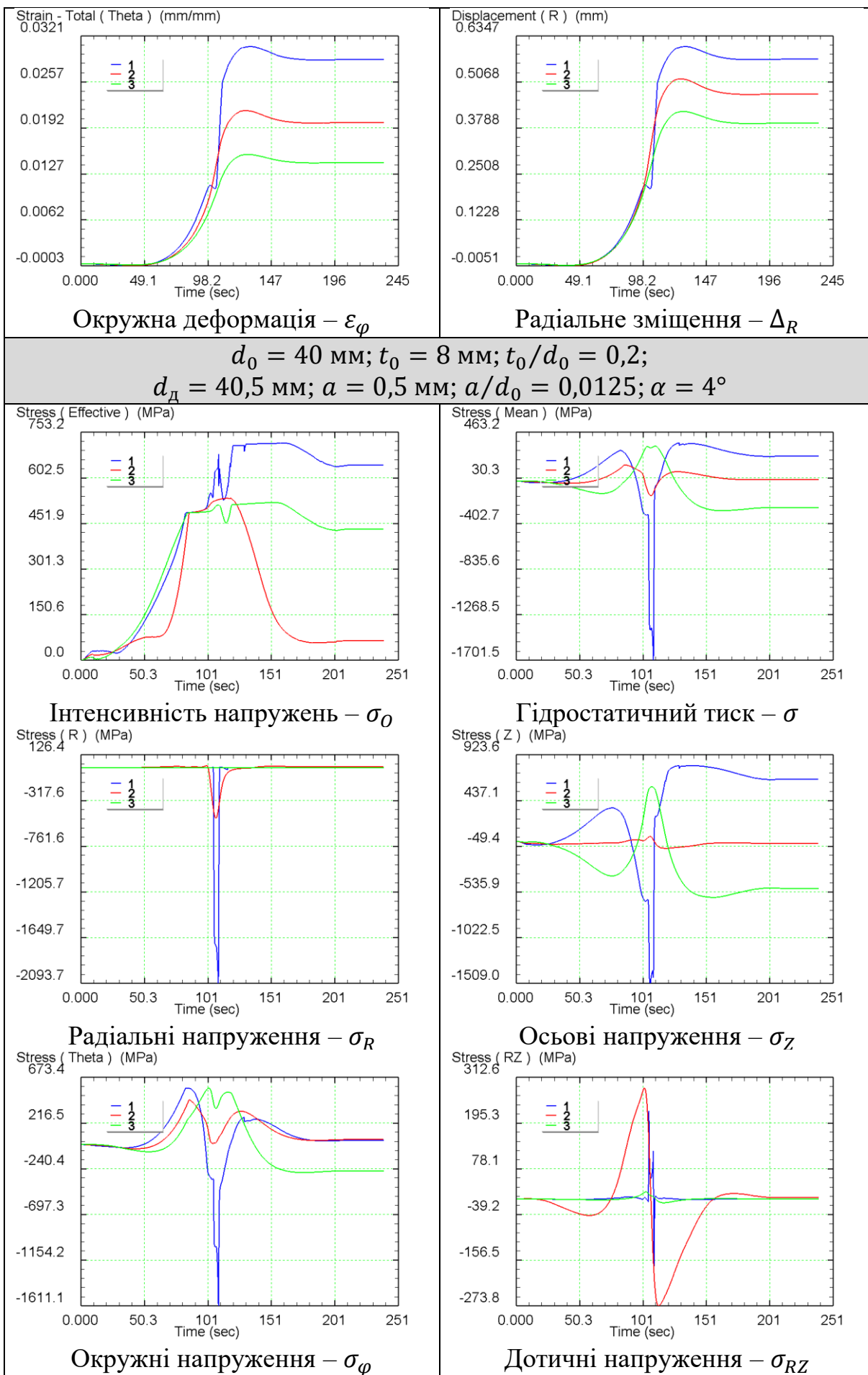
Інтенсивність напружень – σ_O Гідростатичний тиск – σ

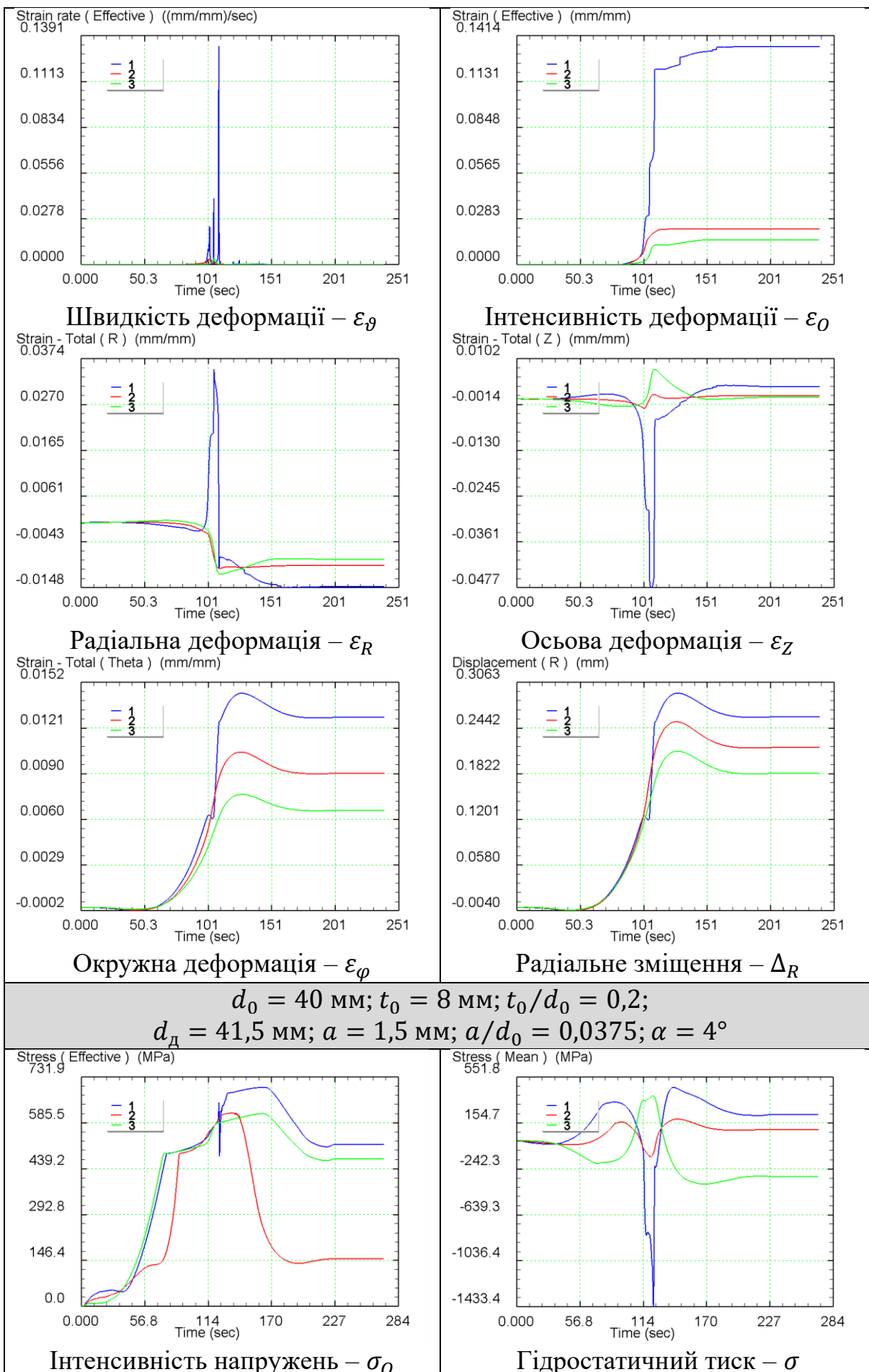
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\phi$ Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_0 Осьова деформація – ϵ_Z

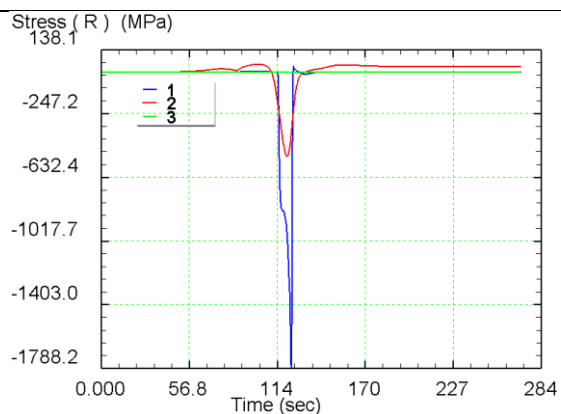
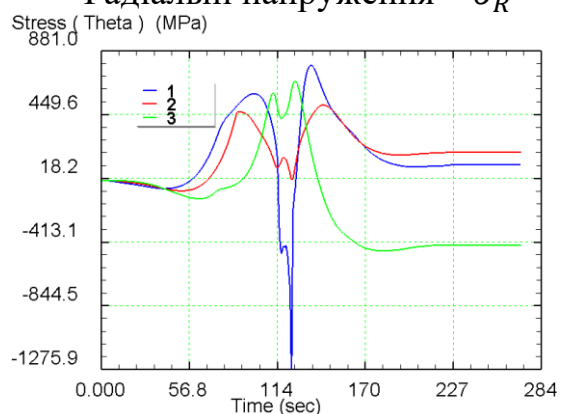
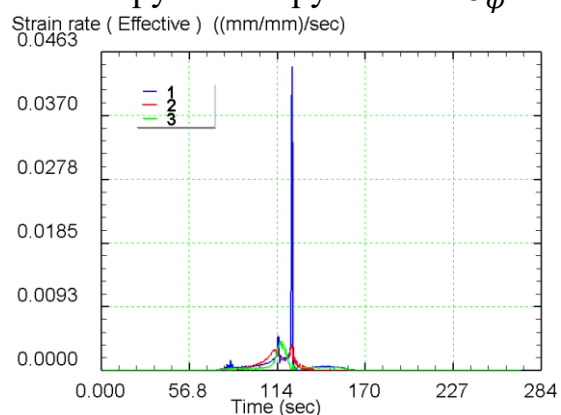
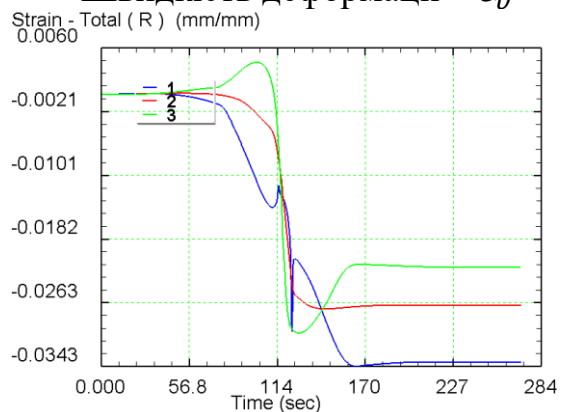
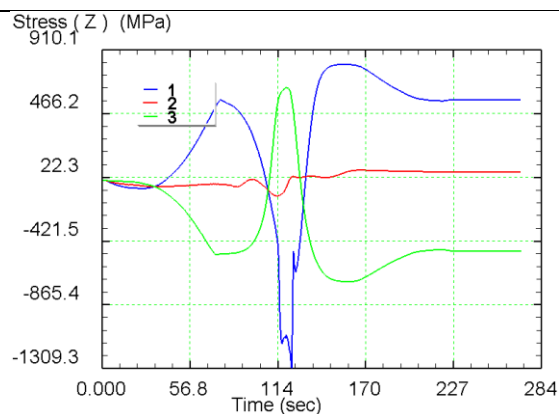
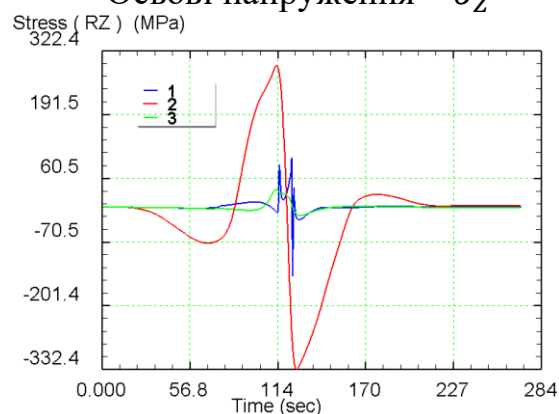
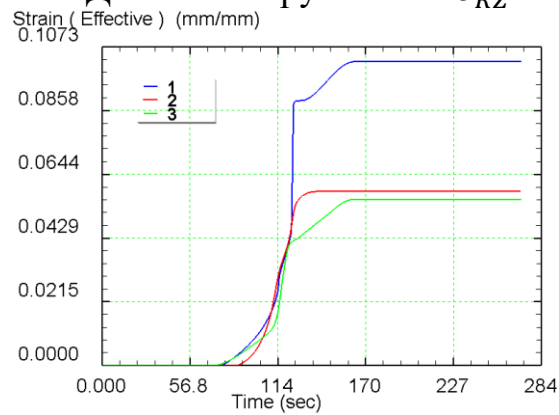
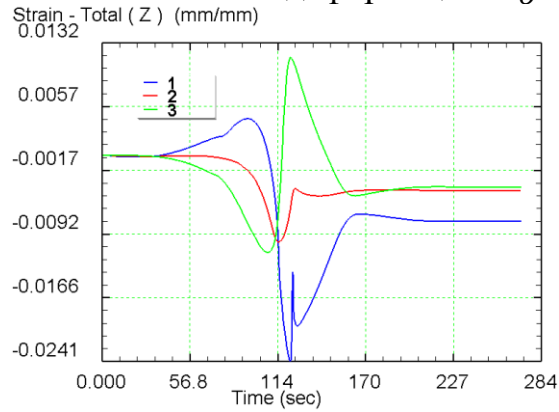


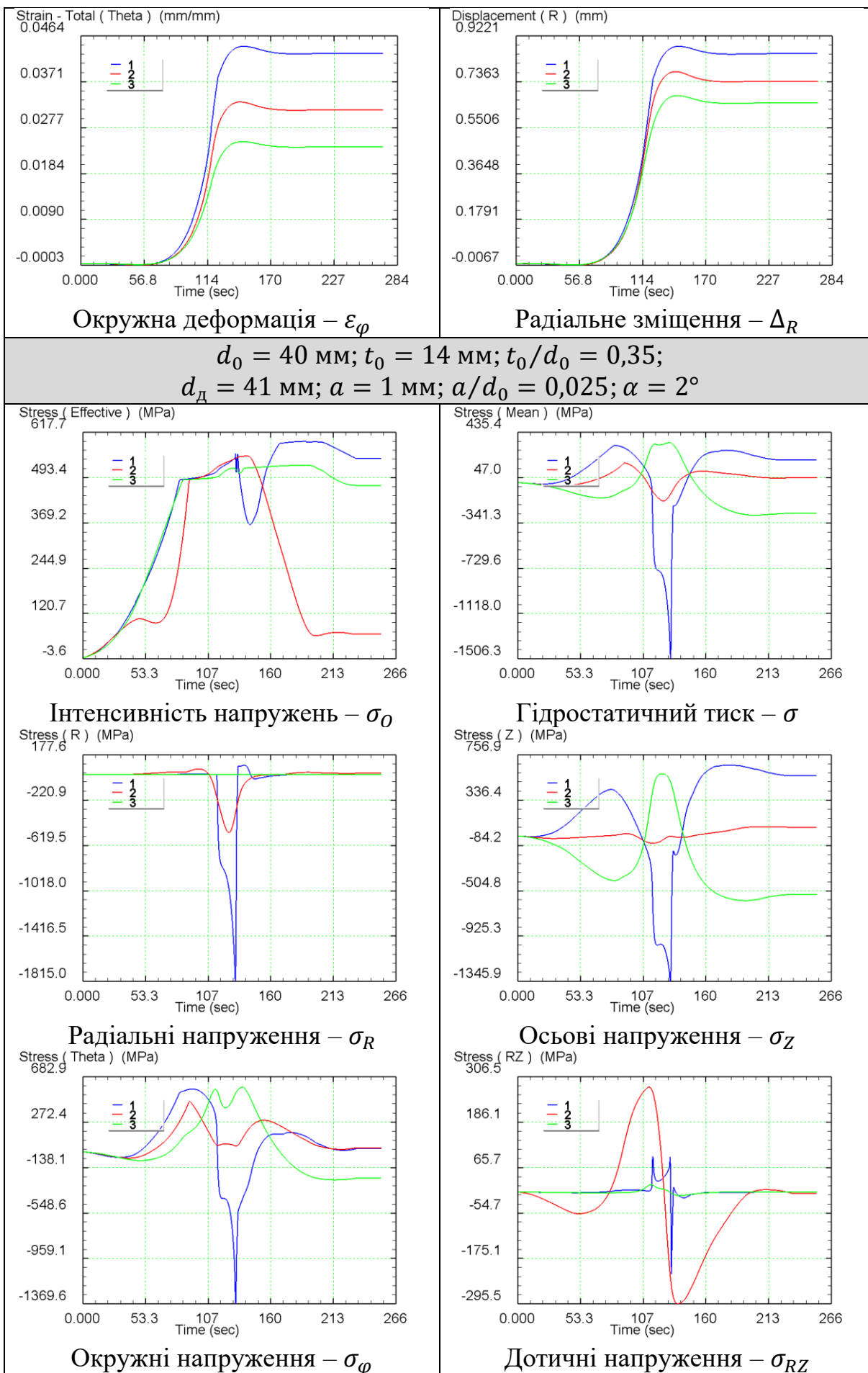


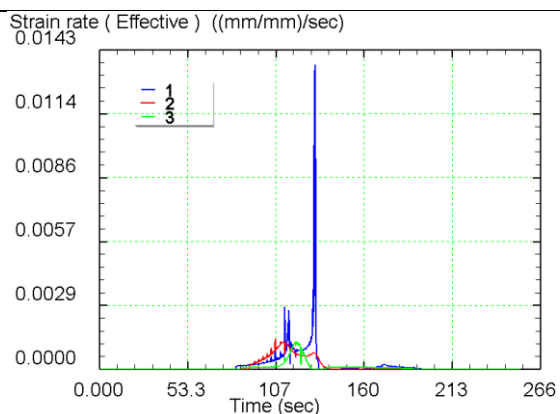
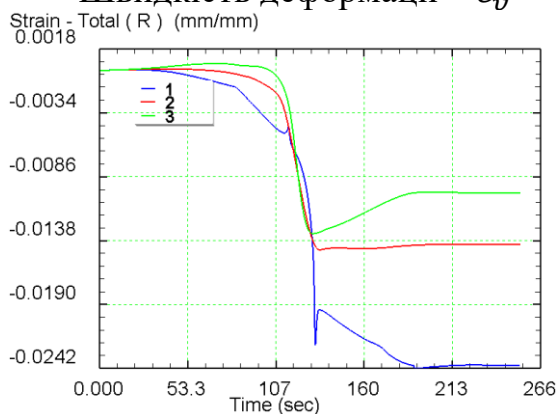
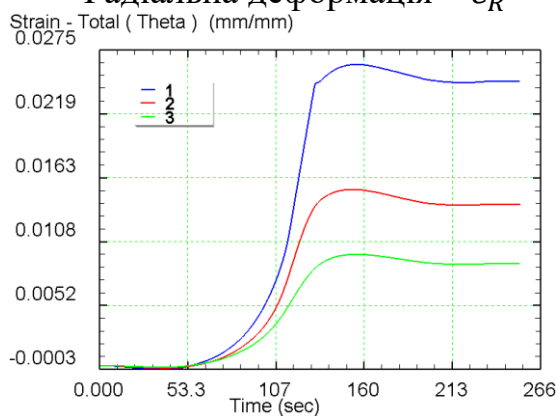
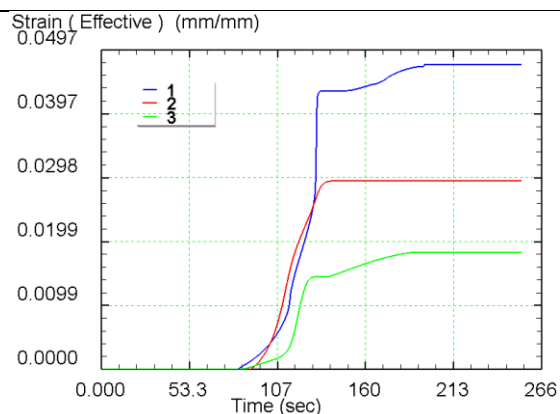
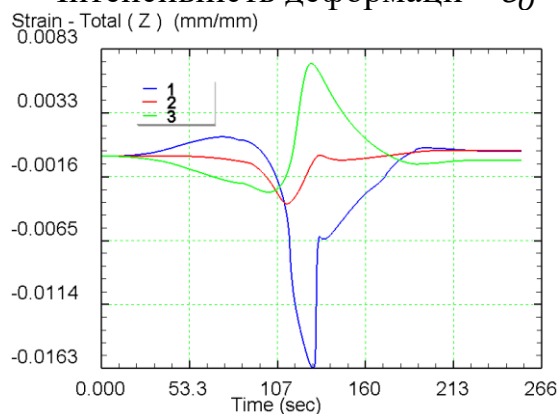
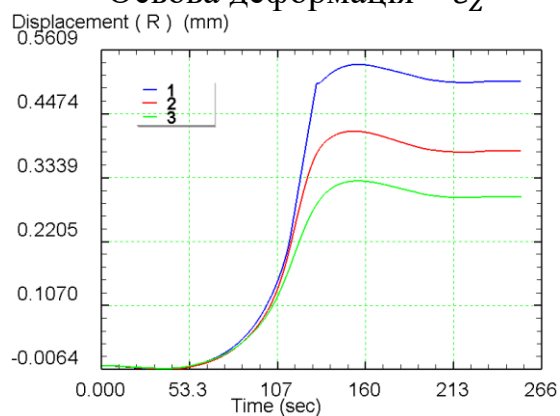
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – ϵ_d Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_0 Осьова деформація – ϵ_Z





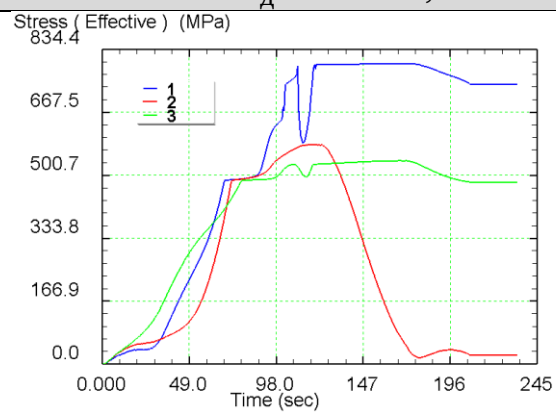
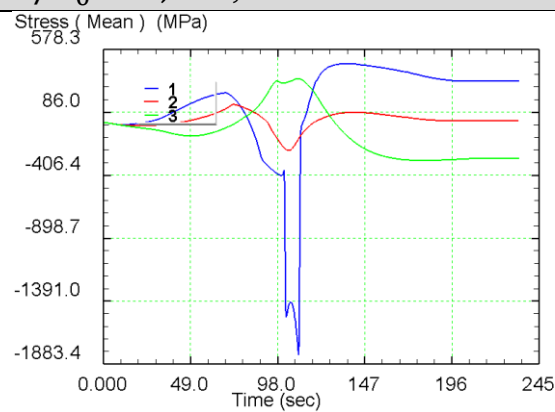
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\phi$ Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_0 Осьова деформація – ϵ_Z

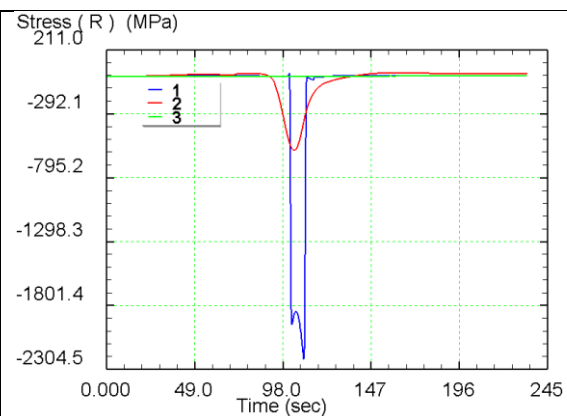
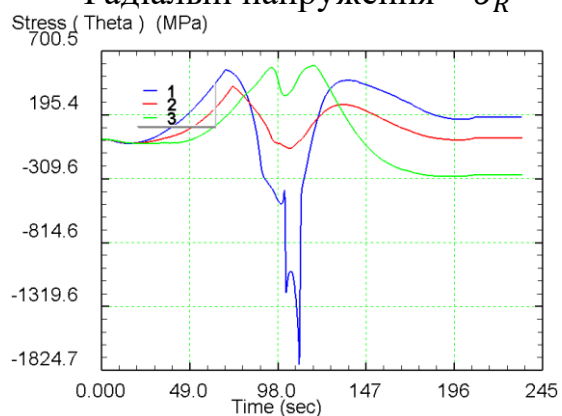
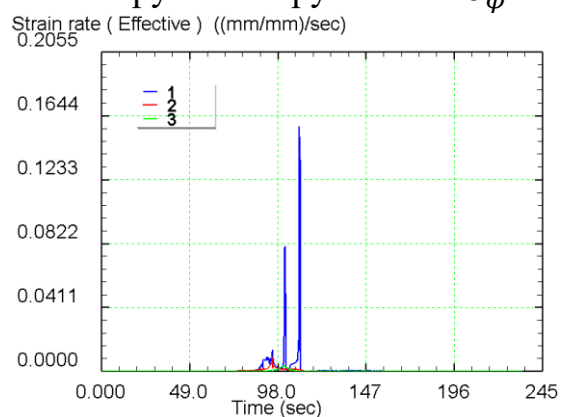
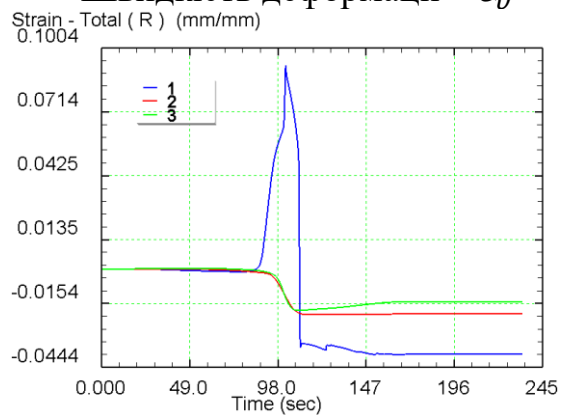
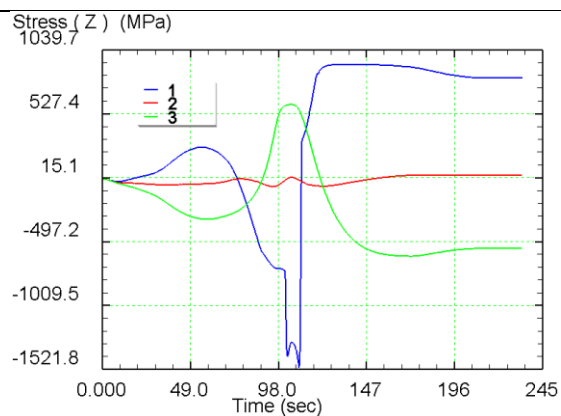
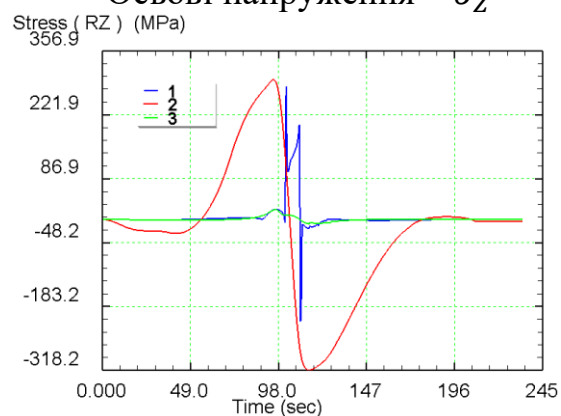
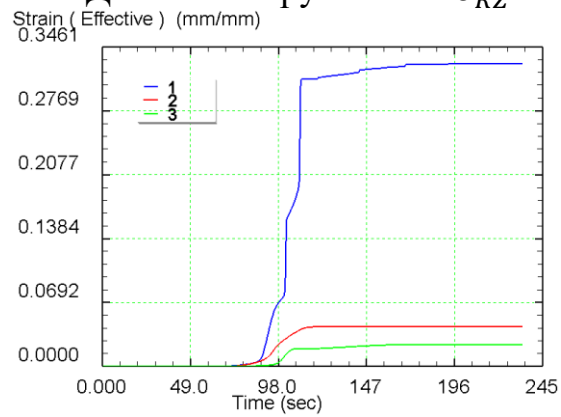
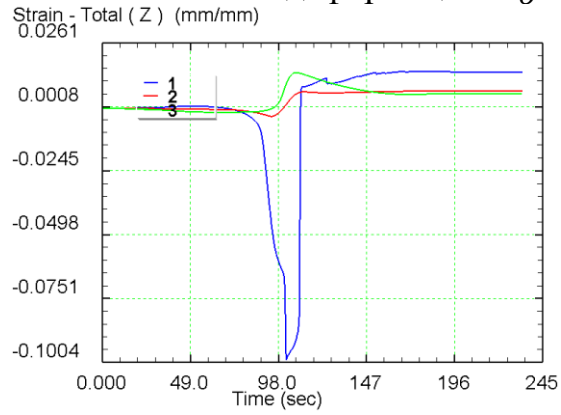


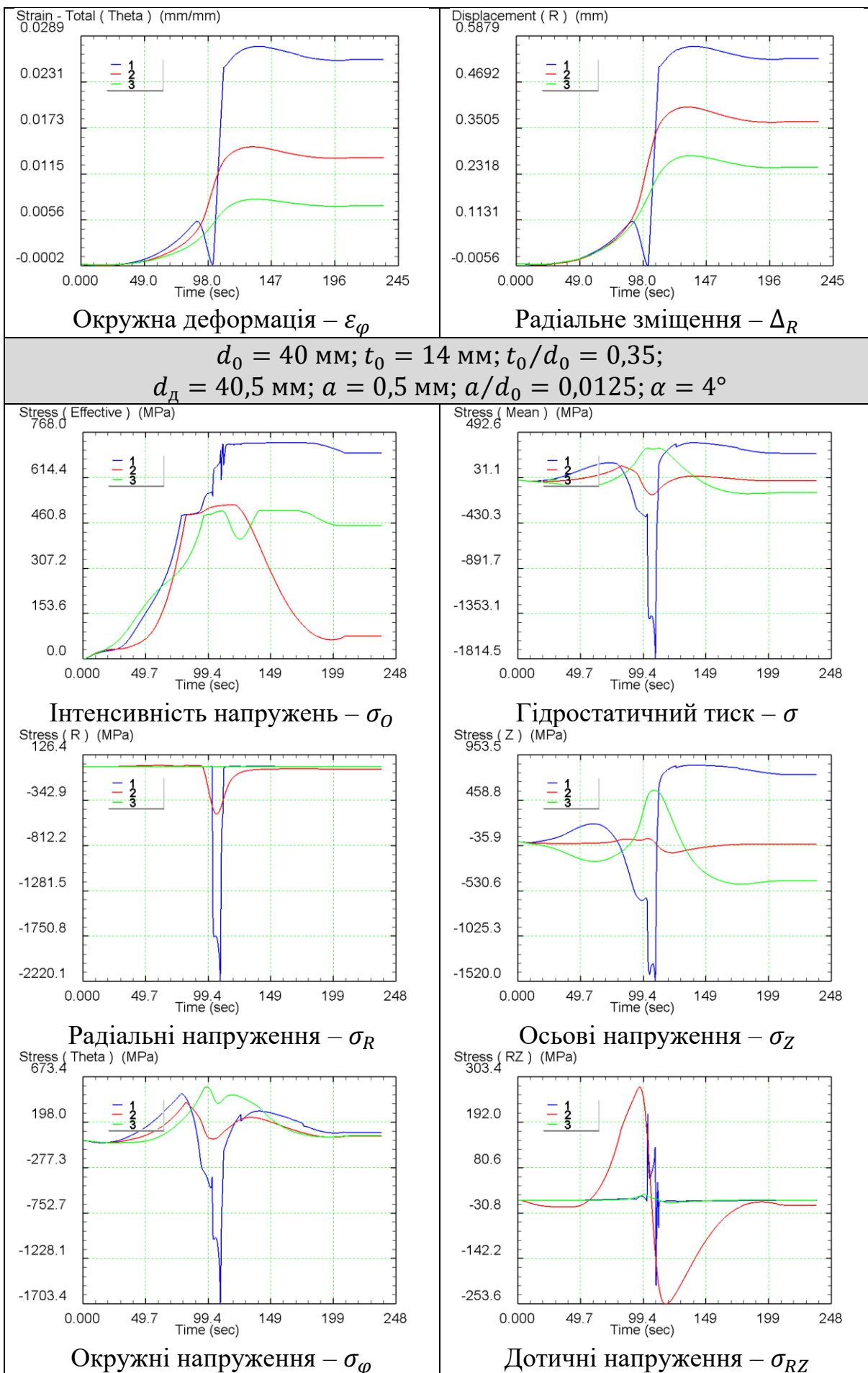
Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\vartheta$ Радіальна деформація – ϵ_R Окружна деформація – ϵ_φ Інтенсивність деформації – ϵ_O Осьова деформація – ϵ_Z Радіальне зміщення – Δ_R

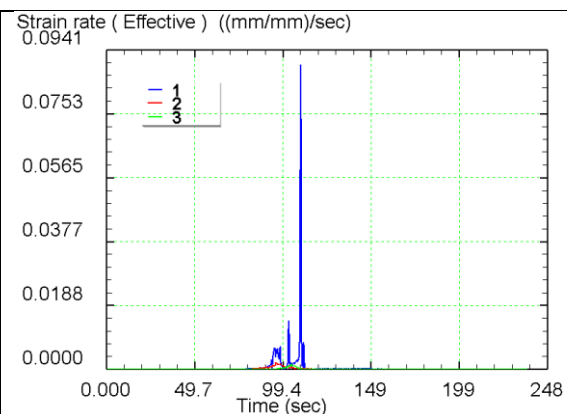
$$d_0 = 40 \text{ мм}; t_0 = 14 \text{ мм}; t_0/d_0 = 0,35;$$

$$d_d = 41 \text{ мм}; a = 1 \text{ мм}; a/d_0 = 0,025; \alpha = 8^\circ$$

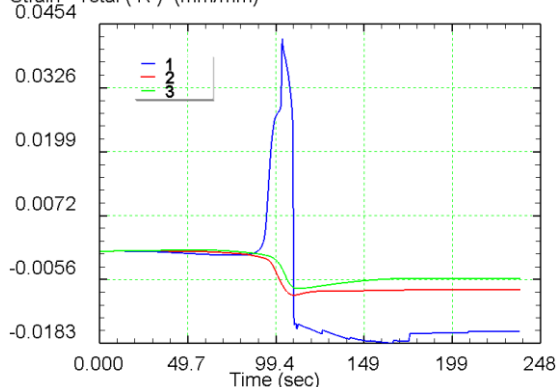
Інтенсивність напружень – σ_O Гідростатичний тиск – σ

Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – ε_d Радіальна деформація – ε_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ε_0 Осьова деформація – ε_Z

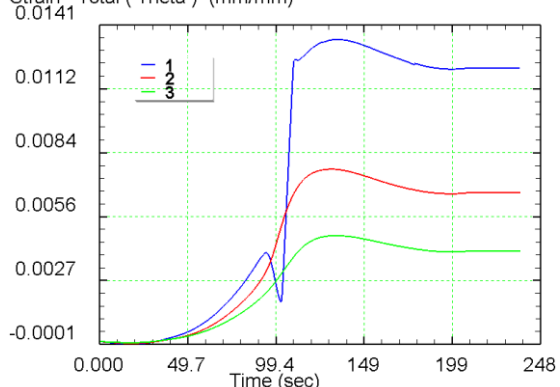
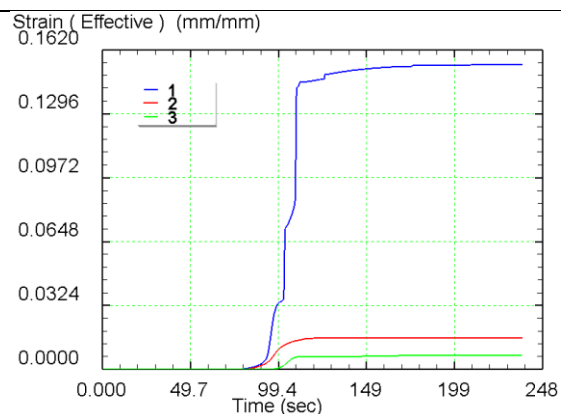


Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\vartheta$

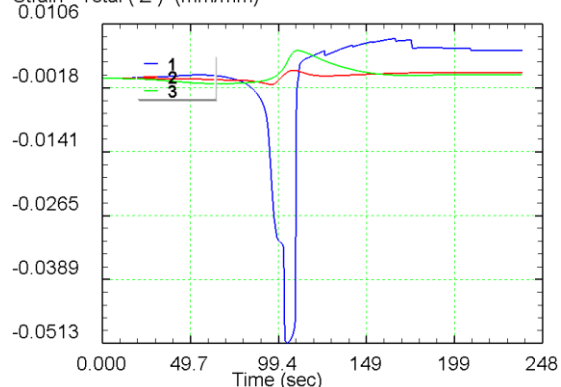
Strain - Total (R) (mm/mm)

Радіальна деформація – ϵ_R

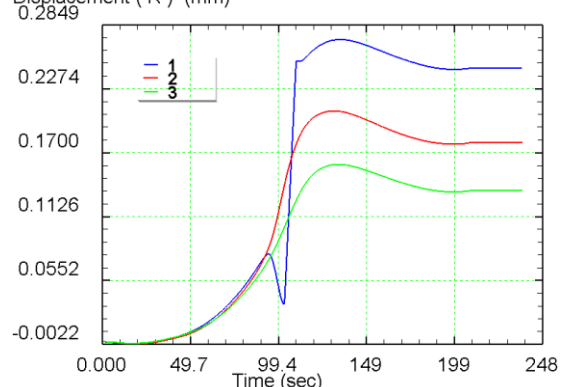
Strain - Total (Theta) (mm/mm)

Окружна деформація – ϵ_φ Інтенсивність деформації – ϵ_O

Strain - Total (Z) (mm/mm)

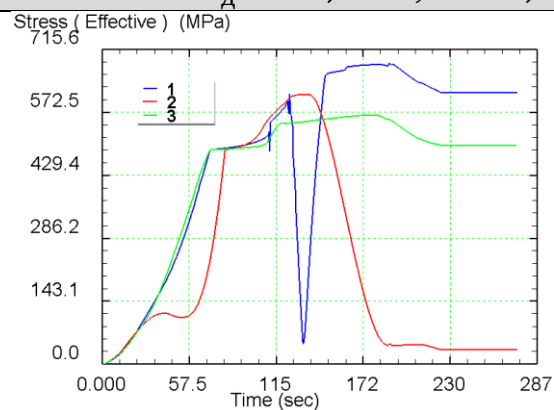
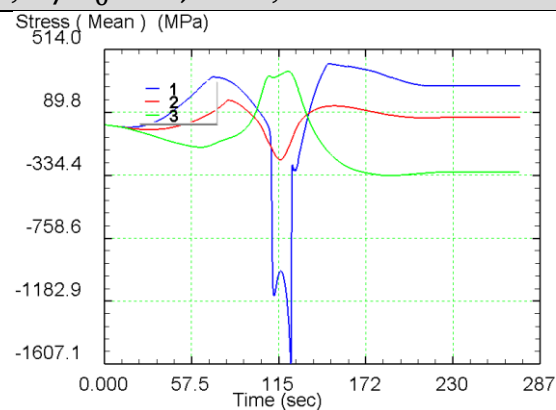
Осьова деформація – ϵ_Z

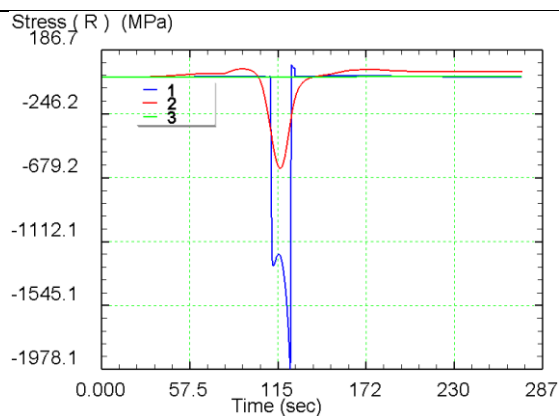
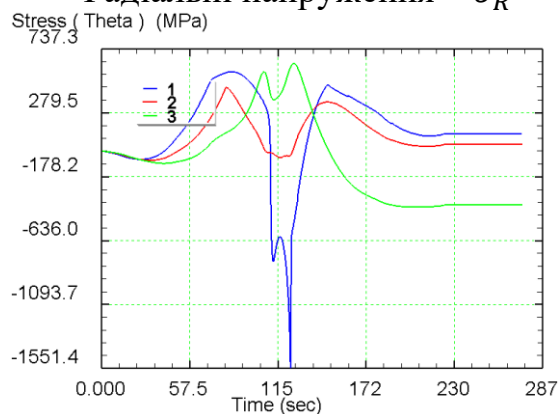
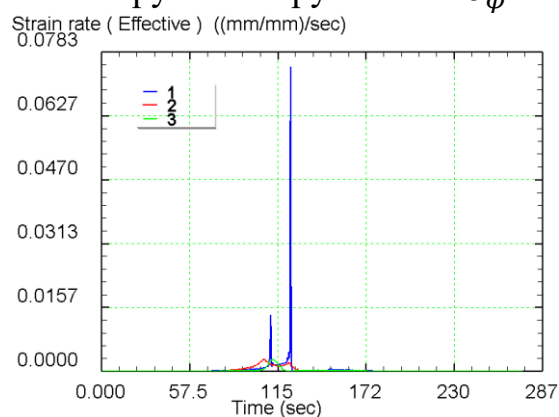
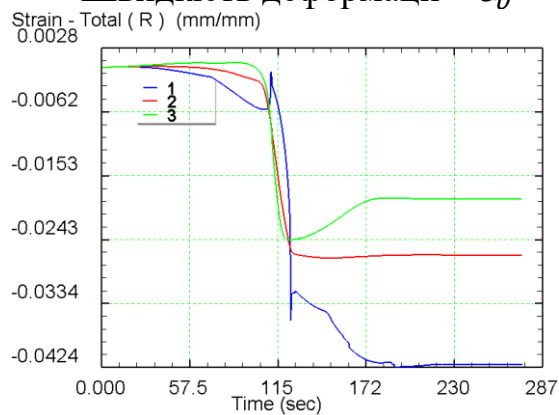
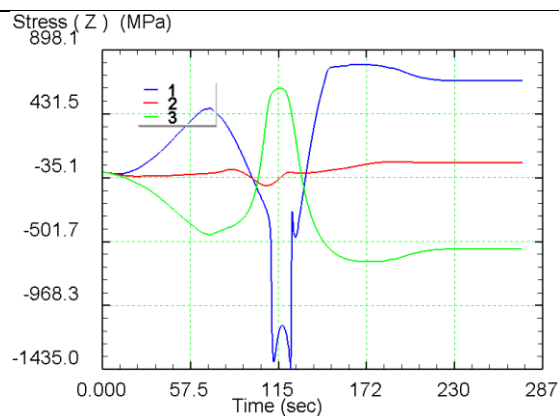
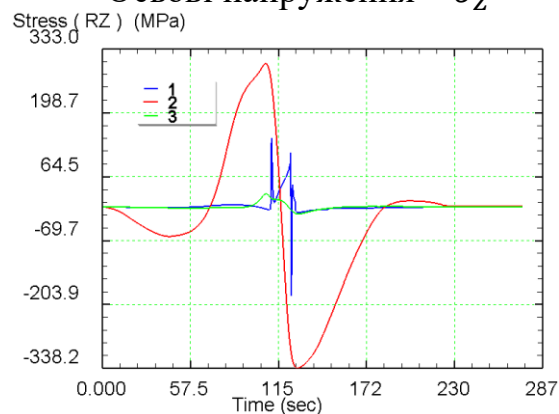
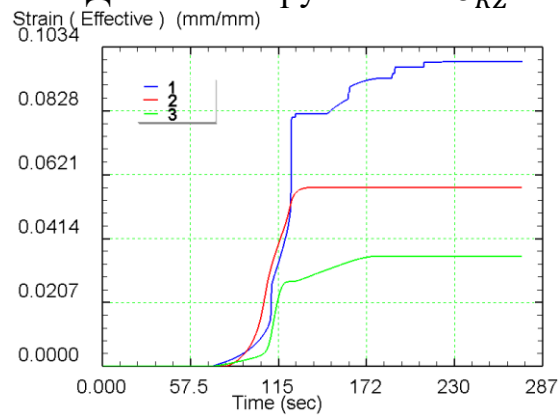
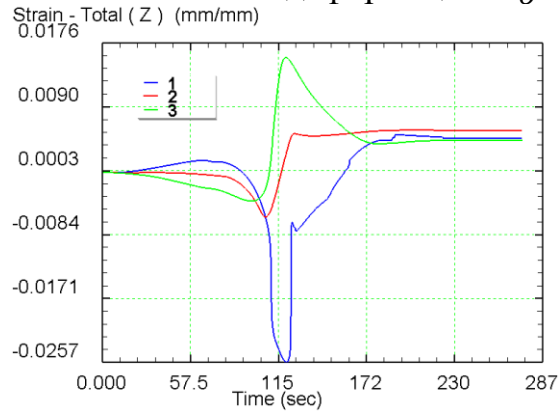
Displacement (R) (mm)

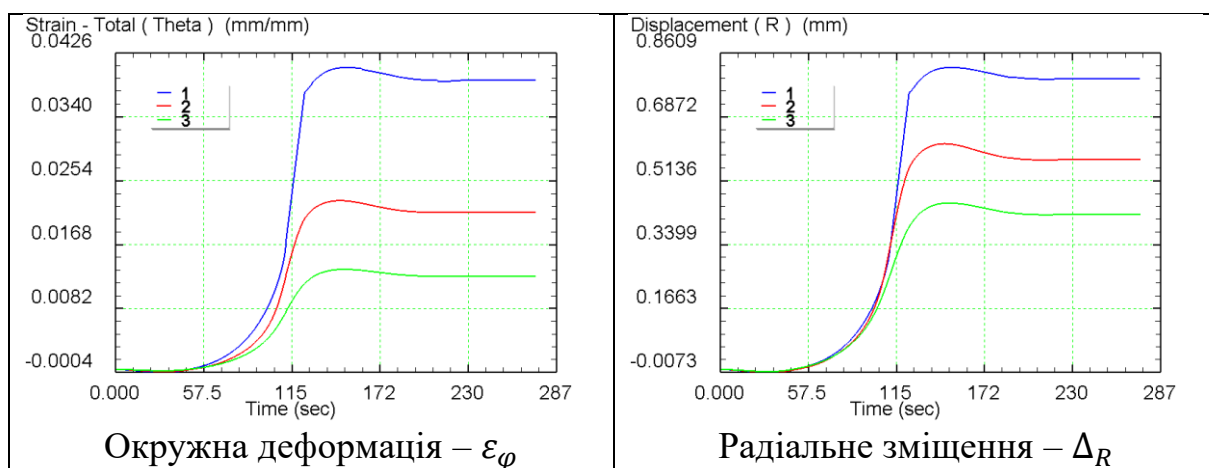
Радіальне зміщення – Δ_R

$$d_0 = 40 \text{ мм}; t_0 = 14 \text{ мм}; t_0/d_0 = 0,35;$$

$$d_d = 41,5 \text{ мм}; a = 1,5 \text{ мм}; a/d_0 = 0,0375; \alpha = 4^\circ$$

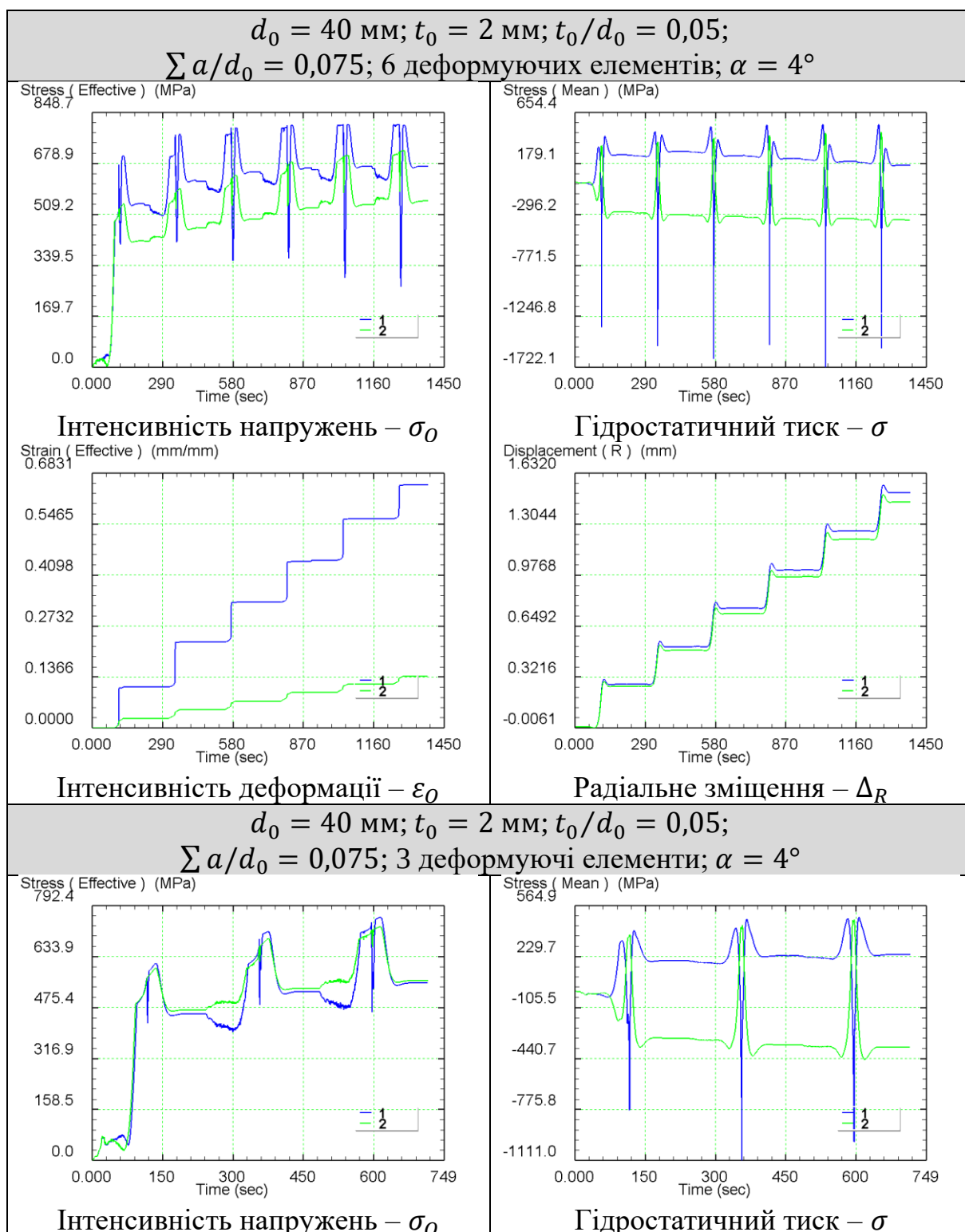
Інтенсивність напружень – σ_O Гідростатичний тиск – σ

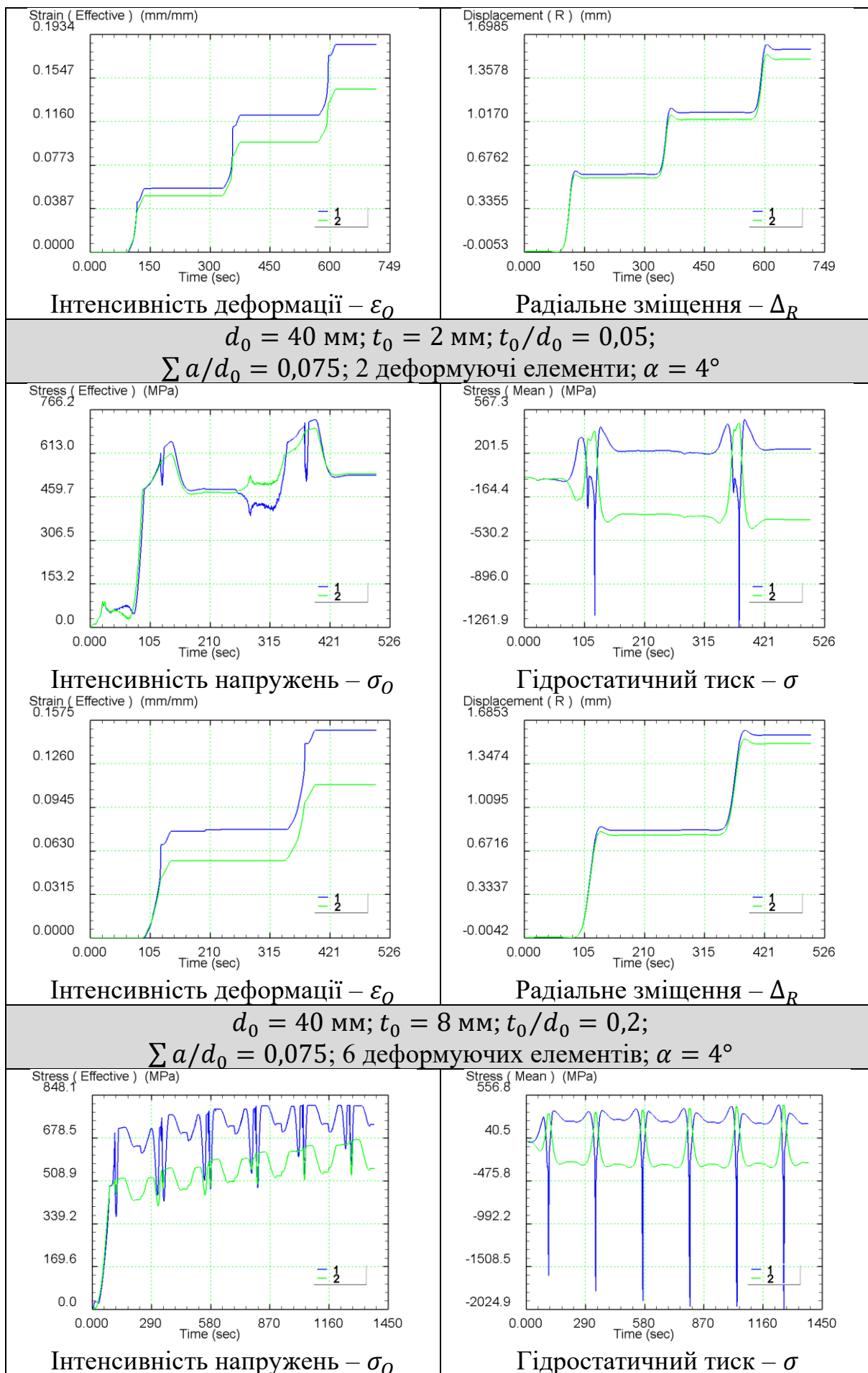
Радіальні напруження – σ_R Окружні напруження – σ_ϕ Швидкість деформації – $\dot{\epsilon}_\phi$ Радіальна деформація – ϵ_R Осьові напруження – σ_Z Дотичні напруження – σ_{RZ} Інтенсивність деформації – ϵ_0 Осьова деформація – ϵ_Z

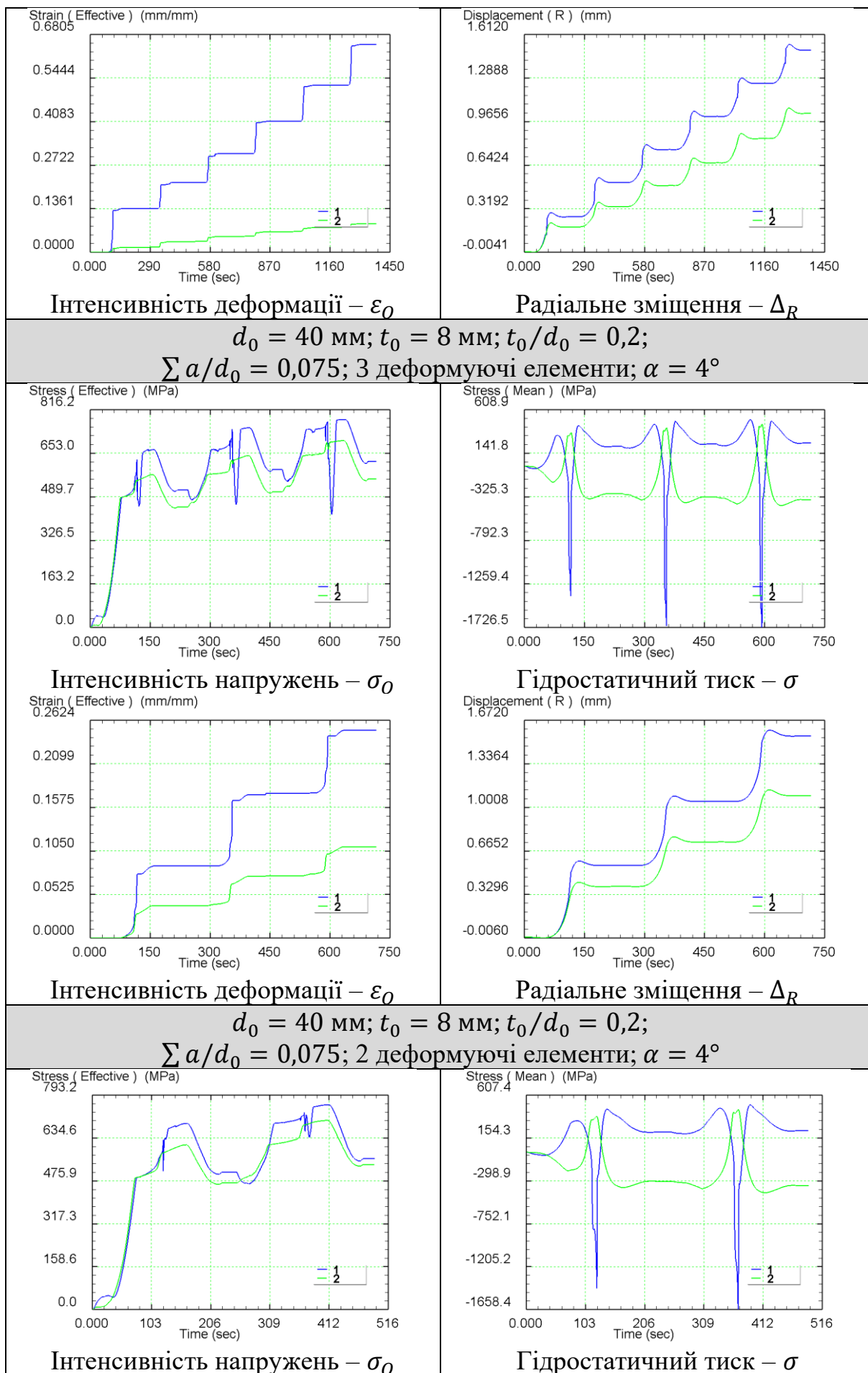


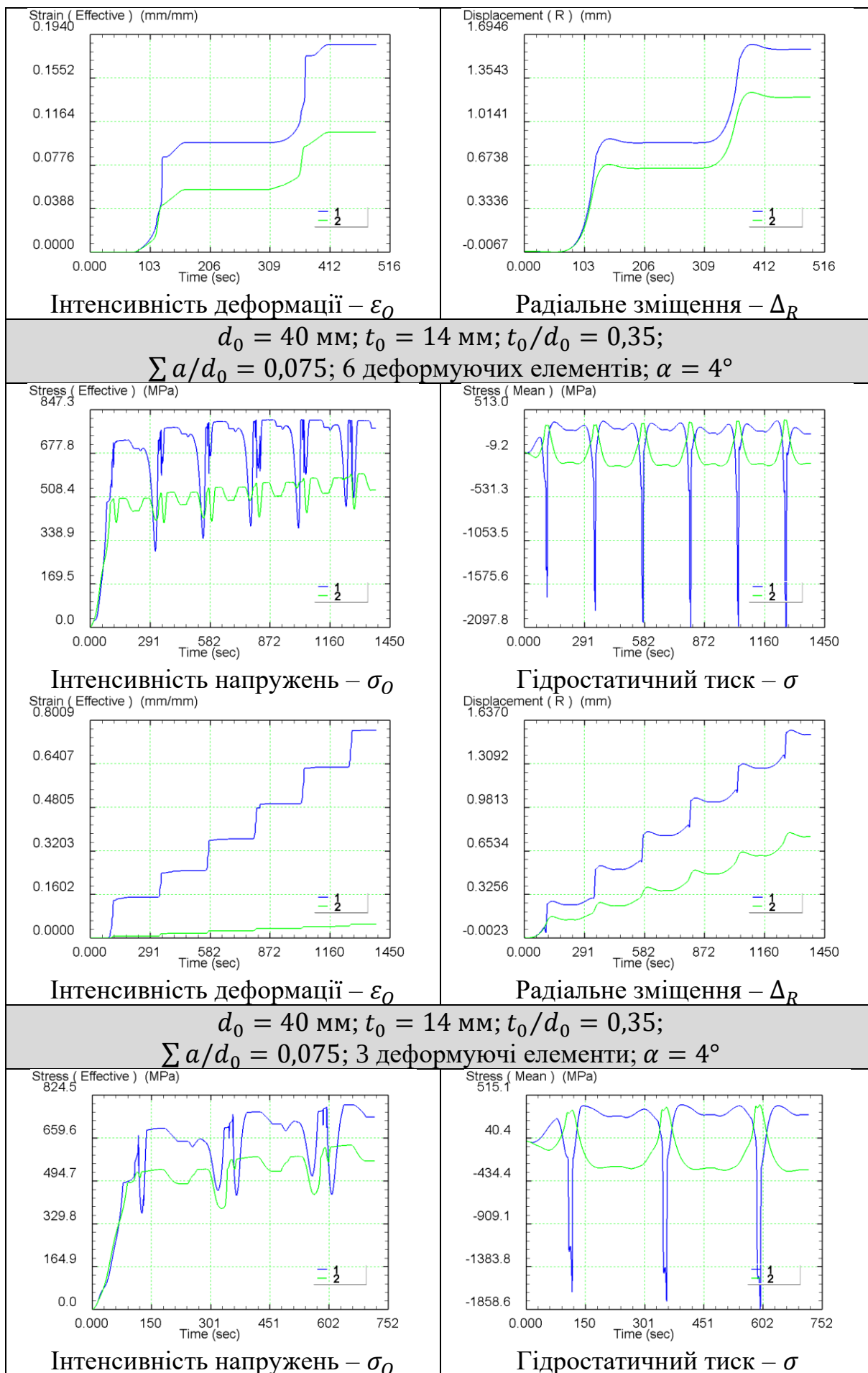
ДОДАТОК Д

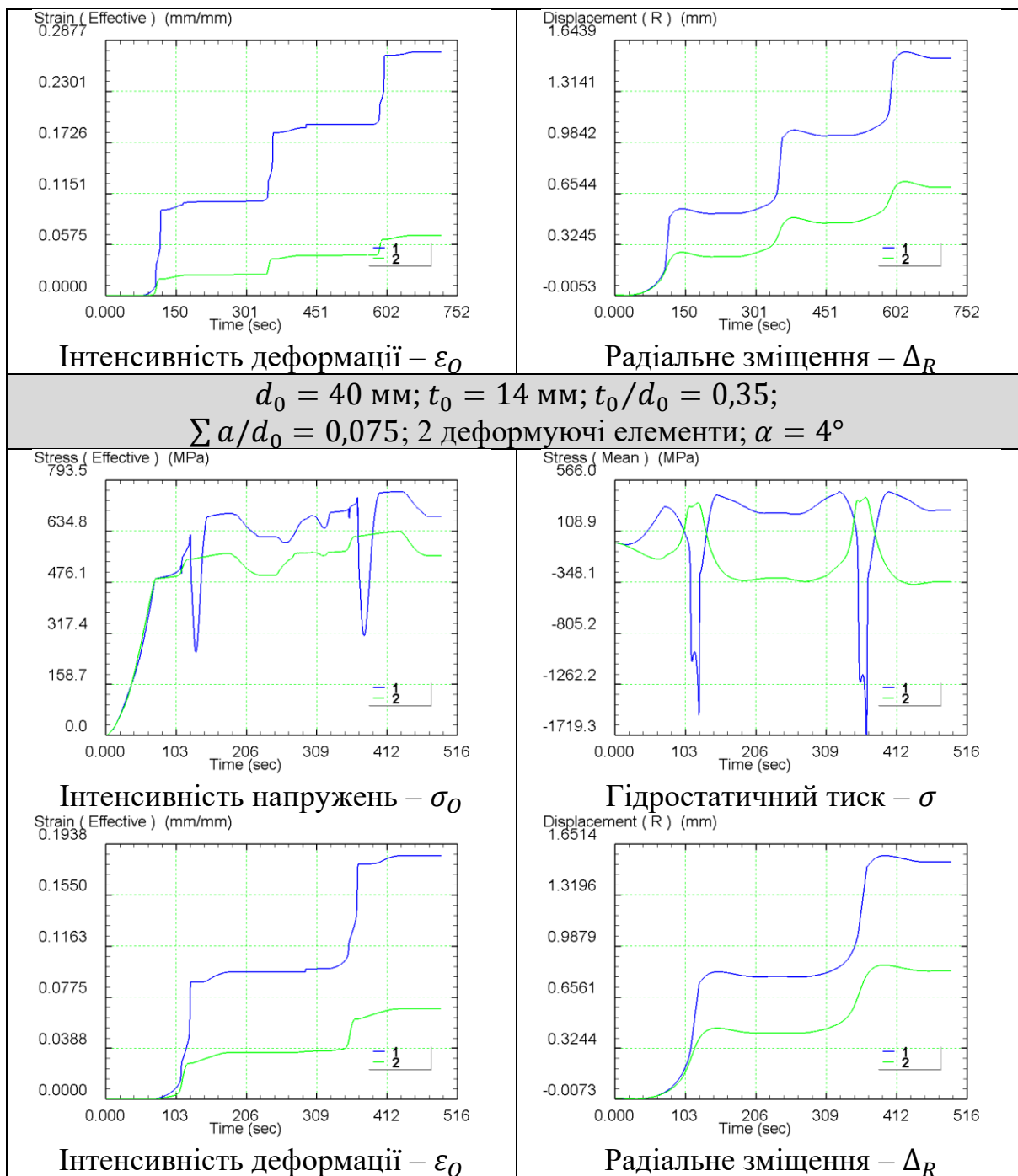
Результати моделювання напружено-деформованого стану при деформуючому протягуванні декількома деформуючими елементами з сумарною деформацією $\sum a/d_0 = 0,075$ але різним натягами на елемент











ДОДАТОК Е

Протокол експериментальних результатів з вимірювання фактичної
довжини контакту деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею
заготовки

№ п/п	Товстінність, t_0/d_0	Кут α , град	Відносний натяг, a/d_0	Фактична довжина контакту деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею, l_2 , мм
1	0,05	4	0,0125	0,36
2	0,20	4	0,0125	0,56
3	0,25	4	0,0125	1,48
4	0,05	4	0,025	3,12
5	0,15	4	0,025	2,16
6	0,25	4	0,025	3,76
7	0,05	4	0,0375	6,96
8	0,20	4	0,0375	4,48
9	0,25	4	0,0375	5,04
10	0,05	2	0,025	11,2
11	0,15	2	0,025	8,52
12	0,25	2	0,025	7,52
13	0,05	8	0,025	1,22
14	0,15	8	0,025	1,78
15	0,25	8	0,025	3,02

ДОДАТОК Є

Протокол експериментальних результатів з вимірювання осьової деформації

№ п/п	Товст остін ність, t_0/d_0	Кут α , град	Віднош ий натяг, a/d_0	Кут повороту заготовки	Відстань між точками на заготовці до деформування, мм			Відстань між точками на заготовці після деформування, мм			Осьова деформація: $e_z = \frac{l - l_0}{l_0}$			$e_{z \text{ сер.}}$
					$l_{0 \ 1-1}$	$l_{0 \ 2-2}$	$l_{0 \ 3-3}$	l_{1-1}	l_{2-2}	l_{3-3}	$e_{z \ 1-1}$	$e_{z \ 2-2}$	$e_{z \ 3-3}$	
1	0,05	4	0,0125	0°	20,095	29,995	69,91	19,98	29,82	69,5	-0,0057	-0,0058	-0,0059	0,0058
				180°	19,915	30,115	70,025	19,8	29,94	69,615	-0,0058	-0,0058	-0,0058	
2	0,20	4	0,0125	0°	19,855	30,075	69,95	19,865	30,095	69,99	0,0005	0,0007	0,0006	0,0006
				180°	19,93	30,135	70,18	19,94	30,15	70,22	0,0005	0,0005	0,0006	
3	0,25	4	0,0125	0°	20,04	29,78	69,895	20,065	29,82	69,985	0,0012	0,0013	0,0013	0,0013
				180°	19,875	30,08	69,83	19,9	30,12	69,925	0,0013	0,0013	0,0014	
4	0,05	4	0,025	0°	19,93	29,945	69,895	19,67	29,56	68,985	-0,013	-0,0129	-0,013	-0,013
				180°	20,045	29,885	70,14	19,78	29,495	69,225	-0,0132	-0,013	-0,013	
5	0,15	4	0,025	0°	20,105	29,875	70,23	20,045	29,785	70,02	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
				180°	20,01	29,985	70,285	19,955	29,895	70,075	-0,0027	-0,003	-0,003	
6	0,25	4	0,025	0°	20,055	29,915	70,21	20,135	30,035	70,49	0,004	0,004	0,004	0,0039
				180°	20,235	30,115	69,945	20,31	30,23	70,22	0,0037	0,0038	0,0039	

7	0,05	4	0,0375	0°	19,806	30,12	70,015	19,435	29,55	68,69	-0,0187	-0,0189	-0,0189	-0,0188
				180°	20,065	30,13	69,99	19,69	29,56	68,67	-0,0187	-0,0189	-0,0188	
8	0,20	4	0,0375	0°	20,2	29,925	70,055	20,095	29,765	69,69	-0,0052	-0,0053	-0,0052	-0,0052
				180°	19,845	30,22	69,875	19,745	30,065	69,515	-0,005	-0,0051	-0,0051	
9	0,25	4	0,0375	0°	20,17	29,945	70,095	20,155	29,925	70,05	-0,0007	-0,0007	-0,0006	-0,0007
				180°	20,015	30,02	70,145	20	29,995	70,095	-0,0007	-0,0008	-0,0007	
10	0,05	2	0,025	0°	19,865	30,035	69,905	19,625	29,67	69,065	-0,0121	-0,0121	-0,012	-0,012
				180°	19,88	30,065	70,12	19,645	29,705	69,28	-0,0118	-0,0119	-0,012	
11	0,15	2	0,025	0°	20,115	30,025	69,905	19,98	29,821	69,43	-0,0067	-0,0068	-0,0068	-0,0067
				180°	20,14	30,075	70,055	20,01	29,88	69,585	-0,0064	-0,0065	-0,0067	
12	0,25	2	0,025	0°	20,005	30,03	69,905	19,955	29,955	69,735	-0,0025	-0,0025	-0,0024	-0,0024
				180°	20,025	29,99	70,145	19,98	29,92	69,975	-0,0022	-0,0023	-0,0024	
13	0,05	8	0,025	0°	20,08	30,035	69,945	19,79	29,595	68,93	-0,0144	-0,0146	-0,0145	-0,0145
				180°	20,05	30,11	69,96	19,755	29,67	68,945	-0,0147	-0,0146	-0,0145	
14	0,15	8	0,025	0°	19,98	30,115	69,91	19,93	30,045	69,745	-0,0025	-0,0023	-0,0024	-0,0024
				180°	19,935	30,13	69,91	19,885	30,065	69,75	-0,0025	-0,0022	-0,0023	
15	0,25	8	0,025	0°	19,97	30,12	69,885	20,095	30,305	70,32	0,0063	0,0061	0,0062	0,0062
				180°	20,005	30,115	70,09	20,13	30,305	70,53	0,0062	0,0063	0,0063	

ДОДАТОК Ж

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>

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>

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 A)

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)

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)

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

6. Otamanskyi V., Nemyrovskyi 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>

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.

Монографії:

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

17. Отаманський В. В., Мельник О. Л., Широбоков В. В., Грева Д. В. Оцінка впливу форми твірної деформуючого елементу 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.