

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ярмоленко Олександр Сергійович

УДК 621.73

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ З
ЛАТУНІ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ ІЗ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ
ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ

131 Прикладна механіка

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О.С. Ярмоленко

Науковий керівник

Калюжний Володимир Леонідович, доктор технічних наук, професор

Київ 2023

АНОТАЦІЯ

Ярмоленко О.С. Підвищення продуктивності пластичного формоутворення з латуні вісесиметричних виробів із змінною товщиною стінки великої довжини. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії галузі знань 13 — механічна інженерія за спеціальністю 131 “Прикладна механіка” - Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, Київ, 2023.

Дисертація присвячена дослідженню способів підвищення продуктивності процесів пластичного формоутворення з латуні вісесиметричних виробів із змінною товщиною стінки великої довжини, використовуючи інструмент спеціального профілю, для зменшення кількості переходів витягування з потоншенням та обтиску при їх виготовленні.

Проведено аналіз літературних джерел по існуючих технологіях пластичного формоутворення виробів зі змінною товщиною стінки. Технології включають в себе операції гарячого осаджування циліндричної заготовки і подальшого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату, наступних переходів витягування з потоншенням та обтиску. Сформульована мета роботи та завдання на проведення досліджень.

Вперше з використанням методу скінченних елементів проведено розрахунковий аналіз переходів гарячого осаджування та подальшого зворотного видавлювання з роздачою вісесиметричного порожнистого напівфабрикату з урахуванням накопичених деформацій після осаджування. Отримано силові режими, розподіли питомих зусиль на інструменті, напружено-деформований стану металу. Встановлено швидкість деформування для витримки режиму гарячої деформації. Отримано кінцеві форма та розміри напівфабрикатів, при цьому у напівфабрикаті після видавлювання передбачено виступ на торці донної частини для подальшого формоутворення фланцю.

Адекватність математичних моделей гарячого зворотного видавлювання порожнистих напівфабрикатів перевірена шляхом виконання експериментальних робіт по гарячому пластичному формоутворенню порожнистих виробів із високоміцного алюмінієвого сплаву. В результаті проведених досліджень отримано вироби необхідної форми і заданим пропрацюванням структури металу гарячою пластичною деформацією для отримання заданих механічних властивостей у стінці і донній частині.

Вперше з використанням методу скінчених елементів і застосуванням пуансону спеціального профілю було проведено моделювання переходу витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці і та переходу витягування через одну матрицю.

Отримав подальший розвиток розрахунковий аналіз витягування з потоншенням через одну матрицю традиційним пуансоном із забезпеченням отримання необхідної форми напівфабрикату для подальшого обтиску та заданими механічними властивостями здеформованого металу в стінці.

Застосування пуансонів спеціального профілю, у яких бічна поверхня виконана у вигляді послідовно розташованих виступів і впадин, на переходах витягування дозволило створити тягнуче зусилля за стінку напівфабрикатів за рахунок заповнення здеформованим металом впадин на поверхні пуансонів, зменшити величини осьових напружень в місці переходу стінки у донну частину і провести розвантаження її і тим самим збільшити ступінь деформації на переходах витягування та скоротити кількість переходів витягування з потоншенням. При цьому зменшується величина викривлення донної частини при витягуванні. На переходах витягування з потоншенням встановлені граничні ступені деформації, які забезпечили холодне пластичне формоутворення напівфабрикатів без руйнування.

Виявлені залежності зусиль витягування від переміщення пуансонів, залежності зусиль знімання напівфабрикатів з пуансонів, напружено-деформований стан металу та форми і розміри отриманих напівфабрикатів. При цьому на останньому переході витягування з потоншенням встановлено розміри

стілки по висоті, які забезпечують потрібні розміри виробу після виконання обтиску. Третій перехід витягування здійснювався пуансоном з циліндричною поверхнею щоб звести до мінімуму механічну обробку після кінцевого обтиску. На всіх переходах витягування з потоншенням використовували конічні бандажовані матриці.

Після першого переходу витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці в зв'язку зі значним викривленням донної частини запропоновано виконання калібрування (вирівнювання) цієї частини напівфабрикату. Для цього моделюванням методом скінчених елементів визначено величину потрібного зусилля калібрування і додаткове пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та виявлені форма і розміри напівфабрикату.

Для інженерних розрахунків параметрів витягування з потоншенням пуансоном спеціального профілю з використанням методу балансу потужностей та методу спільного вирішення наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності вперше проведено теоретичний аналіз такого процесу. З урахуванням дії сил тертя та зміцнення металу при холодному пластичному формоутворенні отримані аналітичні залежності, за допомогою яких можна визначити напруження на контактуючих поверхнях та зусилля деформування.

В умовах напівгарячої деформації методом скінчених елементів проведено моделювання процесу осаджування фланцю із виступу на торці донної частини напівфабрикату, який був отриманий на першому переході гарячого осаджування циліндричної заготовки. Визначено напруження і деформації по об'єму фланцю та в області переходу фланцю у донну частину напівфабрикату. Пропрацювання структури металу напівгарячою деформацією оцінено по розподілу інтенсивності деформації. Формоутворення в умовах напівгарячої пластичної деформації дозволяє створити необхідну макроструктуру в здеформованому металі в області переходу фланцю у донну частину і забезпечити необхідні службові властивості виробу при багаторазовому його використанні, а також забезпечує зменшення

зусилля. Визначено зусилля осаджування, питомі зусилля на деформуючому інструменті та роботу деформації.

Вперше проведено розрахунковий аналіз процесу обтиску з врахуванням накопичених деформацій в zdeформованому металі напівфабрикату після третього переходу витягування з потоншенням. Виявлено залежність зусилля обтиску від переміщення інструменту при формоутворенні і величини питомих зусиль на поверхні інструменту. Встановлено кінцевий розподіл напружено-деформованого стану у виробі. Визначення геометричних характеристик виробу було проведено з урахуванням пружної деформації. В результаті обтиску вдалося отримати виріб потрібної форми і розмірів та заданими механічними властивостями в стінці.

Таким чином, комп'ютерним моделюванням за допомогою методу скінченних елементів отримано всі необхідні дані для проектування високопродуктивної технології і штампового оснащення для виготовлення з латуні ЛК 75 порожнистих виробів зі змінною товщиною стінки великої довжини: зусилля - для вибору пресового обладнання; питомі зусилля – для проектування штампового оснащення і прогнозування стійкості деформуючого інструменту; форма і розміри та розподіли напружень, деформацій і ступеню використання ресурсу пластичності у zdeформованому металі – для оцінки якості напівфабрикатів і виробу,

Для розглянутих переходів штампування було розроблено та спроектовано конструкції штампів, які забезпечують отримання напівфабрикатів та виробу необхідної форми і розмірів: штамп для гарячого осаджування циліндричної заготовки; штамп для гарячого зворотного видавлювання з охолодженням деформуючого інструменту; штамп для першого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці та використанням пуансону з поверхнею спеціального профілю; штамп для вирівнювання донної частини напівфабрикату після першого переходу витягування з потоншенням; штампи для другого витягування з потоншенням з пуансоном з поверхнею спеціального профілю тільки на його конічній частині та третього переходу витягування з

потоншенням через одну матрицю та пуансоном з циліндричною поверхнею; штамп для осадження фланця; штамп для обтиску стінки напівфабрикату.

Результати досліджень використані у виробничих умовах в корпорації «Таско» м. Київ (акт про використання від 14.04.2023 №170). Запропонована технологія в порівнянні з існуючими забезпечує, більш високу продуктивність виготовлення гільзи, економію металу та може використана на виробництві. А також застосовуються у навчальному процесі в КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці бакалаврів і магістрів по спеціальності 131 – прикладна механіка (акт про використання від 05.05.2023).

Ключові слова: метод скінченних елементів, гаряче осаджування, гаряче зворотне видавлювання, холодне витягування з потоншенням, обтиск, пуансон спеціального профілю, напівфабрикат, штампове оснащення, виріб зі стінкою змінної товщини.

Список публікацій здобувача

Праці, які підтверджують апробацію результатів дисертації

1. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С., Зусилля деформування, напружено-деформований стан і температурний розподіл у zdeформованій заготовці при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих виробів із латуні. Вісник НТУ «ХПІ», Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудування та металургії, Харків, 2018, № 23(1299) с. 28...33, ISSN 2519-2671, (фахове видання). *(Здобувачем виконано моделювання процесу та зроблений аналіз результатів)*

2. Калюжний В.Л., Артеменко С.С., Ярмоленко О.С., Силові режими, напружено-деформований стан металу та температурний розподіл при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих вісесиметричних виробів з латуні. Наукові нотатки Міжвузівський збірник. Луцький національний технічний університет. Вип. 66, 2019, с. 151...157, ISSN 2415-3966 (фахове видання). *(Здобувачем виконано моделювання процесу та зроблений аналіз результатів)*

3. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С. Інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною

товщиною стінки/ Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics and Advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, №1 (85). С. 111...117, ISSN 2521-1943, DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164271> (фахове видання). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання процесу обтиску)*

4. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С. Применение деформирующего инструмента специального профиля для интенсификации процесса вытяжки в радиальных матрицах. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics and Advanced Technologies.. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, №1 (88). С. 66...74, ISSN 2521-1943, DOI:10.20535/2521-1943.2020.88.204641 (фахове видання Категорія Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання процесу моделювання)*

5. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С., Малій Х.В. Горяче штампування сталевих порожнистих виробів з інтенсивною пластичною деформацією стінки і донної частини Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, № 1(50)-2020, Краматорск, ДГМА, с. 98...104, ISSN 2076-2151, DOI: 10.37142/2076-2151/2020-1(50)98) (фахове видання Категорія В). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання процесу гарячого штампування)*

6. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С., Марчук К.Л. Штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи середніх розмірів. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics and Advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Vol 5, №1. Рр. 113...121, ISSN 2521-1943, DOI: 10.20535/2521-1943.2021.5.1.234466 (фахове видання Категорія Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання процесу штампування)*

7. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С., Марчук К.Л. Інноваційна технологія штампування заготовки гільзи малих розмірів Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics and Advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Vol 5, №3. Рр. 112...118, ISSN 2521-1943, <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.249679> (фахове видання Категорія Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконаний аналіз результатів моделювання процесу штампування)*

8. Калюжний В.Л., Левченко В.М., Ярмоленко О.С., Таган Л.В. Вплив швидкості деформування на гаряче зворотне видавлювання вісесиметричного порожнистого виробу. Обробка матеріалів тиском. Збірник наукових праць, № 1(51)-2022, Краматорськ, ДГМА, с. 46...55, ISSN 2076-2151, DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)46 (фахове видання Категорія Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання процесу моделювання)*

9. Калюжний В.Л., Алієва Л.І., Ярмоленко А.С., Ситник С.В., Гаряче видавлювання із високовуглецевої сталі конусних порожнистих виробів. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics and Advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Vol 6, №3. Рр. 112...118, ISSN 2521-1943, DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.3.269897 (фахове видання Категорія Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання процесу моделювання)*

Праці, які додатково відображають результати дисертації

1. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С., Таранець К.К. Гаряче витягування з потоншенням через дві матриці пуансоном спеціального профіля вісесиметричних порожнистих напівфабрикатів із сталі С-60 МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» секція 2 ресурсозберігаючі процеси пластичної обробки матеріалів, Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, с. 96...99. *(Здобувачем виконано моделювання процесу осаджування та обробка результатів моделювання процесу моделювання)*.

2. Ярмоленко О.С., Калюжний В.Л. Гаряче осаджування заготовок із латуні з отриманням виступу у торці донної частини. Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «Інновації, моделювання, технології в машинобудуванні та металургії» – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2021, с. 78...79 *(Здобувачем виконано моделювання процесу осаджування та обробка результатів моделювання процесу моделювання)*.

Калюжний О.В., Ярмоленко О.С. Витягування з потоншенням через одну матрицю з використанням пуансона спеціального профілю порожнистих заготовок із латуні. Том 3 Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском», 2023, с.47...49 *(Здобувачем виконано моделювання процесу осаджування та обробка результатів моделювання процесу моделювання)*.

ABSTRACT

Yarmolenko O.S. Increasing the productivity of plastic formation of axisymmetric brass products with variable wall thickness of long lengths. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - mechanical engineering, specialty 131 "Applied mechanics" - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the study of methods of increasing the productivity of the processes of plastic formation of axisymmetric brass products with a variable wall thickness of a long length, using a special profile tool, to reduce the number of drawing transitions with thinning and crimping during their manufacture.

The analysis of literary sources on existing technologies of plastic formation of products with variable wall thickness was carried out. The technologies include the operations of hot deposition of a cylindrical workpiece and subsequent reverse extrusion of a hollow semi-finished product, subsequent drawing transitions with thinning and crimping. The purpose of the work and tasks for conducting research are formulated.

For the first time, using the finite element method, a calculation analysis of the transitions of hot setting and subsequent reverse extrusion with the distribution of an axisymmetric hollow semi-finished product was carried out, taking into account the accumulated deformations after setting. Power modes, specific force distributions on the tool, stress-strain state of the metal were obtained. The deformation rate is set to withstand the hot deformation mode. The final shape and dimensions of the semi-finished products are obtained, while the semi-finished product, after extrusion, has a protrusion on the end of the bottom part for further shaping of the flange.

The adequacy of mathematical models of hot reverse extrusion of hollow semi-finished products was verified by performing experimental work on hot plastic molding of hollow products from high-strength aluminum alloy. As a result of the conducted research, products of the required shape were obtained by the specified processing of

the metal structure by hot plastic deformation to obtain the specified mechanical properties in the wall and bottom part.

For the first time, with the use of the finite element method and the use of a punch of a special profile, the simulation of the transition of drawing with thinning through two sequentially located matrices and the transition of drawing through one matrix was carried out.

The calculation analysis of drawing with thinning through one matrix by a traditional punch with the provision of obtaining the required shape of the semi-finished product for further crimping and given mechanical properties of the deformed metal in the wall has received further development.

The use of punches of a special profile, in which the side surface is made in the form of sequentially located protrusions and depressions, at the drawing transitions made it possible to create a pulling force for the wall of semi-finished products due to filling the depressions on the surface of the punches with deformed metal, to reduce the values of axial stresses at the point of transition of the wall to the bottom part and unload it and thereby increase the degree of deformation at the drawing transitions and reduce the number of drawing transitions with thinning. At the same time, the amount of curvature of the bottom part during extraction decreases. At the transitions of drawing with thinning, the limit degrees of deformation are set, which ensured cold plastic molding of semi-finished products without destruction.

The dependences of the pulling forces on the movement of the punches, the dependences of the forces on the removal of semi-finished products from the punches, the stress-deformed state of the metal and the shape and size of the obtained semi-finished products have been revealed. At the same time, at the last step of drawing with thinning, the dimensions of the wall in height are set, which ensure the required dimensions of the product after crimping. The third drawing pass was performed with a punch with a cylindrical surface to minimize machining after final crimping. Conical banded matrices were used at all drawing transitions with thinning.

After the first transition of drawing with thinning through two sequentially located matrices in connection with significant distortion of the bottom part, it is

proposed to carry out calibration (alignment) of this part of the semi-finished product. For this, the amount of the required calibration force was determined by finite element modeling and additional processing of the metal structure by cold plastic deformation and revealed shape and dimensions of the semi-finished product.

For engineering calculations of drawing parameters with punch thinning of a special profile using the power balance method and the method of joint solution of approximate differential equations of equilibrium with the condition of plasticity, a theoretical analysis of such a process was carried out for the first time. Taking into account the effect of frictional forces and strengthening of metal during cold plastic forming, analytical dependencies are maintained, which can be used to determine the stress on the contacting surfaces and the deformation force.

In the conditions of semi-hot deformation, the simulation of the deposition process of the flange from the protrusion on the end of the bottom part of the semi-finished product, which was obtained at the first transition of the hot deposition of the cylindrical workpiece, was carried out using the finite element method. Stresses and deformations along the volume of the flange and in the region of the transition of the flange into the bottom part of the semi-finished product are determined. The working of the metal structure by semi-hot deformation is estimated by the distribution of the intensity of the deformation. Forming in the conditions of semi-hot plastic deformation allows to create the necessary macrostructure in the deformed metal in the region of the transition of the flange to the bottom part and to ensure the necessary service properties of the product during its repeated use, and also ensures a reduction in force. The deposition force, the specific force on the deforming tool and the deformation work were determined.

For the first time, a calculated analysis of the crimping process was carried out, taking into account the accumulated deformations in the deformed metal of the semi-finished product after the third drawing transition with thinning. The dependence of the crimping force on the movement of the tool during forming and the magnitude of the specific forces on the surface of the tool was revealed. The final distribution of the stress-strain state in the product is established. Determination of the geometric

characteristics of the product was carried out taking into account the elastic deformation. As a result of crimping, it was possible to obtain a product of the desired shape and size and with the specified mechanical properties in the wall.

Thus, computer modeling using the finite element method obtained all the necessary data for the design of high-performance technology and stamping equipment for the manufacture of hollow products with variable wall thickness of large length from LK 75 brass: effort - for the selection of press equipment; specific effort - for designing die equipment and predicting the stability of the deforming tool; the shape and dimensions and distributions of stresses, deformations and the degree of use of the plasticity resource in the deformed metal - to assess the quality of semi-finished products and products.

For the considered stamping transitions, die structures were developed and designed, which ensure the production of semi-finished products and products of the required shape and size: a die for hot deposition of a cylindrical workpiece; stamp for hot reverse extrusion with cooling of the deforming tool; a stamp for the first drawing with thinning through two successively located matrices and using a punch with a surface of a special profile; stamp for leveling the bottom part of the semi-finished product after the first drawing transition with thinning; stamp for the second drawing with thinning with a punch with a surface of a special profile only on its conical part and the third drawing transition with thinning through one matrix and a punch with a cylindrical surface; stamp for depositing the flange; stamp for crimping the wall of the semi-finished product.

The research results were used in production conditions at the corporation "Tasco" in Kyiv (act on use dated 04.14.2023 No. 170). The proposed technology, in comparison with the existing ones, provides a higher productivity of sleeve manufacturing, saving metal and can be used in production. And they are also used in the educational process at KPI named after Igor Sikorsky in the preparation of bachelors and masters in specialty 131 – applied mechanics (use act dated 05.05.2023).

Key words: finite element method, hot deposition, hot reverse extrusion, cold drawing with thinning, crimping, special profile punch, semi-finished product, die equipment, product with variable wall thickness.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВИГОТОВЛЕННЮ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ДНОМ І ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ	29
1.1. Теоретичні та експериментальні дослідження витягування порожнистих виробів з дном із змінною товщиною стінки великої довжини	29
1.2. Теоретичні та експериментальні дослідження обтиску порожнистих виробів з дном із змінною товщиною стінки великою довжини	65
1.3. Висновки	80
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИК ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ТА ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ ВИРОБІВ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ ІЗ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ	84
2.1. Аналіз параметрів, які впливають на процеси гарячого і холодного пластичного формоутворення	84
2.1.1. Конструктивні параметри	84
2.1.2. Технологічні параметри	84
2.1.3. Фізико-механічні параметри	87
2.2. Методика теоретичних досліджень процесів обробки металів тиском з використанням методу розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності	88
2.3. Методика проведення чисельних експериментів з використанням методу скінченних елементів	91
2.3.1. Використання методу скінченних елементів для аналізу холодної формозміни матеріалів	91

2.3.2.	Скінчено-елементний аналіз кінцевого пружно-пластичного НДС з використанням великих переміщень	93
2.3.3.	Обґрунтування підходів в методі скінчених елементів для здійснення аналізу геометричних та фізично нелінійних задач пружно-пластичного деформування	96
2.4.	Методика проведення експериментальних досліджень	97
2.5.	Висновки по розділу	103
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАРЯЧОГО ПЛАСТИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОРОЖНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ		105
3.1.	Гаряче осаджування циліндричної заготовки	105
3.1.1.	Схема процесу та розрахункові схеми осаджування	105
3.1.2.	Силові режими та питомі зусилля	107
3.1.3.	Напружено-деформований стан заготовки та температурний розподіл	108
3.2.	Гаряче зворотне видавлювання	113
3.2.1.	Схема процесу та розрахункові схеми	113
3.2.2.	Силові режими та питомі зусилля	114
3.2.3.	Напружено-деформований стан металу та температурний розподіл	115
3.3.	Висновки	120
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕРЕХОДІВ ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ		122
4.1.	Аналіз першого переходу витягування з потоншенням напівфабрикату після гарячого видавлювання	122
4.1.1.	Схеми витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці та розрахункові схеми	122
4.1.2.	Силові режими і питомі зусилля	123
4.1.3.	Напружено деформований стан напівфабрикату	126

4.2.	Вирівнювання донної частини напівфабрикату	130
4.3.	Аналіз другого переходу витягування з потоншенням через одну матрицю	135
4.3.1.	Схема та розрахункові схеми витягування пуансоном спеціального профілю	135
4.3.2.	Силові режими та питомі зусилля	136
4.3.3.	Напружено-деформований стан напівфабрикату	138
4.4.	Аналіз третього переходу витягування з потоншенням	145
4.4.1.	Схема витягування з потоншенням через одну матрицю та розрахункові схеми	145
4.4.2.	Силові режими та питомі зусилля	146
4.4.3.	Напружено-деформований стан напівфабрикату	148
4.5.	Аналіз процесу витягування інженерними методами	153
4.6.	Висновки	160
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ НАПІВГАРЯЧОГО ОСАДЖУВАННЯ ФЛАНЦЯ		162
5.1.	Схема та розрахункові схеми	162
5.2.	Силові режими та питомі зусилля	163
5.3.	Напружено-деформований стан напівфабрикату	164
5.4.	Висновки	166
РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ОБТИСКУ		168
6.1.	Схема та розрахункові схеми обтиску	168
6.2.	Силові режими та питомі зусилля	169
6.3.	Напружено-деформований стан при обтиску	171
6.4.	Висновки	176
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ		178

7.1.	Розробка та проектування штампового оснащення для гарячого осаджування	178
7.2.	Розробка та проектування штампового оснащення для гарячого зворотного видавлювання	179
7.3.	Розробка та проектування штампового оснащення для витягування з потоншенням	181
7.4.	Розробка та проектування штампового оснащення для вирівнювання донної частини	185
7.5.	Розробка та проектування штампового оснащення для осадження фланця	186
7.6.	Розробка та проектування штампового оснащення для обтиску	187
7.7.	Висновки	187
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ		189
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		193
ДОДАТКИ		
Додаток А.	Характеристика матеріалів	211
Додаток Б.	Результати розрахунків по гарячому осаджуванню	212
Додаток В.	Результати розрахунків по гарячому зворотному видавлюванню	214
Додаток Г.	Результати розрахунків по витягуванню з потоншенням	217
Додаток Д.	Результати розрахунків по осаджуванню фланця	231
Додаток Е.	Результати розрахунків по обтиску	233
Додаток Ж.	Конструкції штампового оснащення	237
Додаток И.	Акти впровадження	256

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МСЕ – метод скінченних елементів

НДС – напружено-деформований стан

ОНС – об’ємний напружений стан

НУП – наближена умова пластичності

ОМТ – обробка металів тиском

ХОШ – холодне об’ємне штампування

ГОШ – гаряче об’ємне штампування

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час актуальною є тема заощадження ресурсів та збільшення продуктивності процесів виготовлення тонкостінних деталей. Особливо це стосується виробів з товстим дном і високою тонкою стінкою змінної товщини з потрібними механічними властивостями та розмірами, а також з виступаючими елементами більшими за діаметр стінки виробу. Для їх виготовлення широко застосовуються процеси витягування з потоншенням. Тому актуальними є розглядати традиційні процеси витягування за допомогою штампів.

Але, використовуючи звичайні процеси витягування з потоншенням, важко отримати високий виріб з тонкою стінкою за один перехід, - це вимагає великої кількості переходів, що виходить затратно, також немає можливості відразу отримати виступаючі елементи типу фланця на дні виробу, діаметр якого перевищує діаметр зовнішньої стінки, або отримати виступ над дні виробу.

Одним із способів виготовлення таких деталей може бути поєднання процесів гарячої та холодної обробки тиском. За допомогою перших можна отримувати профільовані заготовки з меншим зусиллям і потрібними виступаючими елементами, при застосуванні других можна отримати тонкостінний високий виріб з точними розмірами і потрібними характеристиками. Тому актуальною задачею є дослідження вище згаданих процесів та застосування їх для вдосконалення існуючих технологічних процесів. Використання гарячого видавлювання дозволить отримати заготовку близької форми та сформувати виступаючі елементи, після чого, за допомогою витягуванням з потоншенням, отримати заготовку з тонкою стінкою. Виготовлені за такою технологією вироби можуть бути застосовані в цивільній та військових галузях.

В даний час однією з вимог сучасної конкурентоспроможної технології є її швидке впровадження на виробництві. Але проектування такого виду технології вимагає накопичених знань по силовим режимам формування, визначення необхідної геометричної форми заготовки та напівфабрикатів на переходах, розрахунку характеристики напружено-деформованого стану для отримання

необхідних механічних характеристик матеріалу в готовому виробі, що вимагає багатьох експериментальних досліджень та розрахунків. Для швидкого встановлення зазначених параметрів потрібно використовувати методи комп'ютерного моделювання, що забезпечить менші витрати на дослідження, знаходження оптимальної способу виготовлення та швидкого впровадження на виробництві, та призведе до отримання конкурентоспроможного продукту. Темою дослідження буде підвищення продуктивності процесів формоутворення таких виробів за рахунок скорочення кількості переходів видавлювання, витягування з потоншенням і обтиску, що зменшить собівартість та пришвидшить виготовлення продукції. Для вирішення поставленої задачі будуть проведені теоретичні дослідження за допомогою комп'ютерного аналізу методом скінченних елементів та експериментальні дослідження в умовах виробництва, що дозволить розробити технологію виготовлення тонкостінних виробів великої довжини зі змінною товщиною стінки та спроектувати штампове оснащення для отримання виробів з необхідними властивостями.

Мета та завдання дослідження: Метою роботи є підвищення продуктивності процесів холодного витягування з потоншенням та обтиском для отримання порожнистих вісесиметричних виробів зі змінною товщиною стінки великої довжини за рахунок скорочення кількості переходів.

На основі аналізу літературних джерел в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Із використанням методу скінченних елементів створити математичні моделі та провести комп'ютерний аналіз гарячого осаджування циліндричної заготовки та гарячого зворотного видавлювання з роздачею в рухомій матриці вісесиметричного порожнистого напівфабрикату із латуні під подальше витягування з потоншенням. На стадії осаджування передбачити формоутворення кругового виступу на торці під подальше отримання фланцю. Встановити необхідний підігрів деформуючого інструмента та швидкість деформування для забезпечення температурного інтервалу осаджування і видавлювання, виявити зусилля деформування, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті

та встановити характеристики напружено-деформованого стану при формоутворенні.

2. Методом скінченних елементів створити математичні моделі та виконати комп'ютерний аналіз переходів холодного витягування з потоншенням напівфабрикату попередньо сформованого гарячим видавлюванням, з наступним отриманням напівфабрикату заданої форми та потрібними властивостями здеформованого металу під подальший обтиск. При цьому, для підвищення продуктивності витягування і точності форми донної частини, використати пуансон спеціального профілю для створення тягнучого зусилля за стінку здеформованого напівфабрикату. Встановити граничні ступені деформації на переходах витягування, виявити силові режими, питомі зусилля, роботу деформації, характеристики напружено-деформованого стану здеформованих заготовок по переходах витягування та кінцеві форми і розміри напівфабрикатів на всіх переходах.

3. Для процесу витягування з потоншенням із прикладанням тягнучого зусилля за стінку здеформованої заготовки з використанням методу спільного розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності, отримати аналітичні залежності для визначення напруженого стану та зусилля витягування, які можуть бути використані при інженерних розрахунках параметрів такого витягування.

4. Провести комп'ютерний аналіз процесу пластичного формоутворення фланця на торці напівфабрикату з формуванням необхідної макроструктури металу у місці переходу фланця у донну частину, яка забезпечить потрібну довговічність виробу при експлуатації. При цьому визначити параметри для реалізації формоутворення фланця на пресовому обладнанні.

5. З урахуванням накопичених деформацій у напівфабрикаті після останнього переходу витягування з потоншенням створити математичну модель та провести моделювання процесу холодного обтиску в матриці з деформуючою поверхнею спеціального профілю для отримання виробу кінцевої форми і розмірів та з заданими механічними властивостями здеформованого металу. При

цьому встановити силові режими формоутворення, питомі зусилля на деформуючому інструменті та форму і розміри виробу.

6. З використанням результатів комп'ютерного моделювання виконати розроблення, здійснити проектування конструкцій штампового оснащення для гарячого осаджування і видавлювання, переходів холодного витягування та формоутворення виробу обтиском.

7. Впровадити результати роботи на виробництві та в навчальному процесі.

Об'єкт дослідження: процеси гарячого осаджування та зворотного видавлювання, витягування з потоншенням та формоутворення обтиском вісесиметричних порожнистих виробів із змінною товщиною стінки великої довжини.

Предмет дослідження: закономірності впливу конструктивних та технологічних факторів при виготовленні вісесиметричних порожнистих виробів зі змінною товщиною стінки на технологічних переходах осаджування, видавлювання, витягування з потоншенням і обтиску для отримання виробу з заданими геометричними формою, розмірами із необхідним зміцненням матеріалу в готовому виробі.

Методи дослідження: використовуючи метод скінченних елементів та програму DEFORM провести чисельні моделювання по встановленню впливу конструктивних та технологічних факторів на напружено-деформований стан, силові режими, питомі зусилля та залежності при формуванні заготовки та напівфабрикатів на переходах осаджування, видавлювання, витягування з потоншенням та обтиску для отримання кінцевого виробу. Експериментальні дослідження провести на універсальному пресовому обладнанні для процесу гарячого видавлювання в лабораторних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше проведено розрахунковий аналіз методом скінченних елементів переходів гарячого осаджування та видавлювання з роздачею

порожнистих вісесиметричних напівфабрикатів із змінною товщиною стінки з латуні. Встановлено технологічні параметри температури підігріву інструменту та швидкості переміщення деформуючого інструменту, які забезпечують оптимальне протікання процесів гарячого деформування. Отриманні дані напружено-деформованого стану, силових режимів, розподілу питомих напружень на інструменті і кінцеві форми та розміри напівфабрикату.

2. Вперше виконаний розрахунковий аналіз з використанням методу скінченних елементів двох переходів витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці та одну матрицю з використанням пуансона спеціального профілю і переходу традиційного витягування з потоншенням по довжині виробу для отримання заданої форми та товщини стінки з необхідними механічними властивостями здеформованого металу в ній. Встановлені граничні можливості формування по граничним ступеням деформації на перших двох переходах витягування з потоншенням і необхідний ступінь деформації для отримання необхідних механічних властивостей при подальшому деформуванні обтиском. Отримані значення зусилля від переміщення інструменту, напружено-деформованого стану, розподіли питомих зусиль на поверхні деформуючого інструменту на кожному з переходів витягування з потоншенням.

3. Вперше проведено чисельне моделювання процесу обтиску з урахуванням зміцнення матеріалу на переході витягування з потоншенням порожнистого виробу зі змінною товщиною стінки великої довжини для отримання необхідної кінцевої форми та розмірів та заданими механічними властивостями в матеріалі після формоутворення, без втрати стійкості в матеріалі. Отримані значення по розподілу питомих зусиль на інструменті, залежності силових режимів при деформуванні. Визначено кінцевий напружено-деформований стан в виробі.

4. З використанням методу балансу потужностей і методу спільного вирішення наближених диференціальних рівнянь рівноваги вперше проведений аналіз витягування з потоншенням з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки. Отримані аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля

деформування з урахуванням дії сил тертя та зміцнення металу при холодному формоутворенні.

Особистий внесок здобувача

При написанні дисертаційної роботи було використано ідеї та навички набуті при проведенні досліджень. Основна тема дисертаційної роботи є прямим продовженням раніше розпочатої роботи виконаної в магістерській дисертації. При виконанні автором досліджень та написанні роботи було розроблено математичні моделі та проведено моделювання процесів за допомогою методів скінченних елементів гарячого осаджування, гарячого зворотного видавлювання, трьох переходів витягування з потоншенням, осаджування фланця та обтиску. Визначено напружено-деформований стан, питомі зусилля на інструменті, температурний розподіл для гарячих процесів, силові режими. Також спроектовано штампове оснащення для всіх вищезгаданих переходів виготовлення деталі.

Апробація результатів роботи Матеріали дисертації повідомлені і обговорені на Міжнародних науково-технічних конференціях: X міжнародна науково-технічна конференція “Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії”, Харків 2018; XX Міжнародна науково-технічна конференція “Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, Київ 2019; XII Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”, Київ 2021; XII міжнародній науково-технічній конференції “Інновації, моделювання, технології в машинобудуванні та металургії” Харків 2021 р.; XII Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти” Київ 2021; XX Міжнародна науково-технічна конференція “Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку” Краматорськ–Тернопіль

2022; XIII Міжнародної науково-технічної конференції. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском, Київ 2023.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Матеріал представлений на 326 сторінках машинописного тексту, у тому числі 173 сторінок основного тексту, 212 малюнків, 1 таблиця, список використаних джерел 167 найменувань та 8 додатків, на 126 сторінках.

Достовірність основних наукових положень та висновків:

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів в дисертаційній роботі доводиться за допомогою використання положень теорії пластичності при гарячій та холодній пластичній деформації; використовуючи МСЕ проводиться обґрунтування розроблених математичних моделей; отримані результати відповідають розв'язкам досліджень описаних в літературних джерелах, та їх теоретичним і експериментальним результатам.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами:

Дослідження дисертаційної роботи виконувалося в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи №2038п(0117U000499) "Технологічні основи високопродуктивного виробництва заготовок та холодного штампування з них виробів зі стінкою змінної товщини, яка виконується на кафедрі "Технології виробництва літальних апаратів" в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського "; розробка інноваційних технологій штампування гільз для артилерійських снарядів для промислових підприємств України (д/б №2318п)

Практичне значення отриманих результатів Практичне значення мають наступні результати роботи:

1. Встановлено параметри процесу гарячого осаджування циліндричної заготовки. Отримано дані по напружено-деформованому стану напівфабрикату, силових режимах в залежності від переміщення інструменту, температурному розподілу. Визначено питомі зусилля на поверхні деформуючого інструменту.

2. Встановлено параметри процесу гарячого видавлювання з роздачею. Визначено напружено-деформований стан, силові режими та переміщення, питомі напруження на інструменті, температурний розподіл в напівфабрикаті.

3. Досліджено ефективність використання інструменту з спеціальним профілем поверхні, утвореної перетином торів при витягуванні з потоншенням. Встановлення параметрів процесів проводилося для інструменту в якого була невелика частина поверхні спеціального профілю та з поверхнею спеціального профілю, яка контактувала з напівфабрикатом по всій поверхні стінки зсередини та його вплив на скорочення кількості переходів витягування з потоншенням. Встановлено напруження та деформації по об'єму напівфабрикату при використанні такого інструменту на двох переходах витягування з потоншенням. Визначено переміщення та зусилля.

4. Досліджено процес осаджування фланця з попередньо отриманого виступу на дні напівфабрикату. Отримано дані по напруженням та деформаціям у дні напівфабрикату. Силові режими та переміщення інструменту.

5. Встановлено параметри процесу обтиску тонкостінного напівфабрикату зі змінною товщиною стінки. Досліджено напружено-деформований стан, силові режими та переміщення. Отримано кінцеву форму та розміри напівфабрикату.

6. Розроблено конструкцію штампу для гарячого осаджування циліндричної заготовки.

7. Спроектовано штамп для гарячого зворотного видавлювання з попередньо осадженої заготовки.

8. Спроектовано штампи для трьох переходів витягування з потоншенням. А також штамп для вирівнювання дна після першого витягування з потоншенням.

9. Спроектовано штамп для обтиску стінки виробу отриманого витягуванням з потоншенням.

10. Для інженерних розрахунків параметрів витягування з потоншенням з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки запропоновані аналітичні залежності для визначення зусилля витягування та питомих зусиль на деформуючому інструменті.

Публікації: Матеріали дисертації було опубліковано в 9 статтях у фахових виданнях, опубліковано 3 тези на конференціях.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВИГОТОВЛЕННЮ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ДНОМ ІЗ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ

1.1. Теоретичні і експериментальні дослідження по витягуванню порожнистих виробів з дном із змінною товщиною стінки великої довжини

Дослідження процесу витягування з потоншенням проведено в наступних роботах.

В статті [1] розробка процесу витягування з потоншенням банок з полімерним покриттям. Дослідження проводилися з використання чисельних та експериментальних методів. Були отримані дані по впливу кута матриці та швидкості деформування на зусилля та тертя на поверхнях. При моделюванні застосовували довільний метод Лагранжа Ейлера. Поведінку металу та полімеру описували за допомогою стисливої моделі Леонова з функцією в'язкості Боднера-Партома та Ейрінга. Проводили порівняння експериментальних з чисельними дослідженнями на сталевих та алюмінієвих заготовках.

Результати дослідження процесу глибокого витягування показані в статті [2]. В якості експериментальних матеріалів використали St1403 і AlMg3. Встановлений характер розподілу напружень по чашці. Отримано дані які дозволяють зменшити залишкові напруження в заготовці при зменшенні навантаження, також досліджено, що кількість переходів витягування істотно не впливає на величину залишкових напружень. Також визначено що величина залишкових напружень відрізняється для матеріалів St1403 і AlMg3.

Вивчення впливу на процес витягування з потоншенням різних параметрів вивчали в статті [3]. Метою дослідження було отримання рівної поверхні чашки, так як при витягуванні потовщується стінка зверху чашки. При експерименті змінювали умови процесу - зменшували товщину, вплив тертя при різних видах змащення, вплив термічної обробки. В результаті був підібраний оптимальний стан, який дає найкращі результати.

При проведенні моделювання витягування в статті [4] було встановлено, що витягування відбувається в короткій зоні контакту в матриці. А також визначено, що зі зміною кута матриці, збільшення зменшення товщини потоншення матеріалу та коефіцієнту тертя, можна скорочувати чи збільшувати зону, в якій відбувається формування при витягуванні.

Дослідження проведені в статті [5] направлені на знаходження оптимальних умов при яких можна отримати гладку і рівномірну стінку. При проведенні роботи витягували алюмінієві заготовки, при цьому змінювали параметри товщини стінки, проводили термічну обробку заготовок та змінювали коефіцієнт тертя.

Процес формування витягуванням чашки з нерівномірною товщиною розглянуто в статті [6]. Були отримані рівняння для напружень та зусилля використовуючи елементарну теорію пластичності. Проведено теоретичне дослідження за допомогою методу скінченних елементів. При проведенні експерименту було перевірено отримані результати теоретичного моделювання.

Дослідження характеристик процесу витягування з потоншенням через дві матриці було проведено в статті [7]. Дослідження проводилися експериментально з подальшим опрацюванням результатів у вигляді графіків та залежностей напружень та деформацій. В якості експериментального матеріалу використали листовий матеріал А А3104 Н19.

Було проведено моделювання глибокого витягування в статті [8]. В результаті дослідження проведеного зі зміною видів кінцевих елементів теоретично і експериментально вивчаючи вплив зміни параметрів форми інструменту, коефіцієнту тертя на зусилля та напруження, що виникають в процесі витягування. Дослідження проводили на кількох видах матриць. В результаті було встановлено, що формула Зібелля більш точніше відображає результати моделювання і використовуючи елементи типу shell можна отримати більш вірогідні прогнози, ніж при використанні чотири вузлових суцільних елементів.

Визначення параметрів які впливають на витягування з потоншенням та порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень проводилося в статті [9]. При проведенні експерименту змінювали радіуси пуансонів та матриць. Встановлено вплив швидкості витягування на отримані результати. При збільшенні швидкості витягування збільшується розбіжність отриманих і прогнозованих результатів.

Оптимізація процесу витягування з потоншенням описана в статті [10]. Використовуючи метод скінченних елементів було проведено визначення впливу геометрії інструменту та тертя на зусилля витягування на протязі всього процесу. Отримані результати представлені у вигляді залежностей на графіках зусилля-переміщення інструменту.

Узгодження результатів теоретичного та експериментально дослідження проводилося в статті [11]. В якості матеріалу було використано сталь FePO 5MBH. При проведенні дослідження використовували програму ABAQUS за допомогою якої визначили розподіл залишкових напружень по товщині сталюго листа.

Зменшення зусилля при витягуванні з потоншення двічі проводилося в статті [12]. При виконанні роботи було встановлено мінімальний та максимальний коефіцієнт, ступінь витягування та коефіцієнт тертя та їх вплив на процес витягування. Основною метою роботи було отримати найменше зусилля глибокого витягування з оптимальними параметрами та скорочення витрат енергії на виконання процесу. Дослідження проводилось теоретично та експериментально.

В статті [13] розглядається процес витягування з потоншенням труби. При проведенні теоретичного дослідження визначається витрата енергії на тертя, отримані математичні вирази, які дозволяють оцінити її. Важливими результатами було дослідження умови виникнення та виявлення дефектів, які пов'язані з впливом тертя, яке виникає в процесі витягування.

Вивчення залишкових напружень та інтенсивності напружень, які виникають в процесі витягування та після при зміні геометрії та розмірів

інструменту, проводилось в статті [14]. Також вирішувалася проблема з отриманням даних пружиніння матеріалу після витягування. При витягуванні використовували циліндричний та конічний пуансони.

Технологічні режими операції витяжки було досліджено в роботі [15]. Операція витяжки проводилась для вісесиметричних заготовок з анізотропними властивостями матеріалу. В результаті експериментальних та теоретичних досліджень встановлено силові режими деформування та напружено-деформований стан заготовки. А також можливості граничної формозміни витяжки заготовок при потоншенні її стінки з анізотропними властивостями матеріалу. При порівнянні експериментальних та теоретичних досліджень було встановлено, що дані співпадають. Було досліджено і виведено залежності зміни зусилля від величини тертя на пуансоні та матриці окремо. Також проводилась зміна кута матриці для визначення збільшення величини граничного коефіцієнта витягування.

Вивчення різностінності заготовок проводилося в статті [16]. Було досліджене витягування з потоншенням через дві матриці. Величина різностінності досліджувалася при зміні ступеня деформації у верхній матриці. Також використовували сталі та латунні заготовки, які пройшли відпал в одному випадку та які були механічно зміцнені в іншому випадку. Результати були представлені у вигляді залежностей величини різностінності від ступеня деформації. Встановлено величину ступеня деформації при якому різностінність найменша.

Порівняння експериментально отриманих результатів витягування полоси з теоретичними наведено в статті [17]. При дослідженні визначали характеристики процесу в зоні деформації завдяки установці, яка могла змінювати характеристики процесу витягування. Було визначено величину тертя та зусилля процесу. В якості матеріалу заготовок використовували сталь та алюміній, також проводилася зміна матеріалу інструменту.

Витяжка з потоншенням товстостінних заготовок яка застосована для анізотропних матеріалів описана в статті [18]. Досліджувалися силові режими та

граничні можливості для вісесиметричної витяжки з потоншенням. Тут були отримані результати для циліндричних зразків які застосовуються при витягуванні висотою до 10 діаметрів. Для проведення дослідження були отримані основні рівняння і співвідношення для пластичної течії металу та математична модель для операції витяжки з потоншенням. Для визначення напружень в осередку деформації були використані рівняння теорії пластичності, також зараховувалися зусилля для подолання тертя та сила яка передається на стінку заготовки. Розрахунки проводяться теоретично для наступних видів матеріалу: сталь 08ПК, 11ЮА, латунь Л63, алюмінієвий сплав АМгбМ, заготовки яких мають наступні розміри: $S=4\text{мм}$ і $D=40\text{мм}$. З досліджень видно, що оптимальний кут конусності матриці знаходиться в межах $12...18^\circ$ при яких спостерігається найменше зусилля. Експериментально було проведено дослідження для сталі 11ЮА.

Аналіз методом скінчених елементів витяжки з потоншенням проводився в статті [19] з урахуванням деформаційного руйнування напівфабрикату. В роботі показані оцінка ступеня використання ресурсу пластичності при моделюванні операцій при руйнуванні заготовки. Досліджуваний процес витяжки з потоншенням використовується в серійному виробництві. При вивченні руйнування та моделювання дефектів було розглянуто два підходи. Перший враховує виникнення тріщин та пор з урахуванням граничних умов в конструкції та вивчення подальшого розвитку тріщини при моделюванні з перебудовою сітки. Другий підхід не розглядає ріст дефектів та проводить оцінку ступеня пошкодження. Для моделювання використовувалася програма Ansys, матеріал сталь 08КП. В результаті була розроблена модель для розрахунку, яка враховує накопичення пошкоджуваності матеріалу при витягуванні.

Стаття [20] описує витяжку з потоншенням стінки заготовки, матеріал якої анізотропно зміцнюється. Були проведені як теоретичні так і експериментальні дослідження потоншення стінки в циліндричних деталях. В результаті встановлено вплив на силові параметри технологічних режимів і граничні можливості формування заготовки. Для теоретичних досліджень були отримані

формули для розрахунку параметрів. Величини конусності матриці були в межах $6...18^\circ$. При розрахунку на комп'ютері були виконані обчислення для матеріалів: сталь 80кп, латунь Л63, алюмінієвого сплаву АМг2М. Було встановлено залежності коефіцієнтів витягування від кута конусності матриці для латуні Л63. При підібраних коефіцієнтах тертя для алюмінієвого сплаву АМг2М, сталі 08кп, та латуні Л63 були отримані граничні коефіцієнти витягування з потоншенням. Експериментальна частина проводилась в університеті ТулГУ для заготовки отриманої витягуванням діаметром 101,6 мм і товщиною стінки 12 мм яка пропускала через матриці 100,4 мм, 96,8 мм та 93,2. Кут матриць знаходився в межах $6...30^\circ$. При порівнянні теоретичних та експериментальних результатів похибка становила 5%.

Підбір коефіцієнтів витяжки з потоншенням приведений в статті [21]. Описані основні обмеження витяжки з потоншенням. Приводяться види дефектів, які можуть виникати при неправильно підібраних коефіцієнтах. Для зменшення різностінності пропонують використовувати витягування через дві матриці. Також для визначення закономірності збільшення чи зменшення різностінності приведений графік для сталі 11кп та біметалу.

Розрахунки можливості отримання деталі велися через підбір сумарного показника деформації. Задані характеристики матеріалу після витягування визначаються за допомогою номограми (можна визначити твердість по Віккерсу). В кінці приведені формули для розрахунку основних параметрів (розмірів) інструменту для витягування.

Моделювання процесу витягування з потоншенням для циліндричних вісесиметричних деталей проводилося в роботі [22]. Розрахунки проводилися за допомогою ЕВМ для великих пластичних деформацій, які виникають при обробці металів тиском. В якості результатів було визначено напружено-деформований стан в процесі витягування з потоншенням. Розрахунки циліндричних деталей засновані на Лагранжевому підході. Стаття приводить опис основних рівнянь Лагранжевого підходу: рівняння збереження маси, кількості руху, збереження енергії та порядок проведення розрахунку. В другій частині проводилась оцінка

пошкоджуваності матеріалу в процесі витягування з потоншенням та показані рівняння, які враховують різні фактори пошкоджуваності. Третя частина описувала результати моделювання в програмі Ansys LS DYNA. Результатом якого був розрахунок НДС витягнутої деталі з урахуванням пошкоджуваності.

Розробка методики для визначення пошкоджуваності матеріалу під час витяжки з потоншенням розроблялася в статті [23]. Для визначення коефіцієнта пошкоджуваності було взято дані з діаграм граничної пластичності і пластичної ділатансії матеріалів, які були отримані в результаті стандартних випробувань. Розрахунок параметрів вівся за методикою Колмогорова для визначення граничних степенів деформації. В якості матеріалів для прикладу розрахунку були взяті сталь 11ЮА, латунь Л68, сплав АМг2, для яких приведені параметри пошкоджуваності матеріалів. Визначення параметрів ділатансії проводилося для сталей У8А, сталі 09Г2 та сталі 12Х2Н3А. В висновку визначено що схема НДС витяжки з потоншенням близька до розтягу і на основі діаграми для розтягу можна визначати коефіцієнти для витяжки.

Результати по дослідженню механічних властивостей циліндричних деталей при комбінованій витяжці, яка застосована на першому переході, приведено в роботі [24]. Були проведенні як теоретичні, так і експериментальні дослідження першої комбінованої витяжки матеріалу, який анізотропно зміцнюється в радіальних та конічних матрицях. Закономірності впливу на зміну механічних властивостей матеріалу вивчалися при різних коефіцієнтах витяжки і коефіцієнтах тертя як на пуансоні, так і на матриці, а також при зміні радіусу матриці. Встановлено, що коефіцієнт витяжки, кут конусності матриці та радіус заокруглення матриці практично не впливають на зміну коефіцієнтів анізотропії. Але приведено графіки для матеріалів міді М1 та алюмінієвого сплаву АМг2М на яких показано сильний вплив на механічні властивості коефіцієнта витягування.

Дослідження деформування попередньо витягнутих циліндричних деталей на наступній операції приведено в статті [25]. Для розв'язання питання комбінованої витяжки з потоншенням була запропонована математична модель для анізотропно зміцнюваного матеріалу при подальшій обробці. Описано

напружений стан осередку деформації в деталі при витягуванні на різних стадіях. Для аналізу процесу отримані формули для НДС при застосуванні яких є можливість дізнатися його при комбінованому витягуванні.

Була запропонована математична модель для вивчення комбінованого витягування в конічній матриці на першій операції в статті [26]. Матеріал приймався як анізотропно зміцнюваний. Приведений опис основних переваг та недоліків та стадій комбінованого процесу витягування з потоншенням. Тертя між інструментом і заготовкою бралось за Кулоном. Для кожної з описаних стадій процесу витягування в статті є математичний опис компонентів напружень та деформації заготовки в різних напрямках. Приведено основні рівняння та співвідношення для теоретичного аналізу. При визначенні напружень застосовувався метод балансу потужностей.

В статті [27] описано теоретичні дослідження очікуваних властивостей в матеріалі заготовки при першій операції витягування. Для комбінованого витягування застосовувалися матриці конічного і радіального профілю. Приведені приклади робіт, де проводилися подібні дослідження. Результатами роботи стали визначення зміни анізотропії механічних властивостей в деформованому матеріалі. Проаналізовано графічні залежності, з яких видно, що основний вплив на механічні властивості чинить степінь деформації, а зміна радіусів та кута матриці не чинять значний вплив. Також в залежності від відносної висоти коефіцієнт анізотропії властивостей може змінюватися як в більшу, так і меншу сторони.

В статті [28] були представлені результати експериментальної роботи по дослідженню процесу глибокого витягування з потоншенням. Були проведені прикладне та реальне моделювання процесу витягування з потоншенням. Отримано оптимальні значення для більшості параметрів які впливають на процес витягування з потоншенням. Загалом дослідження були направлені на зменшення зусилля процесу витягування.

Зміну силових режимів при витягуванні з потоншенням матеріалу заготовки з анізотропними властивостями вивчено в статті [29]. Для дослідження в роботі

розглянули деформування вісесиметричної циліндричної заготовки з товстою стінкою. Тертя на поверхнях заготовки і інструменту враховувалося по Кулону. Були використані формули для визначення швидкостей деформації, величин інтенсивності деформації. Визначення напружень проводилось в осередку деформації через рівняння рівноваги. В результаті було отримано формули для визначення зусилля процесу витягування. Для оцінки напруженого стану в статті приведені залежності напружень від кута матриці. Криві, за якими можна визначити значення напружень, приведені для різних величин коефіцієнта витягування. Матеріалом заготовки для дослідження була сталь 08кп. Також приведені графіки для визначення зусилля процесу і залежності від тертя, кута матриці та відносної товщини матеріалу. Робота мала продовження при проведенні експерименту та виконувалася за державним контрактом.

Дослідження процесу витягування з потоншенням в клиновому каналі в режимі повзучості проводилося в роботі [30]. Матеріал прийнятий з анізотропними властивостями. Були визначені швидкості деформації за асоційованим законом текучості. Граничні можливості для деформування металу враховували за рекомендаціями Колмогорова і Богатова для деталей з відповідальними режимами експлуатації. Була розроблена математична модель для витягування і отримані основні рівняння та співвідношення для описання течії матеріалу. Межу грачних властивостей при деформуванні досліджували при зміні кута матриці і швидкості переміщення пуансона. Приведені графіки залежності коефіцієнта витягування від кута матриці, та від швидкості переміщення пуансона. Було встановлено, що при малих кутах матриці зміна коефіцієнту тертя між інструментом і заготовкою чинить суттєвий вплив на граничний коефіцієнт витягування. Досліджувалися алюмінієві і титанові сплави. Робота виконувалася за державними контрактами в рамках цільової програми.

Для можливості дослідження деформування вісесиметричних циліндричних товстостінних деталей з анізотропним матеріалом в конічній матриці в статті [31] запропонований підхід для аналізу процесу їх деформування. Розглянута задача вирішувалася в циліндричній системі координат, тертя враховувалося за Кулоном.

Були знайдені за рівняннями компоненти швидкостей деформацій, компоненти інтенсивності деформацій. Напруження знаходили в осередку деформації за рівняннями теорії пластичної течії анізотропного матеріалу. Для витягування враховувалась різка зміна течії матеріалу при переході від вертикальної течії до горизонтальної. При розрахунку зусилля враховувалися як сили деформації, так і сили на подолання тертя. Отримані співвідношення надають можливість розраховувати процеси витягування товстостінних заготовок.

Для покращення технології виготовлення пустотілих циліндричних деталей в статті [32] запропоновано застосування методу комбінованого витягування. В статті описуються етапи розробки технологічного процесу, розрахунок розмірів інструменту на кожному з переходів, кількості необхідних операцій, визначення розмірів напівфабрикатів по операціям, підбиралися коефіцієнти потоншення для деталі, що деформується. Важливим етапом є обчислення зусилля процесу для підбору обладнання. Кінцевим етапом є оцінка механічних властивостей матеріалу, які отримуються в готовій деталі. Для прикладу приведено технологічний процес виготовлення деталі «Корпус». Оптимізація, яка була проведена в роботі, дозволила зменшити кількість операцій в два рази, собівартість виготовлення деталі на 20%.

Деформування під час витягування з потоншенням матеріалу з анізотропними властивостями в режимі короткочасної повзучості досліджувалося в роботі [33]. Для циліндричних деталей, в яких матеріал має анізотропні властивості, встановлено граничні можливості деформування в умовах в'язкопластичної течії металу. Була розроблена математична модель для розрахунку властивостей матеріалу заготовки при її деформуванні. Течія металу приймається в умовах плоскої деформації. Тертя на контактних поверхнях між заготовкою і інструментом враховувалося за Кулоном. Були отримані співвідношення для розрахунку напруженого і деформованого стану заготовки, а також силових режимів формозміни заготовки. В результаті були отримані параметри процесу на першій операції і графіки, за якими можна визначити коефіцієнт витягування в залежності від зміни кута матриці, та графік залежності

коефіцієнту витягування від швидкості. Робота виконувалася за держзамовленням.

Граничні можливості при витягуванні з потоншенням анізотропного матеріалу в режимі повзучості вивчалися в статті [34]. Розглянуто процес тільки з врахуванням пластичних деформацій та пошкоджуваності матеріалу. Течія металу бралася в умовах плоскої деформації. Були отримані формули для розрахунку компонент швидкостей деформації в циліндричній системі координат. Для встановлення граничних можливостей деформування матеріалу дослідження проводилися в залежності від коефіцієнту потоншення. В результаті представлена графічна залежність коефіцієнту потоншення від швидкості деформування при куті матриці 18° та коефіцієнтах тертя на пуансоні 0,1 та на матриці 0,2. Робота виконувалася по державній програмі.

Дослідження процесу першого комбінованого витягування показані в статті [35]. Дослідження проводилися експериментально для відпрацювання технології при використанні в серійному та масовому виробництвах. В якості досліджуваних матеріалів було взято сталі 08кп, латунь Л63, алюмінієві сплави АМг2М, АМг6М та мідь М1. Для визначення силових параметрів використовували мездози та шлейфовий осцилограф. Для кожної групи проводилися по декілька дослідів та порівнювалися теоретичні та експериментальні результати. Розбіжність результатів була в межах 5%. Представлені графічні залежності дозволяють оцінити вплив заокруглення матриці на зусилля процесу при різних коефіцієнтах витягування для сталі 08кп. Зміну граничного коефіцієнта витягування з потоншенням для алюмінію АМг2М, АМг6М показується залежності від зміни кута матриці.

Прогнозування та розрахунок пошкоджуваності матеріалу яка виникає при проведенні витягування за потоншенням висвітлено в статті [36]. Дані дослідження дозволяють точно враховувати і прогнозувати фізико-механічні властивості матеріалу в готових виробах. Для цього було отримано рівняння, які описують процес накопичення дефектів і виведено графік залежності граничної деформації та коефіцієнту розриву матеріалу. Заготовками були п'ять зразків

зі сталі 11ЮА. Результатом було визначення напружено-деформованого стану, граничні степені деформацій та коефіцієнти пошкоджуваності на подальших операціях витягування з потоншенням.

В патенті [37] описано спосіб отримання гільз з заготовки з прутка, яким після видавлювання доводять витягуванням висоту стінки до потрібної висоти.

Процес дослідження витягування з потоншенням чашок невеликого розміру і тонкою стінкою зі сталі AISI 304 було представлено в статті [38]. Було описано проблему отримання таких виробів при глибокій витяжці з цього матеріалу. Результати дослідження дозволяють отримувати потрібні якісні вироби за три переходи без змащення. Отримані дані підтверджені експериментальними дослідженнями.

В статті [39] описується метод отримання заготовок точних розмірів з якісною поверхнею. Дані вироби застосовуються в медичній сфері. Запропоновано метод підвищення якості зовнішньої поверхні за допомогою чисельного моделювання. Дані дослідження використовують для визначення фізичних параметрів критерію руйнування Кокрофта-Латама. Дослідження проводилися теоретично і експериментально.

Механічні властивості в матеріалі при витягуванні з потоншенням та вплив різностінності на них досліджено в статті [40]. При проведенні аналізу технологічного процесу штампування враховувався вплив геометричної форми деформуючого інструменту на багатоопераційних витяжках. Встановлено що особливо зміна властивостей спостерігається в оболонках з тонкою стінкою. При дослідженні процесу витягування з потоншенням проводилася оптимізація існуючого технологічного процесу. Контроль властивостей та розмірів проводився на перерізах заготовки. Вивчали структуру, різностінність, твердість, степінь накопиченої деформації і її розподіл в різних перерізах заготовки. Технологічний процес включав 4 операції витягування з потоншенням. В результаті встановлено, що при отриманні різностінності вона успадковується на наступних операціях та розроблена математична модель, яка її показує. Зазначені

рекомендації, як враховувати різностінність при проектуванні нових технологічних процесів.

Вивчення силових режимів проводилося в статті [41]. Розглядався процес витягування з потоншенням товстостінних вісесиметричних заготовок. Процес розглядався в циліндричній системі координат, тертя приймалося за Кулоном. В використаних співвідношеннях розраховували значення компонент швидкостей деформації, а також їх значення при нестискаємості матеріалу, інтенсивності деформації. В осередку деформації визначили компоненти напружень в циліндричній системі координат. Отримані формули для визначення зусилля процесу витягування враховують зусилля в осередку деформації та сили на подолання тертя. Представлені графічні залежності, які дозволяють оцінити зміну осьового напруження від кута матриці при різних коефіцієнтах потоншення, оцінити зміну зусилля в залежності від відносної товщини при зміні коефіцієнту потоншення (змінним був коефіцієнт тертя на пуансоні та матриці). Графіки загального коефіцієнту тертя також дозволяють оцінити зміну зусилля в залежності від коефіцієнту витягування з потоншенням при зміні коефіцієнту тертя та кута матриці. Дослідження виконанні по держпрограмі та грантам.

Дослідження по граничним можливостям витягування з потоншенням матеріалу з анізотропними властивостям для товстостінних циліндричних заготовок показано в роботі [42]. Дослідження стосувалися як витягування з потоншенням з пруткового матеріалу, так і з листового. Процес проводився в конічній матриці, тертя між заготовкою та інструментом враховувалося за Кулоном. Використанні залежності дозволяють оцінити напружено-деформований стан, інтенсивність деформації та ступінь використання ресурсу пластичності. Досліджуваним матеріалом заготовки була сталь 08кп. Отримані графічні залежності показують зміни інтенсивності деформацій від відносної товщини стінки при сталих коефіцієнтах тертя та кута матриці та накопичену пошкоджуваність матеріалу при різних коефіцієнтах потоншення матеріалу.

Виникаючу неоднорідність властивостей матеріалу при витягуванні з потоншенням вісесиметричних циліндричних виробів можна оцінити за

матеріалами статті [43]. Дослідження проводилися на розробленій математичній моделі в конічній матриці. Потоншення стінки проводилося на товстостінній циліндричній заготовці. Матеріал приймався жорстко-пластичним. Коефіцієнт тертя прийнятий за Кулоном. Досліджуваними матеріалами були сталь 11ЮА, 08кп, латунь Л63, алюмінієвий сплав АМг6М. Графічні залежності, які отримані в роботі при сталих коефіцієнтах тертя та розмірах заготовки, дозволяють оцінити інтенсивність деформації та значення компонент деформацій при різних коефіцієнтах потоншення стінки. Встановлено, що при збільшенні конусності матриці та коефіцієнта витягування, неоднорідність деформацій збільшується.

Дослідження витягування з потоншенням на розробленій математичній моделі велося на циліндричній деталі з анізотропного матеріалу [44]. Була приведена схема процесу. Тертя на інструменті бралось за Кулоном. Були отримані співвідношення які дозволяють визначити кінематику течії матеріалу при умові нестискаємості матеріалу та компоненти швидкостей деформації, і розподіл інтенсивності швидкостей деформацій та інтенсивності деформації вздовж траєкторій течії матеріалу. В осередку деформації були визначені напруження за рівняннями рівноваги в циліндричній системі координат. Силкові режими враховувалися беручи до розгляду осьове напруження з урахуванням зміни напрямку течії матеріалу і його зміни при цьому. Розрахунок зусилля також враховував розвантажуючі сили, та сили на подолання тертя. Отримані співвідношення для визначення осьового напруженням дозволили вирахувати граничні степені деформації і пошкоджуваності матеріалу.

Розробка технологічного процесу витягування з потоншенням товстостінних заготовок було розглянуто в статті [45]. Процес розроблявся для заготовок з матеріалу, який має анізотропні властивості. Умови закону тертя між поверхнями інструменту і заготовки підпорядковувалися закону Кулона.

Було отримано основні рівняння, які враховують течію матеріалу заготовки, напружено-деформованого стану в заготовці під час витягування. При розв'язанні цих рівнянь також можна визначити граничні можливості формування. Використовуючи рівняння рівноваги, умови текучості Мізеса-Хілла та рівняння

зв'язку між деформаціями та компонентами тензора напруження, вдалося наближено вирішити задачу. Рівняння балансу потужностей використали для визначення зміни напрямку течії металу. Розрахунок проводився для сталі 11ЮА. Представлені графіки відображають залежності коефіцієнта потоншення від кута матриці та відносної товщини матеріалу. На основі результатів виявлено, що при куті 18° є границя, де обмежуються можливості деформування за накопичених пошкоджень або величиною напружень. Отримані результати дозволили скоротити кількість переходів в існуючому технологічному процесі з 5 до 3.

Вплив, який має анізотропія властивостей матеріалу на технологічні параметри при витяжці з потоншенням товстостінних деталей, вивчався в статті [46]. Були виявлено напружено-деформований стан, граничні умови формування стінки заготовки та силові режими при витягуванні з потоншенням. Для дослідження вказаних характеристик з урахуванням анізотропії властивостей в матеріалі заготовки була розроблена математична модель. Тертя між поверхнями визначали за законом Кулона. Рівняння рівноваги використовувалися разом з рівняннями зв'язку компонентів тензора і швидкостей деформацій для вирішення поставленої задачі. На основі результатів вирішення задачі і отриманих графіків залежності осьового напруження і коефіцієнта анізотропії і залежності зусилля від коефіцієнта анізотропії можна встановити, що вони зростають при збільшенні коефіцієнту анізотропії. Для граничного коефіцієнту потоншення залежність зберігається, тобто при збільшенні коефіцієнту анізотропії він також зростає. Дані дослідження дозволяють правильно оцінювати анізотропію при розробленні нових технологічних процесів.

Величину пошкоджуваності матеріалу стінки заготовки, що потоншується, вивчалось в статті [47]. В поставленій задачі вирішувалося питання знаходження закономірності зміни пошкоджуваності при витягуванні з потоншенням заготовок з товстою стінкою. Для матеріалу заготовки були визначені граничні можливості деформування та НДС заготовки. Задача вирішувалася за допомогою отриманих рівнянь та співвідношень розрахунку оцінки зміни властивостей матеріалу. Досліджувані матеріали латунь Л63, сталі 08кп, 11ЮА, алюмінієвий сплав

АМг6М. Були отримані графічні залежності для величини пошкоджуваності матеріалу в залежності від розміру довжини осередку деформації для латуні Л63 та сталі 11ЮА та графіки залежності інтенсивності деформацій від відносної товщини стінки для різних коефіцієнтах потоншення. Для латуні Л63 та сталі 08кп зроблені графіки, які показують як змінюється величина мікропошкоджуваності матеріалу при різних кутах матриці та при зміні коефіцієнту потоншення. Дані дослідження дають можливість враховувати анізотропію та пошкоджуваність матеріалу при витягуванні з потоншенням.

Способи виготовлення стінки змінної товщини способом витягування досліджувалося в статті [48]. В статті описана технологія отримання деталей зі зміною товщиною стінки при протягуванні через матрицю. Також для порівняння та опису переваг описаної технології в статті описані інші методи отримання даних деталей. Приведена схема редукування заготовки крізь матрицю. Перевагою даної технології виготовлення деталей із зміною товщиною стінки є висока точність отриманих деталей та висока продуктивність процесу.

Дослідження ефекту врахування параметру противонатягу при витягуванні через дві матриці описано в роботі [49]. В проведеному дослідженні робиться акцент на тому, що при дослідженні процесу витягування з потоншенням є багато неврахованих факторів. Запропонований розрахунок з урахуванням противонатягу енергетичним методом розриву швидкостей. Були застосовані стандартні допущення для методу, такі як: матеріал анізотропний, деформований стан плоский. Описано 4 стадії процесу витягування з потоншенням: редукування дна, витяжка через першу матрицю, витяжка через дві матриці та витяжка в другій матриці. Виведено припущення, що якщо заготовка не зруйнувалась на перших трьох етапах, то вона залишиться цілою і пройде всі етапи цілою. Була зроблена схема для розрахунку через дві матриці, для якої і проводилось дослідження. Наступним кроком було проведення за формулами методу розриву швидкостей розрахунку. Для зручності використання отриманих даних по розрахунку було зроблено графіки на яких зображено залежність зусилля витягування від коефіцієнту зменшення в другій матриці для показу впливу противонатягу на

зменшення зусилля витягування. В результаті роботи запропонований метод врахування противонатягу через введений коефіцієнт коригування потужності, який формується в залежності від сили в першій матриці та нелінійно змінюється в другій в залежності від ступеня деформації.

Дослідження параметрів комбінованого витягування проводилося в роботі [50]. В матеріалах статті проводиться інтенсифікація процесу витягування з потоншенням для виробів з тонкою стінкою та товстим дном. При теоретичних дослідженнях для деформування матеріалу було прийнято, що він нестикаємий і має циліндричну анізотропію властивостей. Між поверхнями заготовки і інструменту тертя реалізується за законом Кулона. Дослідження також мали експериментальне продовження. Досліджувані матеріали: латунь Л63, алюмінієвий сплав АМг2М та сталь 08кп. Метою дослідження було встановлення граничного коефіцієнту потоншення при поступовому збільшенні діаметру пуансона до руйнування заготовки. За виконаними теоретичними і експериментальними дослідженнями було зроблено графік залежності зусиль від кута матриці. За яким зроблений висновок, що максимальне зусилля спостерігається при співпадині заокруглення пуансона з верхньою кромкою матриці. А відносно значення сили залежить від коефіцієнтів потоншення на наступних комбінованих операціях. Також виходячи з наступних графіків залежності коефіцієнта потоншення від кута матриці видно, що наступні операції краще проходять при менших кутах матриці. Похибка між теоретичними та експериментальними результатами не більше 5-10%.

Витягування з потоншення деталей з анізотропних матеріалів та їх силові режими досліджувалися в роботі [51]. Витягування проводили комбіноване, при поєднанні звичайного та витягування з потоншенням. Процес був розділений на декілька стадій. На першій - плоский напружений стан, який триває до третьої стадії. На третій стадії присутні компоненти як плоского, так і об'ємного стану. Четверта стадія змінює напружений стан на об'ємний. Витягування проходило в конічній матриці матеріал нестикаємий і умови текучості по Мізесу-Хіллю. При дослідженні використовували формули та відношення, які дозволяють визначити

напружено-деформований стан на кожній стадії процесу. Для третьої стадії розглядався окремо по методу балансу потужностей. Силкові режими першого комбінованого витягування досліджували відносно кута матриці та коефіцієнта витягування для сталі 11ЮА. Для аналізу зміни зусилля приведені графіки зусилля-кут матриці для різних коефіцієнтів потоншення.

Подальша робота по дослідженню комбінованого витягування з потоншенням проводилась в статті [52]. При деформуванні на наступних операціях заготовок, які вже проходили витягування з потоншенням в матеріалі присутні дві зони плоского напруженого стану та плоского деформованого стану. Для дослідження процес розділяли на чотири стадії: перша реалізується при плоскому напруженому стані і триває до прилягання матеріалу до пуансона, а третя починається при досягненні кромкою пуансона кромки пояска другої матриці; на четвертій стадії зникають елементи плоского напруженого стану і відбувається потоншення стінки. Для розрахунку були використані співвідношення для визначення напружень та деформацій, інтенсивності деформацій на кожній стадії процесу витягування з потоншенням. Залежність зусилля процесу від кута показана графіком при різних коефіцієнтах потоншення для сплаву АМг2М, сталі 08кп. При кутах конусності 10-20° спостерігається найменше зусилля процесу. Порівняння експериментальних і теоретичних досліджень показує задовільні результати. Для сталі 08кп та Латуні Л63 приведені графіки зміни коефіцієнту потоншення від кута матриці, встановлено граничні можливості деформування від максимальної величини розтягувального напруження.

Дослідження витягування з потоншенням в радіальних матрицях описано в статті [53]. Результатом роботи стало виявлення впливу на напружено-деформований стан технологічних параметрів. При комбінованому витягуванні є можливість отримати деталі великої довжини і з більш міцною стінкою та, порівняно зі звичайним витягуванням, досягати більших степенів деформації. В якості заготовки був прийнятий матеріал з анізотропними властивостями. Для полегшення дослідження процесу його розділи на стадії: перша плоский

напружений стан, на другій відбувається формування зони для потоншення, на третій ОНС проходить комбіноване витягування, але при цьому ще присутній ПНС. Заключна четверта стадія має тільки ОНС при якому відбувається потоншення стінки. Всі ці зони відображені на графіку залежності зусилля від ходу. Тертя на контактних поверхнях прийнято за законом Кулона. При розв'язку задачі знаходили кінематично-швидкісну складову, напружено-деформований стан для стадій процесу та силові режими. В якості досліджуваних матеріалів було взято сталь 08кп, латунь Л63. Для цих матеріалів було побудовано графіки за результатами зміни зусилля від радіуса.

Вивчення процесу потоншення стінки в циліндричній вісесиметричній заготовці з матеріалу з анізотропними властивостям проводилось в роботі [54]. Для дослідження та встановлення параметрів процесу була розроблена математична модель. Отримані результати були перевірені як теоретично, так і на практиці експериментально. Для наглядності процесу була приведена схема витягування в матриці. Спочатку було знайдено кінематично швидкісні режими, для цього використали метод балансу потужностей. Для знайдення складових тензора напруження скористалися рівняннями рівноваги в циліндричній системі координат. Після отримання значень напружень автори змогли визначити зусилля процесу витягування з потоншенням. Розрахунки велися для заготовки зі сталі 11ЮА. Залежності зміни зусилля від кута матриці або від відносної величини коефіцієнтів тертя представлені у вигляді графіків. І дозволяють оцінити їх значення при різних коефіцієнтах тертя. Для товстостінних заготовок оптимальні кути знаходяться в межах $12...24^\circ$. Графіки можна використати для підбору коефіцієнтів потоншенням як в залежності від кута матриці, так і від відносної товщини заготовки. При проведенні експерименту графіки зусилля кут також показані в статті. Розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень знаходиться в межах 10%.

Витягування з потоншенням крізь радіальну матриці при стійкому проходженні процесу описано в статті [55]. Було розроблено математичну модель і проведено дослідження на різних ділянках заготовки, що деформується. Для

вивчення процесу було застосовано метод розрахунку силових параметрів. Отримані формули дозволяють оцінити напружено-деформований стан та накопичення в матеріалі пошкоджень. Для оцінки ресурсу пластичності в матеріалі використовувалися рекомендації Колмогорова і Богатова. На кожному етапі досліджувалися граничні значення коефіцієнту потоншення відносно радіуса заокруглення матриці. Досліджуваним матеріалом була сталь 11ЮА. Для аналізу результатів були зроблені графіки, на яких зображена залежність коефіцієнту потоншення від радіусу матриці та його граничні значення. Зроблений висновок, що при зменшенні радіусу матриці збільшується коефіцієнт потоншення. Величина коефіцієнту тертя значно впливає на можливості деформування з потоншенням тонкої стінки, що показано на графіку, який відображає цю залежність. При зменшенні тертя значно збільшуються граничні можливості потоншення при витягуванні.

Визначення граничних коефіцієнтів витягування з потоншенням вісесиметричних деталей при деформуванні в конічних матриця досліджено в статті [56]. Дослідження проводилися теоретично. Змінними величинами приймали кут матриці та степінь деформації, тертя між поверхнями визначали за Кулоном. На першій стадії приймалося, що заготовка мала плоский напружений стан. В подальшому він поступово переходив в об'ємний напружений стан. Для проведення аналізу процесу використали метод розрахунку силових параметрів, при якому спільно були вирішені рівняння рівноваги та умови текучості з урахуванням спряжень на границях ділянкою, а також враховувався напрямок зміни напрямку течії матеріалу. Отримані співвідношення дозволили дізнатися параметри процесу. Параметри величини тертя та значення коефіцієнтів тертя визначаються шляхом чисельних розрахунків. Заготовка зі сталі 11ЮА. Отримані графіки дозволяють довідатися значення коефіцієнту потоншення в залежності від коефіцієнта витягування, і коефіцієнта витягування від зміни кута матриці.

Витягування з потоншенням частково досліджувалося в роботі по виготовленню деталей конічної форми [57]. Другим етапом було отримано заготовку з потоншеною стінкою. Для отримані цього переходу було застосовано

комбіноване витягування з потоншенням. Було розроблено математичні моделі для розрахунку і отримано оптимальні співвідношення для проходження процесу без руйнування. Дослідження також включало експериментальну частину, в якій зі сталі 12X18H10T і алюмінієвого сплаву Д16АМ були отримані відповідні деталі, які повністю підтвердили теоретичну частину. Отримані рівняння, співвідношення та графіки дозволяють розробляти різні технологічні процеси з виготовлення подібних деталей.

Дослідження отримання циліндричних виробів методом витягування з потоншенням через дві матриці приведено в статті [58]. Основною метою дослідження було збільшення висоти отриманих виробів. Змінюючи форму інструменту було отримано дані, які приведені в графіках залежностей висоти виробу від переміщення та зусилля від переміщення. Досліджуваними матеріалами заготовок були алюміній AA5042 та сталь АКДQ. Для обох матеріалів вдалося досягти збільшення висоти отриманих деталей.

Стаття [59] представляє дослідження процесу витягування використовуючи чисельні та експериментальні методи. Було розроблено модель анізотропного матеріалу, який дозволяє визначити потоншення матеріалу, розподіл напружень, залишкові напруження при різній формі деформуючого інструменту. Також застосовуючи отримані дані є можливість провести розрахунки без дорогих випробувань. Отримана модель враховує більшість параметрів, які впливають на процес витягування з потоншенням.

Дослідження ефекту пружиніння приводиться в статті [60]. Була розроблена теоретична модель, яка дозволяє отримувати кінцеві вироби з потрібними розмірами та вироби, в яких врахований ефект пружиніння матеріалу, що дозволяє зменшити витрату матеріалу при виробництві. Також розроблена модель дозволяє отримати методом чисельного моделювання значення зусилля процесу та робочих параметрів без проведення реальних експериментів. Отримані дані в статті перевірялися експериментально.

В статті [61] приведені результати досліджень технології по витягуванню з потоншенням деталі зі змінною стінкою на різних етапах з заданими механічними

характеристиками. При проведенні роботи було знайдено параметри, які впливають на величину різностінності, основний вплив на яку спричиняють початкова ступінь деформації та різностінність в заготовці з попереднього переходу. Друге що впливає на різностінність - це розподіл ступеня деформації в верхній та нижніх матрицях та кут їх конусності. При отриманні тонкостінних деталей було помічено, що в тонкостінних деталях спостерігається значна різниця механічних властивостей на поверхні та в середині деталі при різних розрахункових ступенях деформації. Дані приведені в таблиці для трьох значень. Визначення вище отриманих результатів дозволило враховувати їх в подальшому при розробці деталей, які працюють при високому тиску та знакозмінному навантаженні та скласти оцінку впливу параметрів на їх міцність.

Дослідження по проведенню комбінованого витягування на першій операції відображено в роботі [62]. В статті описані результати по експериментальному дослідженню при поєднанні витягування з потоншенням. Для перевірки отриманих теоретичних результатів було проведено досліди на заготовках з алюмінію АМг6М, АМг2М, латуні Л63, міді М1 та сталей 08кп і ст.3. Матриці були радіальної і конічної двоконусної форми. При проведенні експерименту змінювали кут та радіус заокруглення матриці. В якості змащування використовували омилення і фосфатування. Під час шести дослідів за допомогою датчиків визначали зусилля витягування. Після чого був побудований графік залежності зусилля від кута для сплаву алюмінію АМг6М, залежності зусилля від радіусу для сталі 08кп. Коефіцієнт потоншення від кута матриці при комбінованій витяжці можна аналізувати по графіку для сплаву АМг2М. Похибка при порівнянні теоретичних і експериментальних результатів ставила не вище 5%.

Дослідження по вивченню течії матеріалу при деформації під час витягування з потоншенням циліндричних заготовок з анізотропного матеріалу приведено в роботі [63]. При розгляді задачі було прийнято основні обмеження для матеріалу, отримані вирази для визначення кінематики течії матеріалу, тобто компонент швидкостей деформації, інтенсивності швидкостей деформації вздовж течії металу по пуансону і матриці. Аналіз задачі проводився в циліндричній

системі координат. Дані співвідношення підходять для оцінки течії металу при розрахунку витягування з товстостінних заготовок.

Отримання якісних деталей з малою різностінністю досліджувалося в роботі [64]. В дослідженні звертається увага на складність проведення таких розрахунків та на не врахування всіх факторів при розрахунках. Значний вплив на подальший розвиток різностінності має ступінь деформації. Автор статті провів розрахунки спираючись на реальні отримані заготовки і вивів формули які надають можливість оцінити ступінь деформації і різностінність, яку заготовка отримує під час формування, що дозволяє прогнозувати механічні властивості та при виготовленні деталей оцінити, чи досягнуті потрібні характеристики в матеріалі при певному ступеню деформації.

Оцінка степенів деформації при операціях витягування з потоншенням при проведених дослідженнях в статті [65] при використанні отриманих даних дозволяє розробляти технологічні процеси для витягування глибоких деталей. При дослідженні був прийнятий експоненціальний закон накопичення пошкоджуваності на операціях витягування та отримано формулу яка дозволяє визначити відношення допустимої деформації при допустимому накопиченню пошкоджуваності. Дані співвідношення дозволяють закладати механічні властивості штампованого металу вже на етапі проектування інструменту для кожного переходу враховуючи допуск та повторюваність форми при їх виготовленні.

В статті [66] проведено встановлення можливості інтенсифікації витягування з потоншенням за рахунок врахування пошкоджуваності матеріалу та оцінки степенів деформації на кожній операції. Дослідження в статті включають опис дефектів, які виникають при витягування з потоншенням, та способи їх усунення, їх вплив на експлуатаційні властивості. Обґрунтовано визначені закономірності для встановлення степенів деформації на кожному переході та їх зменшення з кожним наступним переходом. Отримані формули для встановлення ступеня пошкоджуваності матеріалу і кількості витяжних операцій. Результати роботи допомагають при конструюванню інструменту, при розроблені технології

витягування з потоншенням і в оцінці механічних властивостей на останній операції.

Одними із завдань статті [67] було дослідження витягування з потоншенням в режимі короткочасної повзучості на наступних операціях. Заготовка для дослідження бралася із матеріалу з анізотропними властивостями алюмінієвого сплаву АМг6. Застосовувався метод комбінованого витягування при якому одночасно проводилось зменшення діаметра заготовки і потоншення стінки. Задача вирішувалася для заготовок, які вже проходили витягування з потоншенням та які були отримані іншим способом штамповки. Звертається увага на особливості витягування заготовок, які вже проходили відпал і що в них все одно залишається частина механічних властивостей отриманих на попередньому переході. Були отримані формули для розрахунку компонент деформацій та пошкоджуваності. Граничні можливості оцінювалися за максимальними напруженнями. При розрахунку враховувалися рекомендації Колмогорова і Богатова. Для сплаву АМг6 зроблені графіки зміни коефіцієнту потоншення від швидкості процесу. В висновку встановлено, що швидкість деформації не впливає на коефіцієнт потоншення, який більше залежить від накопичених деформації та пошкоджень в матеріалі.

Можливості витягування з потоншенням в радіальних матрицях в режимі повзучості при першому деформуванні описано в статті [68]. Дані отримані в результаті теоретичних досліджень. При вирішенні задачі було використано рекомендації по призначенню степенів деформації Колмогорова і Богатова. Були отримані співвідношення, які дозволяють оцінити деформований стан, напружений стан та коефіцієнт пошкоджуваності матеріалу. Граничні можливості ступеня деформації визначалися розрахунковим шляхом в залежності від радіусу матриці, швидкості деформації та тертя, яке виникло на контактуючих площадках. Графіки, які представлені в статті, дозволяють визначати залежність коефіцієнту потоншення від радіусу матриці для алюмінієвого сплаву АМг6. При аналізі результатів зроблені висновки, що збільшення коефіцієнта потоншення

проходить при зменшенні радіусу матриці та збільшенні швидкості деформування, зменшення величини коефіцієнту тертя.

Новий метод витягування з потоншенням розроблений в дослідженні, яке проведене в статті [69]. Матеріали статті описують метод витягування з потоншенням з протитиском при якому потоншення матеріалу заготовки відбувається пуансоном з внутрішнього краю. При цьому використовуючи даний метод можна досягти потоншення стінки приблизно на 70% після одного переходу витягування. Даний процес також забезпечує вищу міцність та якість поверхні і відповідно зниження вартості продукції.

В статті [70] описуються дослідження методу витягування з потоншенням та результати дослідження, яке дозволяє отримувати високі заготовки з тонкою стінкою за один перехід без відпалу. Приведені результати з характеристиками матеріалу, які вдалося отримати. Описано переваги цього процесу над традиційним витягуванням з потоншенням.

Представлений метод витягування з потоншенням, який ґрунтується на стискаючих напруженнях, описано в статті [71]. Даний метод дозволяє отримувати вищий коефіцієнт витягування без додаткових переходів та відпалу. Описано сутність процесу витягування та характеристики, які можна отримати в матеріалі використовуючи даний процес. Результати даного дослідження перевірялися теоретично.

Отримання потрібних механічних властивостей матеріалу в деталях при витягуванні з потоншенням вивчалось в статті [72]. При проведенні дослідження встановлено, що для оцінки механічних властивостей потрібно враховувати степінь деформації на операції. Розрахунки велися в полярній системі координат. Для отримання значення визначалася залежність ступеня деформації та швидкості деформації від функції кута. Другим кроком було встановлення залежності ступеня деформації від коефіцієнту тертя, результати якого приведені в таблиці при зміні радіуса пуансона та робочого кута матриці і значення степенів деформації при цьому. В висновку степінь деформації на зовнішніх поверхнях менше ніж на внутрішніх, що й показано на графіку. В подальшому автор

вираховував параметри, які залежні від кута матриці та тертя на деформуючому інструменті для точки в осередку деформації. В висновку встановлений вплив кута матриці та коефіцієнта тертя на форму деталі.

Зміну товщини матеріалу при витягуванні приведено в статті [73]. Встановлено, що найбільші напруження виникають при згині на радіусі. Розрахунок проводився в програмі LS-DYNA. Заготовка проходила не глибоке витягування. Було встановлено, що радіуси і фаски на робочому інструменті сприяють зменшенню зусилля. Зміну товщини матеріалу заміряли на математичній моделі. Встановлені залежності та виміряні розміри зведені до таблиці. В висновку видно, що найбільше потоншення відбулося на ділянках, де був тиск пуансона.

В статті [74] розглядається процес витягування з потоншенням гільз калібру 20 мм. В процесі дослідження визначено вплив кута матриці на процес витягування та зусилля процесу. В результаті теоретичного моделювання визначено оптимальні параметри процесу витягування та геометрії інструменту при яких можна отримати деталь, визначенні величини напружень.

Стаття [75] описує новий процес витягування названий “стисненим витягуванням”. Даний процес дозволяє надзвичайно збільшити коефіцієнт потоншення. Результати дослідження перевірялися експериментально та теоретично. Було також досліджено вплив збільшення та зменшення коефіцієнту тертя. Завдяки цьому методу виходить покращена поверхня виробу та вдалося збільшити твердість стінки з 25 HV до 85 HV. Напружений стан при витягуванні забезпечили повністю стискаючий.

Дослідження зношування інструменту матриці для витягування проводили в статті [76]. В якості експериментальних матеріалів брали для матриці сталь D2 з покриттям хромовим та нітриду титану, заготовка сталь S690QL. Було встановлено кількість циклів до зношування та напруження, яке сприймає поверхня інструменту. Використовуючи ці дані можна покращити наявні процеси витягування з потоншенням та досягти більш стабільних розмірів заготовки.

В статті [77] описано дослідження по впливу матеріалу інструменту на якість поверхні заготовки та вплив утворення дефектів на поверхні та руйнування заготовки в процесі витягування. В якості матеріалу інструменту було використано металокераміку. Також дослідження були спрямовані на зменшення коефіцієнта тертя та зменшення налипання матеріалу заготовки на інструмент. В якості матеріалу заготовки було використано нержавіючу сталь та алюмінієві сплави. Дослідження проводилися експериментально.

Дослідження по виявленню дефектів та оцінку якості поверхні проводили в роботі, яка описана в статті [78]. Описані види дефектів та існуючі способи їх усунення. А також описано, як за допомогою фотографічного методу виявляти дефекти на поверхнях заготовок, які отримуються методом витягування з потоншенням. Результати дослідження дозволяють виявляти дефекти та покращувати існуючі процеси витягування.

В статті [79] описано новий метод отримання високих циліндричних заготовок методом витягування з потоншення без застосування відпалу. Отримані значення напружень та деформацій. Результати підтверджені експериментально. Отримані результати дозволяють отримати вищі заготовки з тонкою стінкою.

Метою дослідження, яке проводилося в статті [80] було визначення ефективності мастильних речовин. Випробування проводили на обладнанні, яке має можливість виміряти зусилля процесу. Дані представлені в вигляді залежностей зусилля від переміщення для витягування через одну матрицю та через декілька. Отримані результати можна застосувати при проектуванні технологій в яких застосовується витягування з потоншенням.

Моделювання витягування з потоншенням при інтенсивній пластичній деформації описано в статті [81]. Ціллю роботи було дослідження впливу зміни форми матриці на витягування з потоншенням. За основу було взято ефект при локальному впливі при деформуванні, який спостерігається при обкочуванні роликом. При використаному профілі матриці спостерігаються збільшені здвигові деформації. Для теоретичного моделювання було розроблено комп'ютерні моделі інструменту та математична модель для проведення розрахунку в програмі

QForm. Матеріалом заготовки приймалася сталь 10. При такому профілі матриці заготовка деформується нерівномірно з виступами, що в подальшому згладжуються в звичайній другій матриці. В результаті роботи було встановлено напружено-деформований стан заготовки та інтенсивно пропрацьований матеріал завдяки здвиговим деформаціям.

Для підтвердження результатів теоретичного розрахунку було опубліковано результати по експериментальним дослідженням в статті [82]. Для експерименту використали тороїдальну матрицю та розрізані половинки заготовки з нанесеною ділильною стінкою, після чого половинки були зварені і зачищені. Витягування проводилося в матрицях різного діаметру з різним коефіцієнтом витягування. Після витягування половинки роз'єднувалися і вивчалася зміна сітки. В результаті побудовані графічні залежності зміни траєкторії руху в осередку деформації. При порівнянні з теоретичними результатами похибка становила не більше 10%.

Процес витягування з потоншенням досліджувався в статті [83]. В якості заготовки для комп'ютерного моделювання була попередньо витягнута заготовка. Було розроблено комп'ютерні моделі інструмента. Під час моделювання визначалися силові параметри, визначення характеру виникаючих деформації в заготовці. Результати по величині були представлені у вигляді графіку зусилля в залежності від часу обробки. Було встановлено швидкість деформації, зони з найбільшою інтенсивністю деформації. Проаналізовано напружений стан та виявлення зон з критичними напруженнями, які могли б призвести до руйнування заготовки. В висновку, при порівнянні кількох витяжок, похибка в розрахункових значень не більше 10%. Зміна кута матриці приводить до більшого контакту в зоні деформації, що призводить до збільшення зусилля.

Дослідження степеня зміцнення поверхневого шару в заготовці отриманої витягуванням з потоншенням вивчено в статті [84]. Для розрахунку використали програмний комплекс LS-DYNA. Розроблені трьохмірні моделі та математична модель для витягування з потоншенням. Спочатку автор визначив граничні параметри при яких доцільно виконувати процес. Розбив сітку на заготовці. В результаті було отримано дані по напруженому стану заготовки. Для зручності

оцінки деформацій, які пройшли при деформуванні заготовки, зроблені графіки ступеня деформації в залежності від часу процесу витягування. В кінці зроблені висновки, що напруження які залишаються в деталі після деформування, розподілені по перерізу деталі нерівномірно і можуть відрізнятися до 10 раз. Найбільше зміцнення відбулося на верхній частині тонкостінної заготовки, особливо у верхніх шарах металу заготовки.

В статті [85] описуються дослідження процесу витягування через декілька матриць сталюї круглої заготовки AISI 1040. Було розглянуто вплив на зусилля витягування таких параметрів як кут матриці, тертя на контактних поверхнях, зазор між пуансоном і матрицею, результати представлені у вигляді графіків. Також досліджено пружиніння третьої розрізаної матриці. Також встановлені залежності зусилля від витягування.

Розрахунок параметрів витягування з потоншенням через дві матриці проводився в статті [86]. Для початку було прийнято співвідношення та обмеження для процесу плоский деформований стан, матеріал заготовки жорстко пластичний, ступінь деформації в верхній заготовці 0,35, в другій матриці 0,45. Побудована математична модель для розрахунку процесу. Розглядалися два осередки пластичної деформації. Було виявлено напружено-деформований стан, траєкторія течії матеріалу, ступінь деформації як для першого осередку, так і для другого. Для визначення траєкторії течії матеріалу ввели полярну систему координат. Узгодження руху двох осередків пластичної деформації вимагало рівності швидкостей в залежності від кута. Для довільної точки поперечного перерізу було проведено розрахунок траєкторії і ступеня деформації. Результати дослідження можуть бути застосовані для оцінки якості виробів та оптимізації процесу витягування стінки через дві матриці.

Вивчення впливу збільшення звдигових деформацій в матриці з періодичним профілем, який створює зазор при витягуванні з потоншенням проводилось в роботі [87]. Дана конфігурація позитивно впливає на структуру металу так, як при збільшені деформацій по стінці утворюється дрібнозерниста структура. В статті робиться розрахунок першого переходу, з різною кількістю

виступів в першій матриці. Для проведення розрахунку була зроблена розрахункова модель на основі кінцевих елементів. Матеріал для дослідження сталі 10. Результати дослідження оформлені в графіки з кривими, які показують зміну інтенсивності напруження і деформацій для матриць з кількістю впадин: 0, 4, 8, 16. Проаналізувавши графіки була складена таблиця з досліджуваними значеннями, а також отримана формула, яка дозволяє отримати значення, при якій кількості виступів буде найбільший приріст деформації. Доцільна кількість 10 виступів.

Дослідження по виявленню силових параметрів витягування з потоншенням в матриці спеціального профілю виконано в роботі [88]. Моделювання здійснювали в програмі QForm. До проведення моделювання було проведено теоретичний розрахунок. Описано подібні методи отримання значної пластичної деформації за допомогою ротаційної витяжки. Зображена схема матриці з клиновидними виступами і напрямками деформацій в матеріалі. Описано вигляд напівфабрикату та з якими властивостями він повинен вийти при деформуванні в такій матриці. Після матриці з перемінним профілем напівфабрикат проходить звичайну матрицю, яка вигладжує стінку. Для вивчення зміни зусилля приведений графік зусилля в залежності від переміщення. У висновку, при використанні матриці з виступами, на графіку зусилля під час витягування не спостерігається піку, як при звичайному витягуванні. Результати моделювання співпали з розрахунковими.

При проведенні розрахунку з матрицею, яка має синусоїдальні виступи виникло питання, чи дозволить інша форма виступів отримати кращий результат. Це питання досліджувалося в статті [89]. Порівняно з звичайною витяжкою з потоншенням в матриці такого профілю спостерігається більша пропрацьованість структури матеріалу і більш рівномірний розподіл зусилля на операції. Була розроблена математична модель та модель матриць з різним профілем контуру виступу. В якості матеріалу для заготовки використали сталі 10. Профіль виступу для матриці був: синусоїдальної форми, трапецеїдальної, та прямокутної. Кількість виступів 16. Для врахування нерівномірності деформації отримали

формулу. В якості результатів для зусилля були зроблені графіки. Проаналізувавши можна зробити висновок, що найбільший ефект спостерігається в матриці з виступами синусоїдальної форми. При витяжці через звичайну матрицю стінка вирівнюється, а нерівномірність деформацій збільшується на 49%.

Виконання дослідження по технологічним процесам, які допомагають зменшити кількість витрати матеріалу та зменшити кількість операцій, проводилося в статті [90]. Приведено етапи, які повинні бути проведені при розробці технологічного процесу: складання технологічного креслення, визначення форми заготовки, визначення коефіцієнтів витягування, розподіл коефіцієнтів по операціям, розрахунок розмірів напівфабрикатів, оцінка властивостей матеріалу. Такий порядок використовувався при розробці представленої в статті деталі. Завдяки новому покращеному технологічному процесу зменшилася вартість деталі до 15% і скоротилася трудомісткість виготовлення на 25% завдяки застосуванню комбінованого витягування.

Для визначення зміни механічних властивостей при витягуванні з потоншенням тонкостінних деталей в статті [91], було проведено оцінку цих характеристик. Дослідження проводилися на різних типах витягування заготовок з матеріалу з анізотропними властивостями. Під час виконання роботи по визначенню характеристик матеріалу були отримані співвідношення для дослідження напружено-деформованого стану, кінематики течії матеріалу, граничних степенів деформації. Отримані значення силових режимів та впливу на них матеріалу, який вже був попередньо здеформований, показали. Дані дослідження з врахування анізотропного зміцнення матеріалу дозволили на 25% уточнити силові режими і на 50% граничні коефіцієнти потоншення.

Дослідження впливу кута матриці на зусилля витягування з потоншенням алюмінієвого сплаву відображено в статті [92]. Моделювання проводили в програмі САТІА для матриць з кутом: 5, 10, 15, 20, 25, 30 градусів. Результати цих досліджень введені у вигляді таблиці. Для різних кутів матриці було встановлено величини напружень, що виникають.

Можливість скорочення кількості переходів в існуючому процесі витягування з потоншенням досліджували в статті [93]. Матеріалом чашки була EDD сталь для глибокого витягування. Процес проводили через три матриці. Для дослідження механічних властивостей матеріалу було проведено дослідження на розтяг та комп'ютерне моделювання, за допомогою якого досліджували можливість розтягу стінки. В результаті було вдосконалено процес витягування, продовжено термін служби матриці. Отримано математичну модель для витягування, яка при порівнянні дає результати близькі до прогнозованих, і надає можливість покращувати витягування в інших подібних задачах.

В статті [94] розглядається проблема подібності розрахункових даних з реальними. Була поставлена задача запропонувати метод, який дозволяє прогнозувати форму та розміри криволінійних ділянок при глибокому витягуванні. Спочатку було встановлено параметри, які найбільше впливають на зміну кривизни поверхні. В результаті було запропоновано новий метод регресійного аналізу при застосуванні якого криволінійна поверхня відрізнялась тільки на 0,3%. Отже запропонований метод дозволяє більш ефективно та швидше проектувати нові процеси.

Визначення зусилля при проведенні теоретичного дослідження витягування локальним потоншенням вивчено в статті [95]. Визначення зусилля проходило за запропонованою методикою в матриці, яка має похилі виступи на пояску. Моделювання проводили в програмі QForm з побудовою математичної моделі. В якості матеріалу заготовки взяли сталь 10. Зусилля витягування розраховували для виступів з нахилом 0° , 20° , 30° і 40° . За результатами побудовано графік. Розглянувши отриманні дані та графіки було встановлено, що при збільшенні кута зусилля зростає пропорційно, що дозволяє в даному діапазоні визначити на скільки збільшилось зусилля. Було отримано рівняння, яке дає змогу не бачачи графік отримати зусилля при витягуванні в матриці з конічними виступами. Також було досліджено крутний момент, який обертає заготовку, та умову отримання виступів на заготовці.

Витягування з потоншенням через матрицю з клиновидними виступами досліджувалося в статті [96]. Проводилось порівняння звичайного витягування через дві матриці та з використанням верхньої матриці зі спеціальним профілем. Порівнюючи зусилля визначили, що при менших коефіцієнтах потоншення зусилля витягування можна порівняти зі звичайним, але при витягуванні зусилля і коефіцієнти витягування більші при використанні матриці з виступами, проте заготовка не зруйнувалася. Але зусилля першій та другій матриці при витягуванні в матриці з виступами суттєво не відрізнялися, на відміну від традиційного витягування. Перевагою використання такого виду матриць полягає ще й в кращому пропрацюванні матеріалу від 30 до 70%.

Дослідження витягування зі зміною товщиною заготовки проводилося в статті [97]. Було проведено розрахунок диференціального рівняння яке дозволило визначити потрібну товщину заготовки, щоб в процесі деформування заготовка вирівнялась по товщині. Було визначено граничні можливості витягування заготовок змінного профілю та розроблена модель, яка це враховує. І запропоновані технології, які дозволяють враховувати це при побудові процесів серійного та масового виробництва.

Технологія виготовлення деталей зі змінною товщиною стінки вивчалася при проведенні роботи [98]. Деформування заготовки теоретично проводилося в матриці з малим кутом менше 4° . Визначено напружено-деформований стан при витягуванні з потоншенням. Розрахунок деформації вели тороїдальних координатах в якій форма осередку деформації була в секторі утвореного обертанням кільця, а не в звичайній задачі плоско-деформованого стану. Для тороїдальних координат були проведені розрахунки, а також отримані формули та співвідношення для швидкості деформації та виведені рівняння рівноваги в тороїдальних координатах. Після проводилося порівняння плоско деформованого стану і тороїдального. В висновку запропоновано припущення, що для матриць з малим кутом помилково нехтувати пружними деформаціями, а краще використовувати теорію малих пластичних деформацій, а не теорію течії.

Процес потоншення стінки циліндричної заготовки в двох матрицях проводився в дослідженні, яке описано в статті [99]. Для визначення параметрів процесу проводиться розрахунок напружень при змінності напруження текучості по товщині стінки використовуючи рівняння рівноваги. Для формули оцінки ступеню деформації було також враховано змінність напруження текучості в стінці заготовки. Цікавою була оцінка ступеню деформації по товщині стінки при проведенні витягування через дві матриці без рекристалізаційного відпалу. Кут матриці приймається рівним 12° . Матеріал заготовки була сталь 10. За розрахунковими даними був отриманий графік, на якому показано зміна розрахункового значення ступеня деформації при врахуванні змінності напруження текучості. В висновку було отримано формулу, в якій враховані перемінні значення напруження текучості. Проте автор статті вважає, що отримані дані показують незначний вплив при врахуванні зміни напруження при проведенні практичних розрахунків.

Робота по отриманню технології отримання безшовних труб з магнієвого сплаву проводилась в статті [100]. Основними переходами було: зворотне видавлювання заготовки відрізаної з прутка в чашку з товстою стінкою, яка в подальшому поступово потоншала стінку на протязі переходів витягування з потоншенням через 4 матриці. Після отримання заготовок вони були розрізані на половинки та досліджені на зміну мікроструктури матеріалу на кожному з чотирьох переходів видавлювання. На зображеннях, які отриманні під мікроскопом, видно як поступово витягуються і подрібнюються зерна в матеріалі. Зміна значення твердості заготовок на кожному переході відображена на графіках. На розроблену технологію був отриманий патент.

Для витягування деталей з добре пропрацьовано структурою потрібно розуміти показники напружено-деформованого стану, який виникає під час процесу. Оцінка його проводилась в статті [101]. Було розроблено математичну модель і проведено математичне моделювання в QForm витягування з локальним потоншенням в матриці зі змінним профілем. Отримані результати відображені в графіках. При збільшенні кількості виступів напруження збільшувалися.

Стискаючи напруження вирости на 22% а розтягуючи на 18% для конічної форми пояса. При використанні матриці радіального профілю з виступами розтягуючі напруження зросли на 40%, а стискаючі аж до 70%. Спостерігалася велика нерівномірність деформацій. При дослідженні коефіцієнту тертя виявилось, що при його збільшенні в конічній і сферичній матрицях розтягуючі напруження зросли більше 60%. Деформації також ростуть при збільшенні кількості виступів, до 10% на конічній матриці та 25% на сферичній матриці з виступами. У висновку сферична матриця найбільш вигідна, так як процес відбувається при менших розтягуючих напруженнях і менших деформаціях.

Дослідження твердості, якої набуває стінка змінної товщини при витягуванні з потоншенням, відбувалося в статті [102]. При вимірюванні твердості стінки чашки отриманої витягуванням з потоншенням було створено модель для передбачення твердості, яку може набути стінка в процесі. Вимірювання проводилося в різних перерізах заготовки, тому дана модель надає можливість визначити твердість заготовки по всій довжині при відомій геометрії заготовки.

Вплив швидкості деформації та коефіцієнта витягування на протікання процесу витягування з потоншенням проводилося в роботі [103]. З результатів роботи видно, що через малу швидкість деформацій при постійному коефіцієнті витягування збільшувалася міцність та твердість матеріалу та через високий коефіцієнт статичного тертя збільшувалися залишкові напруження.

В статті [104] описано програму по автоматизації процесів розробки інструменту для останнього переходу витягування. В опублікованих дослідках показано діаграму та описано етапи при побудові технологічного процесу. При розрахунку враховуються такі параметри як коефіцієнт пружиніння, зношення інструменту, допуск на виготовлення деталі. Описано як враховуються конфігурація інструменту з двома та трьома радіусами. В висновку представлена програма для розрахунку процесів витягування з потоншенням та інструменту для нього, яка дозволяє скоротити час та ресурси, а також уникнути помилок при проектуванні.

Оптимізацію процесу витягування проводили в статті [105]. В якості початкових даних був заданий існуючий технологічний процес виготовлення балонів для газу. В результаті, при застосуванні комбінованого методу витягування, вдалося скоротити кількість штампів та кількість обладнання яке задіяне при виготовленні балона на першому переході. Замість трьох матриць була застосована одна матриця. Також зменшення кількості матриць, призвело до зменшення часу на виготовлення балону. Для досягнення цього результату було підібрано матрицю оптимального діаметру та профілю, яка дозволила отримати виріб.

Вдосконалення та оптимізацію процесу витягування з потоншенням проводили в роботі [106]. В поставлених задачах було зменшення зусилля та залишкових напружень, що призведе до покращення точності розмірів, якості поверхонь, механічних властивостей матеріалу. Для вирішення задачі змінювали коефіцієнт витягування, коефіцієнт витягування та кут матриці. Матеріалом заготовок був алюміній AA1100. В результаті встановлено, що найбільший вплив становлять коефіцієнт витягування та коефіцієнт тертя, а вплив кута матриці незначний. Були підібрані коефіцієнти при яких залишаються найменші залишкові напруження та оптимальний коефіцієнт тертя.

Процес витягування з потоншенням досліджувався в статті [107]. Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження по вивченню процесу витягування. Теоретичні досліді ґрунтувалися на прикладній теорії пластичності. Але для перевірки правильності розрахункових даних потрібно проводити експериментальні дослідження, щоб отримати данні, які не можуть бути отримані при теоретичних дослідях. Для моделювання було розроблено 3D моделі та розрахункова схема. Матеріалом заготовки взяли сталь 10. Кут матриці прийняли 10° . Було отримано розподіл інтенсивності напруження на різних стадіях процесу. Для визначення пропрацювання структури також визначили інтенсивність деформацій. Оцінку механічних властивостей проводили по графіку залежності напружень та деформацій. При перевірці на дослідях була отримана заготовка зі сталі 10 з попередньо здеформованої заготовки. Перед проведенням

експериментальних дослідів ковпачки розрізалися і на них наносили ділильну сітку, після чого половники зварювалися і витягувалися. Здеформовані заготовки розділяли і проводили вимірювання переміщення точок викривлення сітки, по якій визначають напружено-деформований стан. Зміну траєкторії руху матеріалу в осередку деформації відображено на графіках. Похибка результатів розрахунків і досліджень становила не більше 10%. Виявлено накопичення деформації не тільки по висоті, але і по товщині в стінці zdeформованої заготовки. Робота виконана по гранту НШ-2601.2020.8.

Можливості виготовлення пустотілих деталей методом витягування з потоншенням виконувалося в роботі [108]. Розрахунки проводили при застосуванні сферичної матриці при комбінованій витяжки, коли разом зі зміною діаметру потоншується стінка. Осередок деформації поділили на зони витяжки і примусового потоншення. Описано підбір коефіцієнтів для витягування та потоншення заготовки. Визначені стадії виникнення критичних моментів коли можливе руйнування заготовки. В висновку для оптимального проходження процесу автори пропонують використовувати матрицю конічного профілю при якій процес комбінованого витягування проходить більш оптимально.

1.2. Теоретичні та експериментальні дослідження обтиску порожнистих виробів з дном і змінною товщиною стінки великою довжини

Описаний спосіб [109] отримання гільзи з пруткового матеріалу. На першому етапі заготовку відрізають з прутка. В подальшому заготовка проходить процес зворотного видавлювання при якому формується донна частина і капсульний отвір. Товщина стінки отримується поступовим потоншенням заготовки при проходженні через матриці меншого діаметру. Після чого проходить обтиск стінки в конічній матриці. Останньою операцією є розвальцювання фланця.

Проведення обтиску при застосуванні матриці з контейнером та оправки в середині виконувалося в роботі [110]. Було встановлено закономірності потовщення стінки на краю заготовки. Дослідження проводилися

експериментально на заготовках зі сталі 20. Результати експериментів представлені у вигляді графіків залежності ходу пуансона та відносної товщини стінки. Також встановлено залежності кута в матриці та ступеня зміцнення матеріалу.

Стійкість заготовок при обтиску розглядалась в статті [111]. Була розроблена математична модель для визначення критерію втрати стійкості заготовок. Були враховані анізотропні механічні характеристики. Для розрахунку були виконанні чисельні експерименти для різних матеріалів. Для визначення втрати стійкості автори пропонують враховувати анізотропію матеріалів. Визначенні рівняння для розрахунку НДС в заготовці при обтиску. Отримані залежності ступеня деформації від відносної висоти труби для наступних матеріалів: сталь 20, сталь 12X18H9T, сталь 45 та графіки, які враховують показник деформаційного зміцнення. Визначено вплив коефіцієнтів анізотропії в залежності від ступеня деформації і відносної висоти при різних значеннях.

Силові режими при обтиску вивчалися в роботі [112]. Були проведені дослідження по обтиску в режимі повзучості. Розрахунок проводиться по рівнянням рівноваги. Також були встановлені рівняння для швидкостей деформації, приросту деформації, напруження на конічній ділянці. Вивчено вплив ступеня деформації, геометрії інструменту при обтиску заготовок. Отримані результати оформлені у графіки, на яких відображено зміну зусилля від кута матриці, коефіцієнту тертя, швидкості деформування. Також відображений у графіках вплив коефіцієнту анізотропії.

Граничні можливості обтиску вивчалися в роботі [113]. Основними припущенням по матеріалу було, що він ортотропний, має анізотропію властивостей. Критерій деформування спирався на визначення роботи по пошкоджуваності матеріалу. Граничні можливості деформування обмежувалися величиною накопичених пошкоджень. Матеріалом для досліджень був АМг6. Були отримані графічні залежності коефіцієнту обтиску від кута матриці та тертя між поверхнями. При збільшенні конусності матриці коефіцієнт обтиску зменшувався до 25%, а збільшення коефіцієнта тертя зменшувало його до 15%.

Робота [114] досліджувала обтиск при застосуванні матриці з криволінійним профілем. Визначався розподіл по товщині меридіального напруження, контактного тиску та напруження текучості і його розподіл вздовж стінки. Побудований графік зусилля в залежності від переміщення деформуючого інструменту.

Дослідження по обтиску і роздачі проводили під час математичного моделювання в режимі повзучості [115]. Приведені графіки залежності сили обтиску від коефіцієнта обтиску і швидкості деформування. Вивчення характеристик проводилось для матеріалів АМг6 та ВТ6С. Граничні можливості деформування визначалися по феноменологічній моделі, в подальшому отримані рівняння, які дозволяють провести розрахунок. Для аналізу обтиску отримані графічні залежності коефіцієнту обтиску від коефіцієнта тертя для ВТ6С та АМг6. В висновку були проаналізовані отримані характеристики і визначені моменти в випадку коли зменшується коефіцієнт роздачі та як на нього впливає швидкість деформування.

Пошук ідеальної форми профілю матриці для обтиску проводили в статті [116]. Була розроблена модель процесу в пластичному стані при обтиску товстостінної заготовки за відсутності тертя і при холодній деформації. Був розглянутий ідеальний процес деформування при якому напрям течії співпадає з головними напруженнями в меридіальній площині. Були розраховані лінії поля тока, швидкостей і напружень і криволінійний профіль матриці.

Дослідження по проведенню ідеальних процесів обтиску і роздачі описано в статті [117]. Для вирішення задачі використали метод зворотного рішення. Матриця застосовувалась з криволінійним профілем при умові пластичності Мізеса. Для вирішення задачі були знайдені величини поля швидкостей і напружень, лінії тока і форма інструмента.

Вплив технологічних параметрів встановлено в статті [118]. Була розроблена математична модель для операції обтиску. Матеріал заготовки приймався з анізотропними властивостями, який зміцнюється і підпорядковується умові текучості Мізеса-Хілла. Обтиск реалізувався в умовах плоского

напруженого стану. Встановлено вплив анізотропії механічних властивостей та НДС. Зроблені за результатами дослідження графіки зусилля в залежності від кута. Виявлені оптимальні кути $12...18^\circ$ для матриці обтиску. Встановлені залежності зменшення та збільшення коефіцієнту обтиску. Проведена оцінка граничних коефіцієнтів обтиску та їх зв'язок з максимальними напруженнями. Отримано значення ступеня використання ресурсу пластичності та стійкості заготовки при обтиску. Приведені графіки залежності коефіцієнта обтиску від кута матриці. Були проведені експериментальні дослідження для заготовок зі сталі 08кп та латуні Л63, розбіжність становила до 10% порівняно з теоретичними. Підвищення ефективності процесу становило до 45%.

Проведення дослідження обтиску було виконане в роботі [119]. В роботі було обґрунтовано використання матриці з хвиловим профілем спираючись на дослідження, які проводилися в інших роботах. Описано етапи формування в матриці, показано на зображеннях схему процесу на різних стадіях обтиску. Отримано рівняння рівноваги, яке можна використовувати при розрахунку таких процесів. Проведено визначення зусилля по отриманим формулам і побудований графік залежності зусилля від коефіцієнту обтиску. В результаті доведено, що профіль такої матриці дозволяє зменшити зусилля, збільшити коефіцієнт обтиску за рахунок зменшення контактних сил тертя між заготовкою та інструментом.

Аналіз зусилля обтиску та операції обтиску проводився в статті [120]. В якості нововведення пропонується використовувати матрицю з кільцевими канавками. Проведено розрахунок по виявленню НДС в заготовці під час процесу обтиску. Наведені схеми, які зображають поведінку матеріалу матриці під час деформування. Виведені формули дозволяють отримати значення силових режимів, додатково зроблений графік. Встановлено оптимальне використання даного профілю матриці з найбільшим ефектом.

Експериментальне дослідження по обтиску проводилося в статті [121]. При проведенні порівняння були взяті матриця з гладким профілем та з хвиловим. Розроблена математична модель для розрахунку. Отримані формули і співвідношення по визначенню напружень та деформацій, які виникають при

деформуванні в матриці з хвильовим профілем. За отриманими результатами було побудовано графік залежності зусилля від переміщення пуансона. Результати експериментальних досліджень показали, що в матриці з хвильовим профілем спостерігається ступінчастий характер навантаження і в цілому вдалося зменшити зусилля обтиску. Експериментально отримані графіки підтверджують дану теорію. При аналізі графіків видно, що зусилля впало на 25%. А при вимірюванні заготовок вдалося встановити, що покращення коефіцієнта обтиску становить 9%.

В роботі [122] проведений опис технології по виготовленню гільз для патронів. Для початку пропонують використовувати заготовку з прутка. Потім комбінованим видавлюванням отримати заготовку для витягування. В подальшому проводячи витягування з потоншенням отримати довгу заготовку з тонкою стінкою і після цього, використовуючи операцію обтиску, отримати конічну заготовку.

Дослідження в статті [123] показує схеми обтиску в матрицях при застосуванні направляючої частини. Для визначення впливу технологічних параметрів обтиску були застосовані матриці з різним кутом. Результати експерименту показують, як може відбуватися втрата стійкості матеріалу. Для цього був зроблений графік залежності коефіцієнту обтиску в залежності від кута матриці. Були встановлені залежності, при якій відносній товщині заготовки проходить виникнення дефектів та при яких кутах. Зроблені графіки залежності різної відносної товщини стінки при різних кутах матриці та від коефіцієнта обтиску. Також визначений приріст товщини стінки біля краю заготовки, але він має нерівномірний характер.

Математична модель обтиску розглядалася в статті [124]. Матеріал заготовки приймався з початковою анізотропією властивостей. Під час обтиску матеріал зміцнюється, для течії металу справедлива умова Мізеса-Хілла. Для розрахунку використовувалися формули, які дозволяють отримати достовірний результат при якому враховуються властивості матеріалу. Було визначено НДС заготовки під час деформування та величину анізотропії властивостей. За отриманими результатами побудовані графіки для залежностей компонентів

напруження від відносного радіуса для сталі 08кп та алюмінію АМГ6. Зміну зусилля можна оцінити по графіку залежності зусилля від кута матриці. Оптимальні кути знаходяться в межах $12...18^\circ$. Встановлено, що коефіцієнт обтиску зменшується при збільшенні кута та коефіцієнта тертя. Отримані дані по зміні зусилля в залежності від кута та коефіцієнта обтиску. Знайдено залежності товщини кромки трубною заготовки і коефіцієнта обтиску та як впливає кут матриці на коефіцієнт обтиску.

За допомогою розробленої математичної моделі в статті [125] проведено дослідження по обтиску. В статі проводився аналіз обтиску заготовок з матеріалу 12X18H10T. Для проведення аналізу був проведений розрахунок операції обтиску. За отриманими даними можна оцінити напружено-деформований стан. Отримані графіки показують залежність зміни напруження в стінці при зміні кута, зміни довжини деформованої ділянки, та коефіцієнта тертя в осередку деформації. Досліджено зміну товщини стінки заготовки при проходженні обтиску. Та дані рекомендації по підбору довжини заготовки.

Вплив тертя на операціях обтиску досліджувався в статті [126]. Було проведено дослідження, яке показує можливість отримання деталей за допомогою обтиску роздачі для конічних деталей. Було проведено аналіз по наявним дослідженням. Визначено товщину стінки, деформацію по товщині стінки, дотичні деформації і т.д.. Отримано співвідношення для розрахунку заготовки та коефіцієнтів обтиску роздачі. Розроблено математичну модель, яка дала можливість змодельовати таку операцію. Для перевірки отриманих теоретичних результатів проводився експеримент. Похибка теоретичного дослідження становила до 9%. Отриманні дані по потоншенню стінки та зміни висоти отриманої деталі відносно заготовки.

Експериментальні дослідження по обтиску та роздачі проводилися в роботі [127]. Дослідження проводилися на заготовці з латуні Л63. В процесі були встановленні умови появи дефектів при обтиску і роздачі при застосуванні матриці з різними кутами. Показано зображення отриманих зразків та дефектів. За результатами замірів було побудовано графіки залежності коефіцієнтів обтиску та

роздачі та зміна від них зусилля. Отримані дані дозволяють встановити оптимальні кути деформування в межах $18...20^\circ$. Розбіжність результатів з теоретичними становила 10-15%.

Витягування з потоншення стінки досліджувалося в матеріалах роботи [128]. Для розрахунку процесу було розроблено математичну модель витягування з потоншенням циліндричної вісесиметричної товстостінної заготовки. Матеріал заготовки вважався з анізотропними механічними властивостями, абсолютно жорстким, течія металу вісесиметрична. Тертя між поверхнями приймається за Кулоном. Були отримані рівняння для знайдення величин швидкості та інтенсивності деформації та його розподілу по заготовці та в осередку деформації. Задача розглядається в циліндричній системі координат. При теоретичному розрахунку результатами були графіки залежності коефіцієнту потоншення від кута та відносною товщини заготовки. Для визначення силових режимів було проведено експеримент при якому змінювали кут матриці. На графіку зусилля від кута матриці відображалися залежності теоретичного і експериментального значень. Величина похибки при порівнянні становила до 10%.

Основним завданням в роботі [129] по дослідженню обтиску особливо тонкостінних заготовок було теоретичне вивчення процесу. Тонкостінними вважаються заготовки з відносною товщиною менше 0,5. Тому при обтиску зусилля потрібно прикладати до торця заготовки, в іншому випадку можлива втрата стійкості. Стан при обтиску вважали плоским. Вихідним рівнянням було рівняння рівноваги в осередку деформації при деформування вісесиметричної заготовки з урахуванням тертя. Для обтиску заготовки всередину вставляється технологічна вставка. В результаті виконання роботи були проведені теоретичні і експериментальні дослідження та отримані математичні залежності для розрахунку НДС для даного процесу. Виявлено вплив тертя в даному процесі.

Дослідження по виявленню НДС в заготовках під час обтиску і роздачі проводилося в статті [130]. Дослідження проводились при зміні коефіцієнта тертя для отримання процесу одночасної роздачі і обтиску. Було отримано графіки залежності значення компонент напруження при різному коефіцієнті тертя,

визначено деформації, зміну деформації в осередку деформування. Визначили зміну товщини заготовки. Встановлено значення збільшення висоти при обтиску і роздачі.

В роботі [131] досліджувалася поперечна втрата стійкості різностінних заготовок при обтиску. Дослідження проводилися для ступінчастих матриць. Для вирішення задачі були прийняті допущення процесу і розроблена математична модель. Отримані рівняння для оцінки НДС заготовки. В процесі були зроблені графіки по впливу ступеня деформації і різностінності на коефіцієнт нерівномірності. Отримана модель дозволяє полегшити розрахунок технологічних процесів витягування та виключити такі дефекти як втрата стійкості та руйнування заготовки.

Виконана робота в статті [132] по дослідженню різних операцій деформування, включаючи операції обтиску. В результаті отримані результати дозволяють визначати кінематику течії металу, визначати напружено-деформований стан в заготовці. Також дають можливість визначити зусилля процесу для циліндричних вісесиметричних деталей враховуючи анізотропію властивостей присутню в матеріалі заготовки.

Дослідження теоретичних і технологічних аспектів при обтиску трубних заготовок наведено в статті [133]. Дані рівняння та співвідношення надають можливість провести аналіз та розрахунок напруження і деформацій в осередку деформування та визначити поле деформацій. Застосовуючи надану методику можна також визначити довжину трубної заготовки.

Можливість визначення напруження текучості при обтиску в товстостінних заготовках розглянуто в статті [134]. При експериментальному дослідженні було проведено обтиск з односторонніми кутами матриці 10° , 15° , $22^\circ 30'$ та коефіцієнтами обтиску 1,25, 1,4, 1,55, 1,7. Були отримані графіки залежності напруження текучості від коефіцієнту обтиску в заготовці, яка була поділена на зони. Для визначення напружень текучості виконували перерахунок з отриманих вимірів твердості в стінці здеформованої заготовки. Виявлено, що зростання

напружень відбувається одночасно зі збільшенням коефіцієнта обтиску, відносної товщини заготовки та збільшення кута матриці.

Питання втрати стійкості та її умови при обтиску вивчалися в статті [135]. В даній статті розглянуто умову утворення дефекту вигляді гофрів. Було проаналізовано при якій відносній товщині з'являються такі дефекти. Для аналізу з математичної точки зору були застосовані наступні методи: елементи теорії поверхонь, елементи конічних оболонок та енергетичний метод втрати стійкості конічних оболонок. При застосуванні цих методів змогли визначити деформації, роботу внутрішніх сил, врахувати анізотропію властивостей матеріалу. Розрахунки критичного коефіцієнту обтиску проводилися для сталі 08кп. Проаналізувавши отримані графіки залежності зміни коефіцієнту обтиску можна зробити висновок. Зміна кута матриці в межах 10° - 45° не особливо впливає на зміну величини граничного коефіцієнту обтиску. Зміна коефіцієнта тертя лінійно зменшує граничний коефіцієнт обтиску, значення коефіцієнту обтиску більші при менших значеннях зміцнення. При більшій по напрямку радіуса анізотропії коефіцієнт обтиску зростає, якщо в дотичному напрямку - то зменшується.

Проведення досліджень по визначенню силових режимів обтиску проводилось в статті [136]. Дослідження проводили при застосуванні методу кінцевих елементів при обтиску циліндричних заготовок. Матеріалом заготовки була сталь 10. Моделювання проводили в програмі QForm. Вивчалися зміни при різних кутах матриці та коефіцієнтах обтиску. В результаті отримано графічну залежність зусилля від відносного переміщення заготовки. При детальному аналізі виявлено, що зусилля змінюється в чотирьох випадках, на початку процесу різка зміна, при обтиску зусилля зростає плавно, в кінці при утворенні шийки значення зусилля максимальне. Також приведені графіки зміни зусилля від відносної висоти, але при зміні коефіцієнтів тертя, залежності зусилля від кута матриці, зусилля від зміни коефіцієнту тертя. Оптимальними кутами для обтиску можна вважати 15° ... 25° .

Обтиск труб з товстою стінкою розглядався в статті [137]. Моделювання проводили в QForm на товстостінній заготовці проводячи процес простого

обтиску та обтиску з потоншенням. Були отримані залежності зміни коефіцієнту неоднорідності напружень від зміни кута матриці. На розподілі коефіцієнту неоднорідності середніх напружень при кутах 10° - 30° він збільшився на 30-40% в залежності від досліджуваної точки. На графіках залежності коефіцієнту від тертя на інструменті він збільшувався на внутрішній поверхні на 15%. При розгляді коефіцієнту неоднорідності на зовнішніх поверхнях обтиску він зріс на 5%, потім відбувся спад. На графіку залежності коефіцієнта неоднорідності від коефіцієнта обтиску він зменшувався при збільшенні другого параметру.

Неоднорідність розподілу деформації в матеріалі заготовки при обтиску товстостінних деталей досліджувалося в статті [138]. Результати отримані при проведенні моделювання в QForm. При аналізі були взяті три точки на краю заготовки в яких на графіках відображено зміну неоднорідності коефіцієнта тертя в залежності від відносної величини переміщення пуансона, коефіцієнта тертя, зміни кута та коефіцієнта обтиску. З цих даних ми отримуємо коефіцієнти неоднорідності деформацій та їх зміну при збільшенні чи зменшенні цих параметрів. Доведено, що проведення моделювання може допомогти в оцінці напружено деформованого стану.

Залежності зміни при обтиску крайової зони заготовки досліджувалося в статті [139]. Було проведено експериментальне дослідження по встановленню залежностей зміни товщини при зміні відносної товщини, кута матриці та коефіцієнту обтиску. Отримані результати було зведено до таблиці та оформлено в графіках. При проведенні експерименту використовували матриці з кутом поверхні 10° , 15° , 20° , 25° . Виявлено практично лінійний характер поведінки характеристик. В якості досліджуваного матеріалу була сталь 20. Дані отримані при проведенні експерименту можуть бути використані при проектуванні інструменту.

Чисельний експеримент по обтиску проводився в програмі Deform [140]. Проводилося деформування трубної заготовки в матрицях з направляючою частиною. Матеріал заготовки був AISI 316L як аналог сталі 12X18H10T. Тертя між заготовкою і інструментом приймали по Кулону. Було встановлено

закономірності по висоті заготовок для обтиску. Вивчено етапи зміни величини зусилля. Виявлено напружений стан та силові режими в стінці заготовки. Результати обтиску порівнювали з роздачею заготовки і як при цьому змінюється довжина заготовки. При обтиску вона змінюється до 7%, при роздачі до 14%. Тому при обтиску нею можна знехтувати, а при роздачі обов'язково враховувати. Підібрано коефіцієнт тертя для нержавіючої сталі та сталі 10. Для підтвердження результатів теоретичного моделювання було проведено експеримент, що підтвердив отримані дані. Виконане дослідження фінансувалося по завданню Міносвіти.

В середовищі програми QForm було проведено теоретичне моделювання операцій обтиску та обтиску з потоншенням, яке описане в статті [141]. Досліджувалася неоднорідність розподілення деформації по об'єму стінки при поєднанні різних операцій. При моделюванні характеристики відслідковувалися в трьох різних елементах. По отриманому розподілу визначили, що найбільше значення коефіцієнта неоднорідності спостерігалось в точках, які пройшли потоншення та видавлювання від 1% та до 77,5%. Залежності зміни коефіцієнта неоднорідності від кута матриці, коефіцієнта потоншення та коефіцієнта обтиску відображені у графіках статті. Були виявлені зміни закономірності технологічних параметрів від геометрії інструменту та умов проведення деформування і зміну коефіцієнтів обтиску та потоншення, а також зміну ступеня деформації при обтиску товстостінних заготовок.

В статті [142] наводиться спосіб для визначення форми та розмірів заготовки при проведенні розрахунку для виготовлення гільз. Також проведена робота дозволить інтенсифікувати теперішню технологію, що дозволяє зменшити кількість переходів витягування з потоншенням та зменшити витрати на виробництво.

Обтиск в конічних матрицях за відсутності радіальних деформацій на внутрішній поверхні товстостінних заготовок з труби описано в роботі [143]. Обтиск проводився з застосуванням матриць з кутом від 15° до 25° . Коефіцієнт обтиску змінювався в межах 1,2 до 1,5. Матеріалом заготовки був Д16АТ.

Дослідження проводилися теоретично і експериментально. За отриманими даними побудовано графіки для визначення впливу на коефіцієнт обтиску наступних величин: відносної товщини стінки, відносно висоти обтиснутої ділянки. Вони дозволяють оцінити зміни в матеріалі, які відбуваються при проведенні обтиску та враховувати їх при проектуванні технологічного оснащення та для врахування вищезгаданих характеристик для отримання деталей з потрібними розмірами.

Оцінювання напружено деформованого стану при обтиску в конічних матрицях та підхід для його оцінки описано в статті [144]. Була розроблена математична модель, яка дозволяє оцінити характеристики процесу обтиску в конічних матрицях та в матрицях з конічною і циліндричною частиною. В основі при вирішенні задачі виконували спільне вирішення диференціальних рівнянь рівноваги і умови текучості з урахуванням спряжень на границях ділянок. Отримані вирази в результаті математичного моделювання дозволяють оцінити розподіл НДС і врахувати анізотропію властивостей в матеріалі.

Обтиск в конічній матриці та його граничні можливості проводили в дослідженні [145]. В процесі проведення математичного моделювання були отримані формули для визначення напруженого стану. В результаті розрахунків побудований графік, який показує графічні залежності по зміні критичного коефіцієнту обтиску при різних кутах матриці. На графіку залежності відносно висоти можна оцінити зміни від ступеня деформації. Окремо отриманий графік для зміни коефіцієнту обтиску від деформації для сталі 08кп. Визначенні значення дозволяють враховувати зміну технологічних параметрів в вивчених діапазонах при проектування переходів обтиску.

При проведенні дослідження по обтиску циліндричних товстостінних заготовок [146] були визначені граничні можливості по деформуванню анізотропних матеріалів. Математичне моделювання процесу проводилось теоретично в режимі короткочасної повзучості. Дослідження проводилися на заготовках з матеріалів, які володіють великими анізотропними властивостями.

Отриманні дані в статті дозволяють враховувати властивості матеріалів при проектуванні оснащення та технологій обтиску трубних заготовок.

Описані в статті [147] експериментальні дослідження стосувалися обтиску товстостінних циліндричних заготовок. В якості інструменту використовував матрицю з кутом 20° . Обтиск проводився за схемами у вільному стані та з внутрішньою оправкою. Розміри заготовок та інструменту приводились в таблиці. Отримані експериментальні дані були зведені до таблиці та відображені в графіках. Приведені залежності товщини обтисненого матеріалу і необтисненого при різних коефіцієнтах обтиску. На кожній операції проводилися заміри зусилля процесу. В результаті встановлено, що при використанні оправки в циліндричній частині товщина більша ніж без оправки. Оправка не дає значної переваги для підвищення стійкості матеріалу заготовки.

Дослідження по формуванню обтиснених пустотілих деталей описано в статті [148]. Процес проводився для двох типів деталей, які отримуються обтиском з роздачею та заготовок, отриманих витягуванням, які пізніше обжималися. Проводилося визначення залежностей для коефіцієнта обтиску та для визначення припуску для отримання деталей в розмір. При аналізі технологія по обтиску листової заготовки виявилась ефективною.

Аналіз обтиску та ефекту крайового розширення при обтиску заготовок із труби описано в статті [149]. Використовуючи рівняння та умови пластичності визначили закон розподілу напружень на торці заготовки. Провівши розрахунок отримали співвідношення, які дозволяють провести аналіз осередку деформації. Визначено вплив радіусу матриці на переході циліндричної та конічної частини. Для врахування вище вказаних результатів було розроблено методику для врахування результатів при проектуванні інструменту. Для перевірки розрахунків на практиці було проведено експеримент, результати якого показали достовірність розрахунків.

Дефект крайового розширення заготовки розглядався в статті [150]. Досліджувався спосіб визначення розміру крайової ділянки методом планування експерименту. Були визначені рівняння за допомогою яких можна розрахувати, як

відносна товщина і радіус матриці та значення її кута впливають на розміри дефектної ділянки. Отриманні дані дозволяють визначати параметри інструменту та як вони впливатимуть на довжину даної ділянки.

Питання по виникненню дефекту втрати стійкості під час обтиску трубних заготовок вивчалось в статті [151]. Дослідження проводилися на заготовках, які були в стані наклепу, так і тих, що пройшли відпал. Кут матриці становив 50° . Матеріалом заготовки була сталь 20. Дані по розмірам заготовки представлені у вигляді таблиці. У висновках після моделювання вказано, що менша вірогідність появи дефектів спостерігається в попередньо наклепаних заготовках та з більшою товщиною стінки. При збільшенні коефіцієнту обтиску зменшується стійкість заготовок в наклепаному та відпаленому металі.

Метод обтиску роздачі досліджувався при моделюванні в DEFORM та експериментальному дослідженні в роботі [152]. При розрахунку виявили НДС, який виникає при таких видах операцій. Визначенні основні види браку, деякі були отримані дослідним шляхом. При експерименті було виявлено розбіжність результатів моделювання при яких заготовки фактично зруйнувалися. Для отримання достовірних результатів був введений коефіцієнт, який враховує виникаючі розтягуючі напруження. Введений коефіцієнт дозволив отримати більш достовірні результати по руйнуванню заготовки при обтиску. Зроблені рекомендації по застосуванню вказаних даних в промисловості.

В статті [153] наведені дані обтиску циліндричної заготовки з Латуні Л63. Було проведено комп'ютерне моделювання для дослідження операції обтиску.

Для визначення енергетичних режимів при обтиску трубної заготовки в статті [154] була розроблена методика, яка враховує умови їх деформування. Проведені дослідження дозволяють встановити вплив розміру та форми інструменту, коефіцієнтів обтиску та деформації по осьовим напруженням на граничний коефіцієнт обтиску. Розрахунки враховували тертя між заготовкою та інструментом. Проведені експерименти підтверджують правдивість розрахунків.

Вивчення факторів, які обмежують можливість обтиску трубних заготовок проводилось в статті [155]. Проведені дослідження виконувалися на практиці.

Була складена таблиця з розмірами заготовок. Відслідковувався момент появи дефекту на краю заготовки та на скільки конусною виходить циліндрична частина заготовки. Були представлені графіки при різному коефіцієнті обтиску для виявлення конусності при рівному відношенні діаметрів від кута матриці. Для отримання точного внутрішнього діаметру були дані рекомендації по врахуванню результатів виконаного дослідження, які потрібно враховувати при проектуванні штампового інструменту.

В статті [156] приводяться результати по обтиску з потоншенням циліндричних пустотілих заготовок. Виявлено напружено-деформований стан при суміщеному процесі обтиску з потоншенням стінки. На різних стадіях процесу визначалися деформації, які виникають по об'єму заготовки. Вивчався вплив на обтиск таких технологічних параметрів як коефіцієнт обтиску, тертя на контактних поверхнях, кут матриці. Для розрахунку інструменту при аналізі результатів були отримані залежності для визначення напружень та деформації в заготовці при зміні його параметрів.

Вплив геометрії матриці на силу обтиску з потоншенням досліджувалися в роботі [157]. В роботі здійснено розв'язок задачі обтиску шляхом проведення комп'ютерного моделювання. Вивчалася зміна параметрів заготовки при зміні кута матриці в межах 10° - 23° . В якості матеріалу заготовки була сталь 10. Отримані графіки залежності зусилля від відносної висоти обтиску та кута матриці. Визначені виникаючі напруження по висоті заготовки в трьох точках при куті матриці 10° та залежність зміни напруження при зміні кута матриці. Збільшення кута матриці з 10° до 30° призводить до збільшення максимальних розтягуючих напружень на 30-40%.

Вплив потоншення стінки при обтиску трубної заготовки оцінювався в статті [158]. Вивчення впливу в процесі обтиску проводилось для коефіцієнтів обтиску в межах 0,7-0,9 для заготовки зі сталі 10. В результаті моделювання був складений графік зміни зусилля від коефіцієнта потоншення для різних коефіцієнтів обтиску. Встановлено вплив ступеня потоншення на максимальні розтягуючі і стискаючі напруження і умови при якому проходить втрата стійкості.

Отримані графіки залежності напруження та деформацій від коефіцієнту потоншення. В висновку отримано значення впливу характеристик на протікання процесу обтиску з калібруванням. Значний вплив чинить коефіцієнт потоншення, але потрібно також враховувати його поєднання з коефіцієнтом обтиску, бо при перевищенні допустимих характеристик коефіцієнту потоншення заготовка буде втрачати стійкість. Встановлено значення максимальних допустимих коефіцієнтів.

1.3. Висновки та постановка задач досліджень

Висновки.

1. Існуючі технології пластичного формоутворення виробів зі змінною товщиною стінки великої довжини включають операції штампування в наступній послідовності: гаряче осаджування вихідних циліндричних заготовок, гаряче зворотне видавлювання з таких заготовок порожнистих напівфабрикатів, подальше витягування з потоншенням в штампах отриманих напівфабрикатів за декілька переходів або ротаційне витягування з потоншенням та кінцеву операцію обтиску. Використання витягування з потоншенням в штампах дозволяє збільшити продуктивність виготовлення та підвищити точність форми і розмірів виробів.

2. Для отримання порожнистих напівфабрикатів під подальше витягування з потоншенням використовують гаряче та холодне видавлювання. Використання гарячого зворотного видавлювання для отримання порожнистих напівфабрикатів потребує підвищення стійкості деформуючого інструменту, що можна забезпечити зниженням зусилля видавлювання і питомих зусиль на деформуючому інструменті. Для цього застосовують схему прямого видавлювання з роздачею. Пряме видавлювання з роздачею дозволяє зменшити зусилля та питомі зусилля видавлювання. Така схема низькопродуктивна по причині складнощів при видаленні напівфабрикату із штампу. Застосування зворотного видавлювання з роздачею в рухомій матриці усуває вказаний недолік і тим самим суттєво підвищує продуктивність видавлювання. Однак практично

відсутні дані по використанню видавлювання в рухомій матриці для отримання порожнистих виробів великих розмірів.

3. Для виконання потоншення стінки з одночасним збільшенням висоти виробів, які виготовляються із порожнистих напівфабрикатів з низьковуглецевих сталей і кольорових металів, в основному використовують холодне витягування з потоншенням через одну або декілька послідовно розташованих конусних матриць. При витягуванні виробів великих розмірів відбувається викривлення донної частини, що потребує додаткової операції калібрування. Для зменшення або вилучення викривлення застосовують витягування пуансоном спеціального профілю, який дозволяє створювати додаткове тягнуче зусилля за стінку zdeформованої заготовки та розвантажити донну частину при витягуванні.

4. Аналіз літературних джерел по витягуванню з потоншенням показав, що в теперішній час для визначення конструктивних і технологічних параметрів також застосовують комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів в середовищах DEFORM і QFORM. Процеси витягування достатньо вивчені в напрямку впливу геометричної форми матриці на зусилля деформування, форму і розміри виробів з постійною товщиною стінки по висоті. Недостатньо даних по вказаних параметрах для витягування з потоншенням виробів зі стінкою змінної товщини по висоті і практично відсутні відомості по витягуванню з прикладанням тягнучого зусилля напівфабрикатів чи виробів із латуні .

5. При виробництві виробів спеціального призначення, зокрема гільз для снарядів, витягування з потоншенням використовується як проміжна операція для отримання циліндричних порожнистих напівфабрикатів зі змінною товщиною стінки під подальший обтиск в матрицях відповідної форми. Проведений аналіз літературних джерел по обтиску показав, що теоретичні та експериментальні дослідження, а також результати моделювання за допомогою методу скінченних елементів в основному стосуються обтиску напівфабрикатів з постійною товщиною стінки в матрицях різноманітної конфігурації і направлені на встановлення впливу форми матриці на силові режими деформування, втрату стійкості стінок та потовщення стінки при обтиску, коефіцієнт обтиску.

Використання матриць з деформуючою поверхнею спеціальної форми дозволяє зменшити сили тертя на контактуючій поверхні, знизити зусилля обтиску та збільшити коефіцієнт обтиску.

На основі аналізу літературних джерел в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Із використанням методу скінченних елементів створити математичні моделі та провести комп'ютерний аналіз гарячого осаджування циліндричної заготовки та гарячого зворотного видавлювання з роздачею в рухомій матриці вісесиметричного порожнистого напівфабрикату із латуні під подальше витягування з потоншенням. На стадії осаджування передбачити формоутворення кругового виступу на торці під подальше отримання фланцю. Встановити необхідний підігрів деформуючого інструмента та швидкість деформування для забезпечення температурного інтервалу осаджування і видавлювання, виявити зусилля деформування, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті та напружено-деформований при формоутворенні.

2. Методом скінченних елементів створити математичні моделі та виконати комп'ютерний аналіз переходів холодного витягування з потоншенням напівфабрикату, який отриманий гарячим видавлюванням, з отриманням напівфабрикату заданої форми та потрібними властивостями здеформованого металу під подальший обтиск. При цьому для підвищення продуктивності витягування і точності форми донної частини використати пуансон спеціального профілю для створення тягнучого зусилля за стінку здеформованого напівфабрикату. Встановити граничні ступені деформації на переходах витягування, виявити силові режими, питомі зусилля, роботу деформації, напружено-деформований стан здеформованих заготовок по переходах витягування та кінцеві форми і розміри напівфабрикатів по переходах.

3. Для процесу витягування з потоншенням із прикладанням тягнучого зусилля за стінку здеформованої заготовки з використанням методу спільного розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності отримати

аналітичні залежності для визначення напруженого стану та зусилля витягування, які можуть бути використані при інженерних розрахунках параметрів такого витягування

4. Провести комп'ютерний аналіз процесу пластичного формоутворення фланцю на торці напівфабрикату з формуванням необхідної макроструктури металу у місці переходу фланцю у донну частину, яка забезпечить потрібну довговічність виробу при експлуатації. При цьому визначити параметри для реалізації формоутворення фланцю на пресовому обладнанні.

5. З урахуванням накопичених деформацій у напівфабрикаті після останнього переходу витягування з потоншенням створити математичну модель та провести моделювання процесу холодного обтиску в матриці з деформуючою поверхнею спеціального профілю для отримання виробу кінцевої форми і розмірів та заданими механічними властивостями здеформованого металу. При цьому встановити силові режими формоутворення, питомі зусилля на деформуючому інструменті та форму і розміри виробу.

6. З використанням результатів комп'ютерного моделювання виконати розроблення, здійснити проектування конструкцій штампового оснащення для гарячого осаджування і видавлювання, переходів холодного витягування та формоутворення виробу обтиском.

7. Впровадити результати роботи на виробництві та в навчальному процесі.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДИК ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ТА ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ ВИРОБІВ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ ЗІ ЗМІННОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ

2.1. Аналіз параметрів які впливають на процеси гарячого і холодного пластичного формоутворення

Найбільш важливі параметри, які мають місце при виготовленні виробів з різних металів процесами гарячого і холодного пластичного формоутворення можливо розділити на три групи (рис. 2.1):

2.1.1 Конструктивні параметри. До цих параметрів відносять конструкцію деформуючого інструменту: пуансонів, матриць та виштовхувачів. Форма інструменту разом з тертям при течії металу на контактуючих поверхнях дуже впливає на характер формозміни металу при пластичному формоутворенні, а також на силові режими деформування та розподіл питомих зусиль. Кінцева геометрія виробу також визначається формою інструменту та конструкцією штампового оснащення. Причому розміри, які визначаються поза контактною деформацією, до теперішнього часу уточнюються експериментальним шляхом, після чого корегуються розміри вихідних заготовок.

2.1.2 Технологічні параметри. Такі параметри визначаються особливостями технологічних операцій ХОШ виробів. До них відноситься ступінь деформації, який визначає силові режими деформування та кількість переходів при отриманні виробів процесами гарячого і холодного пластичного формоутворення.

Геометрична форма вихідних заготовок, що визначається по кресленню деталі та підготовчими і кінцевими операціями, які будуть використані для виготовлення виробу, також впливає на кількість переходів і силові режими формоутворення виробу процесами гарячого і холодного пластичного формоутворення. Більшість таких процесів характеризуються наявністю неусталеної течії металу, причому в багатьох з них неусталена течія переходить в

усталену стадію. Наявність неусталеної течії металу впливає на пластичність металу, що деформується. Для процесів з усталеною стадією має місце локальний характер осередку деформації, а решта об'єму металу, що деформується, знаходиться в пружному стані. Тому для визначення фактичних розмірів осередку деформації, кінцевої геометрії виробів, зміцнення здеформованого металу необхідно враховувати неусталену течію металу на стадії проектування. Наявність усталеної і неусталеної стадій характерна для процесів зворотного видавлювання, витягування з потоншенням. Процеси осаджування та обтиску мають тільки неусталені стадії, на яких зусилля деформування постійно зростає.

Для зниження силових режимів деформування використовують примусове зміщення інструменту (створюються умови дії активних сил тертя). У вказаних процесах зусилля можна знизити до 10-15%. Наприклад, при зворотному видавлюванні порожнин примусове переміщення матриці сприяє течії металу в стінку, що зменшує зусилля видавлювання. Зміщення інструменту також впливає на характер формозміни металу та механічні властивості виробів після деформування.

Крім того, в таких процесах, як витягування з потоншенням, видавлювання порожнистих виробів, має місце розвантаження металу після пластичної деформації. Розвантаження впливає на точність розмірів виробів при холодному пластичному формоутворенні і до теперішнього часу практично не враховується при проектуванні технологій.

Тип змащення вихідних заготовок, який характеризується коефіцієнтом тертя, залежить від виду операцій гарячого і холодного пластичного формоутворення, що використовуються для виготовлення виробів. Тип змащення також суттєво впливає на силові режими штампування, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті та його стійкість. В багатьох операціях гарячого і холодного пластичного формоутворення змащення визначає можливість отримання виробів за один перехід, а також пропрацювання структури металу пластичною деформацією. В теперішній час даних по впливу коефіцієнта тертя на геометрію виробів та властивості здеформованого металу недостатньо.

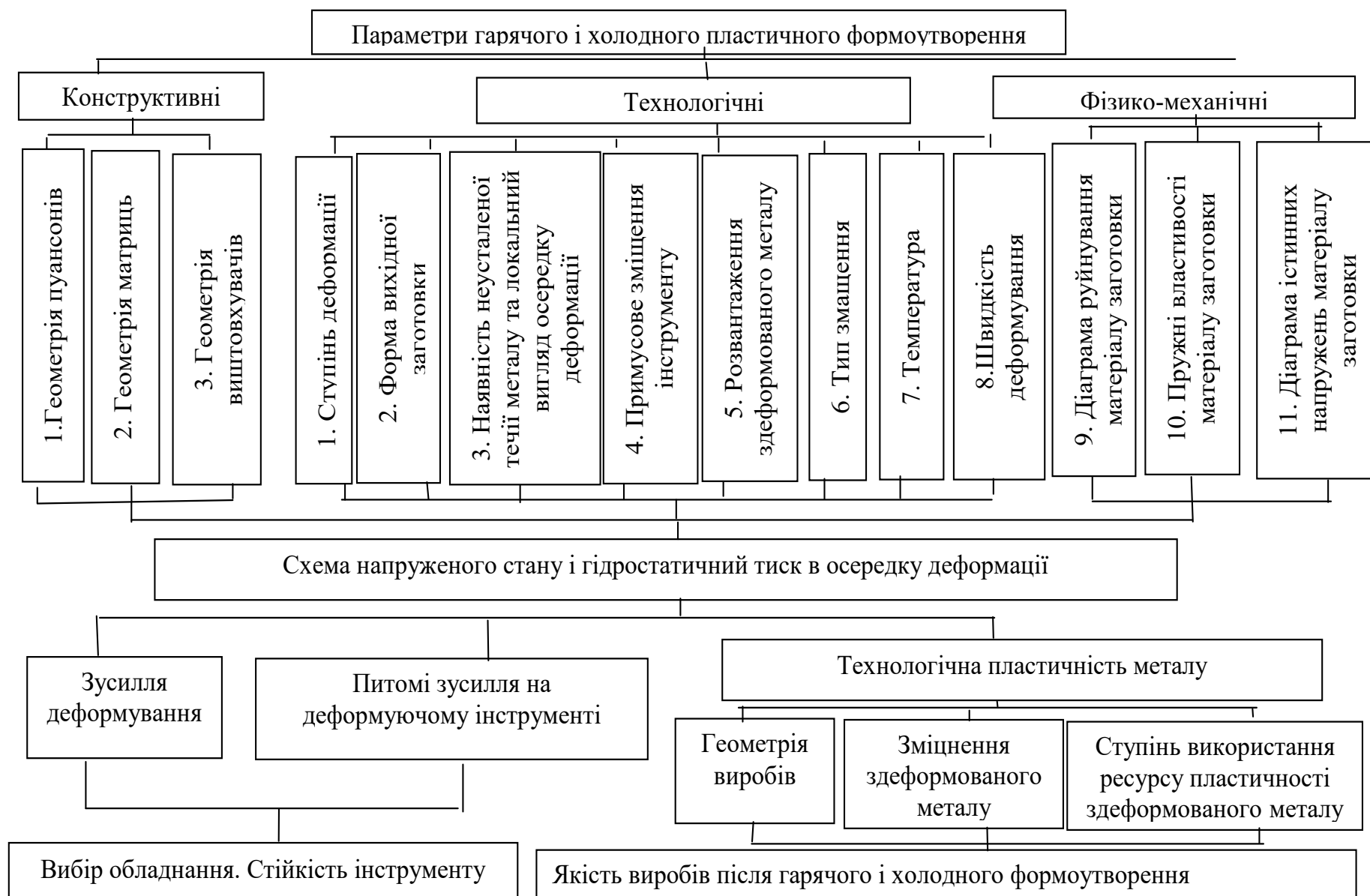


Рисунок 2.1. Аналіз параметрів процесів гарячого і холодного пластичного формоутворення

На процеси гарячого формоутворення важливе значення має витримка температурного інтервалу штампування, на яку суттєво впливає швидкість деформування (швидкість переміщення деформуючого інструменту). В деяких випадках потрібно виконувати попередній розігрів інструменту. В серійному і масовому виробництві виробів необхідно застосовувати примусове охолодження пуансонів, матриць і виштовхувачів.

2.1.3. Фізико-механічні параметри. До вказаних параметрів належать дані про властивості металу, що деформується процесами гарячого і холодного пластичного формоутворення. Це діаграма істинних напружень для врахування зміцнення металу при холодній деформації, діаграма пластичності матеріалу, яка дозволяє визначати можливість руйнування металів при холодній формозміні по ступеню використання ресурсу пластичності. В теперішній час при моделюванні процесів холодного пружно-пластичного формоутворення методами обробки тиском є можливість врахувати пружні властивості матеріалу, що деформується: модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона. Останнє дозволяє визначати розвиток напружено-деформованого стану по всьому об'ємі заготовки на неусталених стадіях процесів.

Конструктивні, технологічні та фізико-механічні параметри обумовлюють схему напруженого стану і гідростатичний тиск в осередку деформації при гарячому і холодному пластичному формоутворенні. Схема напружень та гідростатичний тиску є визначальними для зусилля деформування, розподілу питомих зусиль на оснащенні та технологічної пластичності металу (пластичність металу при виконанні тієї чи іншої операції формоутворення). По зусиллям деформування та роботі деформації вибирають ковальсько-пресове обладнання, питомі зусилля дозволяють розрахувати деформуючий інструмент на міцність. Силкові режими, питомі зусилля разом з технологічною пластичністю дають можливість отримати кінцеву геометрію виробів за один перехід. Крім цього, кінцева геометрія виробів, зміцнення та ступінь використання ресурсу

пластичності разом з пружною деформацією здеформованого металу визначають якість виробів, отриманих гарячим і холодним формоутворенням.

2.2. Методика теоретичних досліджень процесів холодного і гарячого формоутворення з використанням методу розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності

Для теоретичних досліджень по розрахунку процесів обробки тиском в роботі було використано метод розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Використавши даний метод можна отримати аналітичні залежності для знаходження чисельних значень силових режимів та розподілу питомих зусиль на поверхні деформуючого інструменту, визначити розміру осередку деформації.

Використання методу для аналізу процесів обробки тиском полягає в спільному вирішенні диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Диференціальні рівняння рівноваги і умова пластичності при деформуванні круглої вісесиметричної заготовки, мають наступний вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0 \quad (2.1)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + 6 \cdot \tau_{\rho z}^2} = \sigma_s$$

В деяких вісесиметричних задачах для вирішення проводиться з застосуванням сферичних координат (радіус ρ і два кути Θ , φ). Диференціальні рівняння для них виглядатимуть так:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} \cdot [2 \cdot \sigma_\rho - (\sigma_\varphi + \sigma_\theta) + \tau_{\rho\varphi} \cdot \operatorname{ctg} \varphi] = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} \cdot [3 \cdot \tau_{\rho\varphi} + (\sigma_\varphi - \sigma_\theta) \cdot \operatorname{ctg} \varphi] = 0$$

Спільне вирішення рівняння 2.1 і математичні ускладнення, які виникли при цьому, дали змогу Є.П. Унксову, М.В. Сторожеву та Є.О. Попову розробити

метод для розрахунку зусиль та питомих зусиль за допомогою наближених рівнянь рівноваги та умови пластичності. Метод ґрунтується на наступному :

1. Спочатку необхідно привести процес обробки тиском до вісесиметричної задачі. При наявності заготовки складної форми, потрібно розділити її на ряд об'ємів, на які можна накласти умови вісесиметричної задачі.

2. Визначення на контактуючих поверхнях розподілу нормальних напружень σ_n (тут n – узагальнена координата: це може бути ρ , z , Θ), цього достатньо щоб визначити зусилля деформування при інтегруванні виразу для σ_n по площі контактуючої поверхні F :

$$P_D = \iint_F \sigma_n dF \quad (2.3)$$

В циліндричних координатах отримуємо наступне:

$$P_\rho = \iint_F \sigma_z \rho d\theta d\rho \quad \text{або} \quad P_\theta = \iint_F \sigma_\rho R d\theta dz \quad (2.4)$$

3. В подальшому спрощують диференційні рівняння рівноваги, що взяті у формі та координатах, що відповідають умовам задачі. Для цього потрібно прийняти, що нормальні напруження залежать від однієї координати. Після чого отримаємо тільки одне рівняння рівноваги, яке матиме повні похідні замість часткових.

4. Потрібно взяти наближену умову пластичності.

Наближені умови пластичності для вісесиметричної задачі мають наступний вигляд:

а) Якщо $\sigma_\rho \neq \sigma_\theta \neq \sigma_z$, то наближена умова пластичності має вигляд має вигляд:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \pm \beta \sigma_s, \quad \sigma_\theta - \sigma_z = \pm \beta \sigma_s, \quad \sigma_z - \sigma_\rho = \pm \beta \sigma_s \quad (\text{де } \beta - \text{коефіцієнт Лоде}).$$

Із трьох виразів вибирають один по різниці максимального та мінімального напруження.

б) Якщо $\sigma_\rho = \sigma_\theta$, то НУП має вигляд: $\sigma_\rho - \sigma_z = \pm \sigma_s$.

Послідовність вирішення задач обробки металів тиском методом розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності.

1. Необхідно скласти розрахункову схему процесу, використовуючи наявну схему процесу ОМТ. При наявності заготовки складної форми, її потрібно розділити на ряд об'ємів, до яких можна застосувати умову вісесиметричної задачі.

2. Після чого необхідно для кожного об'єму задати розподіл дотичних напружень. Потрібно враховувати, що залежність для дотичних напружень, береться з урахуванням знаку, беруть лінійною і записують на контактуючій поверхні де діє деформуючий інструменту вигляді $\tau_k = \mu \sigma_n$ чи $\tau_k = \mu_s \sigma_s$, де μ та μ_s - коефіцієнт і фактор тертя між металом і інструментом.

Дотичні напруження між об'ємами на поверхнях зсуву записуються $\tau_3 = \sigma_s / \sqrt{3}$.

На вісях симетрії заготовки та на поверхні, де немає дотичних напружень, вони дорівнюють нулю. Якщо вісесиметрична задача подана в циліндричних координатах $\tau_{\rho z} = \tau_k \cdot 2 \cdot z / h$, та якщо в сферичних координатах $\tau_{\rho \varphi} = \tau_k \cdot 2 \cdot \varphi / \alpha$.

3. Необхідно записати для кожного об'єму рівняння рівноваги та наближену умову пластичності. Далі вибираємо рівняння рівноваги в якому є дотичне напруження з індексами, що отримане в пункті 2. Знаходимо для рівняння повні похідні. Після чого для розглянутих розподілів дотичних напружень і отриманих похідних від них рівняння рівноваги для вісесиметричної задачі виглядатимуть так [162]:

в циліндричних координатах

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + \frac{2 \cdot \tau_k}{h} = 0 \quad (2.5)$$

в сферичних координатах з урахуванням, що $\operatorname{ctg} \theta \approx 1 / \theta$:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{2 \cdot (\sigma_\rho - \sigma_\theta)}{\rho} + \frac{4 \cdot \tau_k \cdot \rho}{\alpha} = 0 \quad (2.6)$$

4. Після чого потрібно розділити змінні в рівнянні рівноваги і інтегруючи вирішити його. При інтегруванні довільні константи визначають з граничних умов. В результаті спільного вирішення рівняння рівноваги з

наближеною умовою пластичності отримаємо вираз для розподілу нормальних напружень на контактуючій поверхні металу та деформуючого інструменту.

5. По формулам 2.4 отримуємо формулу для зусилля деформування.

6. Якщо наявні лінії розподілу течії металу в заготовці радіусом R , вираз для цього параметру можливо знайти за рівнянням:

$$\frac{\partial P_D}{\partial R} = 0 \quad (2.7)$$

2.3. Методика проведення чисельних експериментів з використанням методу скінченних елементів

2.3.1. Використання методу скінченних елементів для аналізу холодної формозміни матеріалів

В роботі обґрунтовано можливість використання методу скінченних елементів для процесів гарячого та холодного формоутворення для створення та обрахунку математичних моделей, що забезпечить отримання достовірних результатів без додаткового доопрацювання експериментальним шляхом, яке полягає в наступному:

1. Силкові режими P_D питомі зусилля p на поверхнях, що контактують будуть залежати від конструктивних Π_K , технологічних Π_T та фізико-механічних $\Pi_{\Phi M}$ параметрів. І тому для отримання даних по зусиллю деформування $P_D = f(\Pi_K, \Pi_T, \Pi_{\Phi M})$, питомих зусиллях $p = f(\Pi_K, \Pi_T, \Pi_{\Phi M})$ в результаті моделювання процесів ОМТ потрібно враховувати вище згадані параметри, так як вони є функціями цих параметрів для виготовлення готового виробу з заданими властивостями.

2. Моделювання процесів необхідно проводити з початкового положення заготовки. Це надасть можливість отримати дані по НДС по об'єму заготовки, розмірів осередку деформації, зміцнення матеріалу при деформуванні, кінцеву форму виробу. Врахування загального впливу параметрів (рис. 2.2) надасть можливість визначити силкові режими, питомі зусилля на поверхні

деформуючого інструменту та ресурс пластичності металу і визначити необхідну кількість переходів



Рисунок 2.2 Схема прогнозування та виробів при моделюванні процесів ОМТ

3. Проведення моделювання для отримання виробу з заданими властивостями та визначення ресурсу пластичності на кожному з переходів надає можливість скоротити кількість необхідних операцій з кінцевої геометрії деталі без втрати властивостей.

4. Для забезпечення отримання виробу з заданою формою та властивостями встановлюється вплив конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрів на характер формоутворення для забезпечення раціональних силових режимів, збільшення стійкості інструменту та зменшенням кількості операцій.

Для більш детального вивчення розвитку напружено-деформованого стану, отримання кінцевої форми на переходах гарячого осаджування, гарячого зворотного видавлювання та переходах холодного формоутворення витягування з потоншенням та обтиском, процеси моделюються з початкового положення з розподіленням на певну кількість кроків навантаження. Співвідношення які приведені надалі стосуватимуться одного кроку навантаження.

2.3.2. Скінчено-елементний аналіз кінцевого пружно-пластичного НДС з використанням великих переміщень

Якщо потрібно вирішити задачу з використанням МСЕ з переміщеннями, поворотами скінчених елементів і пружно-пластичними деформаціями по виразах описаним раніше, є можливість отримати помилкові значення результатів, якщо при великих геометричних нелінійностях будуть мати місце великі пластичні деформації. Крім помилкових результатів, розв'язання буде розходитися при ітераційному процесі під час використання недостатньої кількості кроків навантаження.

При кінцевих деформаціях принцип віртуальності робіт матиме наступний вираз:

$$\int_V S_{ij} \delta E_{ij} dV = \int_S q_i \delta_i dS \quad (2.9)$$

в якому S_{ij} – 2-й тензор напружень Піюлі–Кірхгофа, E_{ij} – тензор деформації Гріна–Лагранжа, V і S – об'єм і площа тіла, q_i – зовнішнє навантаження, δ є символ варіації. Наведемо підхід представлення цього рівняння в скінчено-елементному формулюванні. Якщо розглядати деформування тіла за час $t + \Delta t$ то рівняння (2.9) матиме наступний вигляд:

$$\int_V {}^{t+\Delta t} S_{ij} \delta {}^{t+\Delta t} E_{ij} dV = \int_S {}^{t+\Delta t} q_i \delta {}^{t+\Delta t} \delta_i dS \quad (2.10)$$

Для наступного кроку навантаження вирази будуть виглядати так:

$${}^{t+\Delta t} S_{ij} = {}^t S_{ij} + S_{ij}(\Delta t) \quad (2.11)$$

$${}^{t+\Delta t} \delta_i = {}^t \delta_i + \delta_i(\Delta t) \quad (2.12)$$

$${}^{t+\Delta t} q_i = {}^t q_i + q_i(\Delta t)$$

в якому

${}^t S_{ij}$, ${}^t \delta_i$, ${}^t q_i$, є відповідно: 2-й тензор напружень Піоли–Кірхгофа, переміщення точок тіла, зовнішні сили за час t .

S_{ij} , δ_i , q_i це приріст вказаних величин на наступному кроці навантаження (або за час Δt).

Тензор деформації Гріна–Лагранжа за час $t + \Delta t$ має вигляд:

$${}^{t+\Delta t} E_{ij} = \frac{1}{2} \left({}^{t+\Delta t} \delta_{i,j} + {}^{t+\Delta t} \delta_{j,i} + {}^{t+\Delta t} \delta_{l,i} \cdot {}^{t+\Delta t} \delta_{l,j} \right) \quad (2.13)$$

Запишемо:

$${}^{t+\Delta t} E_{ij} = {}^t E_{ij} + E_{ij}(\Delta t) \quad (2.14)$$

$$\text{в якому } {}^t E_{ij} = \frac{1}{2} \left({}^t \delta_{i,j} + {}^t \delta_{j,i} + {}^t \delta_{l,i} \cdot {}^t \delta_{l,j} \right)$$

Приріст деформації за час Δt буде становити:

$$E_{ij}(\Delta t) = e_{ij} + \eta_{ij} \quad (2.15)$$

в якому

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\delta_{i,j} + \delta_{j,i} + \delta_{l,j} \cdot \delta_{l,i} + \delta_{l,i} \cdot \delta_{l,j} \right) \text{ лінійна частина тензора деформацій}$$

нелінійна частина тензора деформацій

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\delta_{l,i} \cdot \delta_{l,j} \right) \quad (2.16)$$

В формулах (2.13)-(2.15) і (2.16) кома означає частинну похідну: тобто наприклад,

$${}^t \delta_{i,j} = \frac{\partial {}^t \delta_i}{\partial \rho_j}, \text{ де } {}^t \delta_i \text{ є переміщення частинок тіла за кроки навантаження за час } t.$$

Врахувавши, що $\delta {}^{t+\Delta t} E_{ij} = \delta {}^t E_{ij} + \delta E_{ij} = \delta {}^t E_{ij} + \delta e_{ij} + \delta \eta_{ij}$, запишемо рівняння (2.10) в наступному вигляді.

$$\int_V {}^t S_{ij} \delta {}^t E_{ij} dV + \int_V {}^t S_{ij} \delta e_{ij} dV + \int_V {}^t S_{ij} \delta \eta_{ij} dV + \int_V S_{ij} \delta {}^t E_{ij} dV +$$

$$\begin{aligned}
& + \int_V S_{ij} \delta e_{ij} dV + \int_V S_{ij} \delta \eta_{ij} dV = \int_S {}^t q_i \delta^t \delta_i dS + \int_S {}^t q_i \delta \delta_i dS + \\
& + \int_S q_i \delta^t \delta_i dS + \int_S q_i \delta \delta_i dS
\end{aligned} \tag{2.17}$$

У рівнянні (2.39) отримаємо рівність першого члена лівої сторони і правого члена правої сторони, тобто

$$\int_V {}^t S_{ij} \delta^t E_{ij} dV = \int_S {}^t q_i \delta^t \delta_i dS \tag{2.18}$$

що властиво принципу віртуальних робіт у конфігурації ${}^t C$. Далі другий і четвертий член правої частини можемо скласти:

$$\int_S {}^t q_i \delta^t \delta_i dS + \int_S q_i \delta \delta_i dS = \int_S {}^{t+\Delta t} q_i \delta \delta_i dS \tag{2.19}$$

Аналогічно можемо з'єднати п'ятий і шостий доданки лівої сторони рівняння (2.39), приймаючи в увагу, що $\delta e_{ij} + \delta \eta_{ij} = \delta E_{ij}$, а узяті в увагу останні члени цього рівняння приведемо в порядок:

$$\int_V S_{ij} \delta E_{ij} dV + \int_V {}^t S_{ij} \delta \eta_{ij} dV = \int_S {}^{t+\Delta t} q_i \delta \delta_i dS - \int_V {}^t S_{ij} \delta e_{ij} dV \tag{2.20}$$

Врахувавши, що $\delta {}^{t+\Delta t} E_{ij} = \delta E_{ij}$ і $\delta {}^{t+\Delta t} \delta_i = \delta \delta_i$ та виразів (2.19) і (2.20) зведемо в рівнянні (2.17) член 4 лівої сторони і член 3 - правої сторони, тобто:

$$\int_V S_{ij} \delta^t E_{ij} dV = \int_S {}^t q_i \delta^t \delta_i dS \tag{2.21}$$

Врахувавши закон Гука в рівнянні (2.20) з'являється можливість його лінеаризувати

$$S_{ij} = C_{ijrs} e_{rs} \tag{2.22}$$

Припустивши, що $E_{rs} = e_{rs}$ або $\delta E_{rs} = \delta e_{rs}$

Для скінчено-елементної постановки є можливість представити в матричному вигляді для вирішення нелінійних задач:

$$\left[{}^t K_L + {}^t K_N \right] \{ \Delta \delta \} = \left\{ {}^{t+\Delta t} \Delta F \right\} \tag{2.23}$$

В якому K_L – є лінійною частиною, а K_N – нелінійною частиною матриці жорсткості, $\Delta\delta$ матриця-вектор невідомих переміщень, ${}^{t+\Delta t}F$ – матриця-вектор зовнішніх сил.

Рівняння (2.21), врахувавши (2.22), і виконання лінеаризації має вигляд:

$$\int_V C_{ijrs} e_{rs} \delta^t E_{ij} dV = \int_S q_i \delta^t \delta_i dS \quad (2.24)$$

Рівняння в формулюванні МСЕ і в матричній формі має наступний вигляд:

$$[K_{NEL}]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} \quad (2.25)$$

в якому

$[K_{NEL}]$ – нелінійна матриця жорсткості,

$\Delta\delta$ – приріст переміщень за час Δt ,

ΔF – приріст зовнішніх сил за один крок навантаження.

2.3.3. Обґрунтування підходів в методі скінчених елементів для здійснення аналізу геометричних та фізично нелінійних задач пружно-пластичного деформування

В наявних програмних комплексах для моделювання процесів ОМТ з врахуванням пружно-пластичної складової, які засновані на методі МСЕ для того, щоб виконувалася умова (2.25) використовують в основному наступні ітераційні процедури для вирішення рівнянь рівноваги.

Першим варіантом є спосіб змінних потужностей або Ньютона-Рафсона, застосовуючи який для скінчених елементів, які перебувають в пластичному стані, потрібно знайти пружно-пластичні матриці $[D^{ep}]$ і потім розраховують нові матриці жорсткості $[k^{ep}]$. Цей метод має недоліки, так як приходить повністю формувати та вирішувати системи рівнянь рівноваги для кожного кроку, що становить значний обсяг даних та затрат машинного часу на здійснення обчислень.

Другим варіантом є спосіб початкових деформацій. Його перевагою над першим методом є те, що матриця жорсткості всієї системи скінчених елементів

[K] залишається постійною, а при досягненні певного рівня дійсних напружень відбувається відносно них корегування деформацій.

Третім варіантом є підхід початкових напружень. Тут використовуються початкові напруження замість деформацій, відбувається приведення пружного рішення до відповідності з дійсними напруженнями при досягнутих деформаціях.

Даний спосіб має переваги такі, як:

- рішення при використанні його сходяться для будь-якої залежності між напруженнями та деформаціями;
- самостійно враховуються розвантаження в zdeформованому тілі;
- підхід справедливий для ідеального пластичного матеріалу, що дозволяє проведення випробувань моделей на основі експериментальних даних проводячи моделювання процесів деформування на свинцевих заготовках. Сутність виконання обчислень в тому, що приріст напружень на кожному наближенні вираховується від їх рівноважних значень.

2.4. Методика проведення експериментальних досліджень

Метою експериментального дослідження є встановлення параметрів гарячого штампування порожнистих виробів з високоміцного алюмінієвого сплаву В93 для досягнення необхідного пропрацювання структури металу пластичною деформацією по висоті стінки.

Задачею експериментального дослідження було визначення параметрів процесу для порівняння з теоретичним результатами, отримання виробу з потрібним формою і розмірами та пропрацюванням структури металу пластичною деформацією для забезпечення потрібних механічних властивостей в стінці після термообробки.

Були проведені розрахунки методом MCE за допомогою програми DEFORM. Розрахунок розмірів заготовки та її форми проводилися з використанням програми DEFORM. Початковими даними були температурний інтервал штампування 350-430°C. Швидкість інструмента для деформування $V_o =$

7мм/сек. Коефіцієнт тертя $\mu=0,15$. Моделювання проводилися для встановлення початкового нагріву заготовки та інструменту.

Ескіз пустотілого виробу з розмірами та загальний вигляд заготовки приведено на рис.2.3 та рис.2.4. В результаті моделювання було встановлено розміри та форму заготовки.

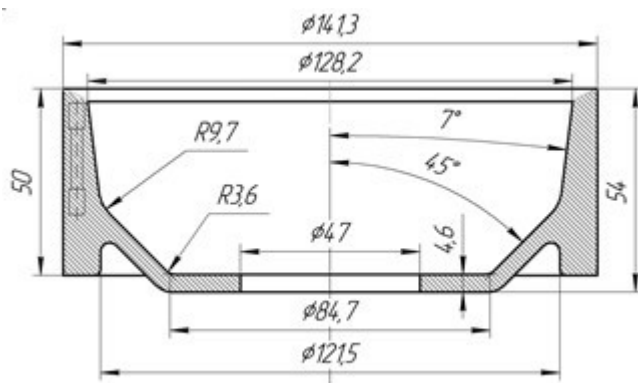


Рисунок 2.3 Форма та розміри виробу

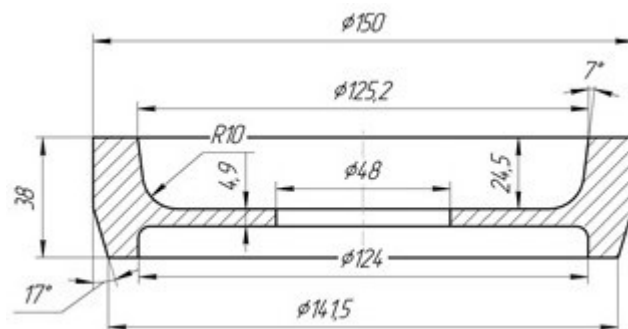


Рисунок 2.4 Розміри та форма заготовки

Розрахункові положення інструменту і заготовки при проведенні моделювання показані на рис.2.5.

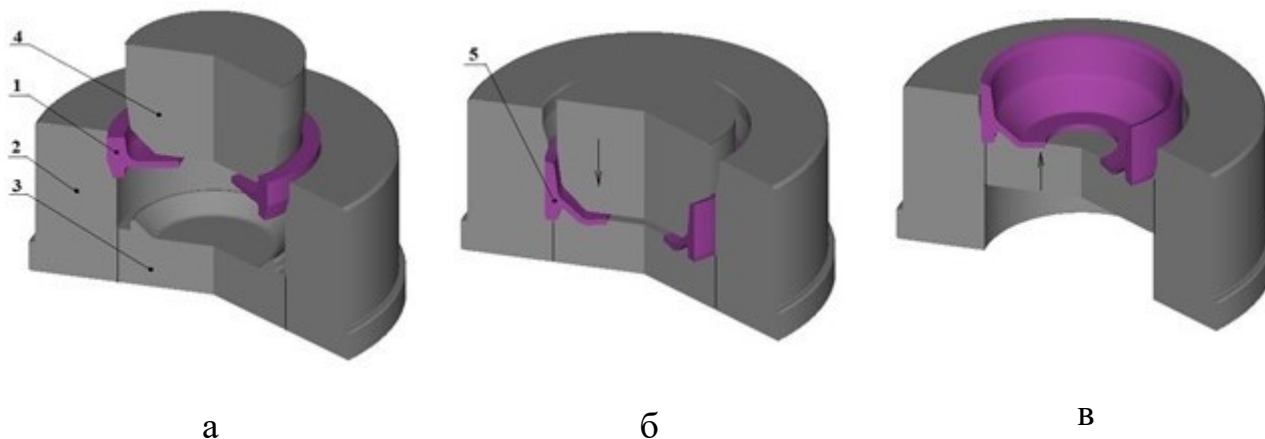


Рисунок 2.5 Розрахункові розташування деформуючого інструменту і заготовки показані в розрізі: а- розташування на початку, б- розташування в кінці, в- розташування після виштовхування

На початку штампування (рис.2.5 а) вихідну заготовку 1 встановлюють матрицю 2 в якій передбачена конічна частина для витягування з потоншення. В середині матриці розташований виштовхувач 3, для формування донної частини

та виштовхування виробу після штампування. Деформування проводиться за допомогою пуансона 4, який переміщується на 66 мм. На рис.2.5 б показано кінцеве розташування інструменту. Після закінчення деформування пуансон видаляється і здійснюється виштовхування заготовки (рис.2.5 в).

При моделюванні були встановлені розрахункові силові режими деформування та виштовхування виробу (рис.2.6).

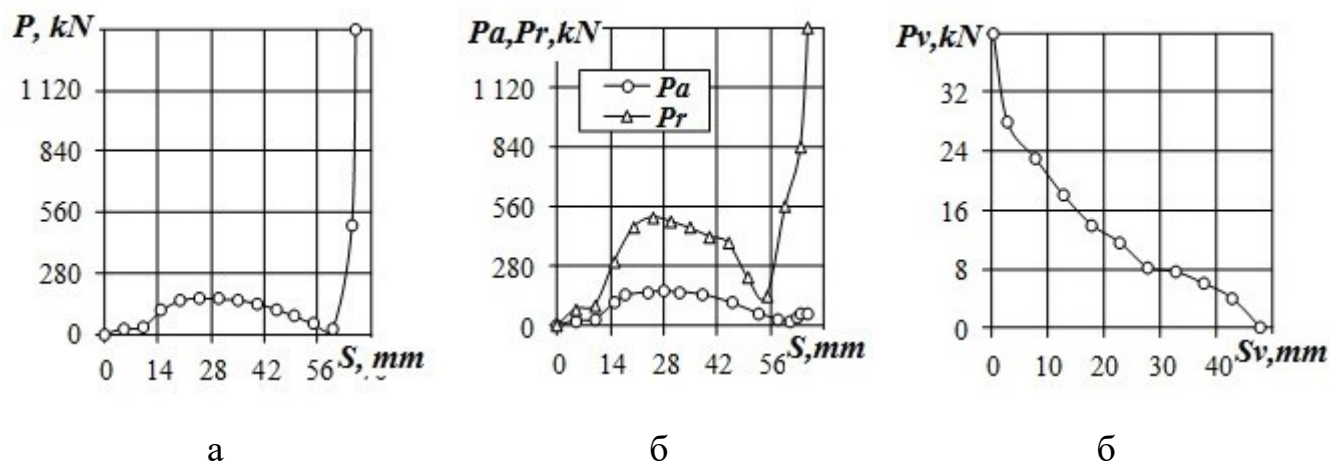


Рисунок 2.6 Графік зусилля від переміщення: а - зусилля деформування при переміщенні пуансона, б - графік залежності осьового зусилля і радіального на матриці при переміщенні пуансона, в - зусилля виштовхування від переміщення виштовхувача

При витягуванні максимальне значення зусилля на пуансоні становило 180 кН потім спадало до 25 кН в кінці витягування. При вирівнюванні дна зусилля становило 1400 кН. Зусилля при штампуванні, яке сприймала матриця в осьовому напрямку P_a при витягуванні, подібне до графіку витягування. Радіальне зусилля P_r має два максимуми: перший 510 кН при витягуванні, другий при калібруванні дна заготовки до 1400 кН.

Також для нагріву заготовки в результаті моделювання було встановлено температурні режими (рис.2.7).

Початковий нагрів заготовки встановлений на 430°C , а інструменту до 360°C . При переміщенні пуансона на 20 мм (рис.2.7а) в стінці заготовки температура падає до в стінці 418°C , в дні до 426°C .

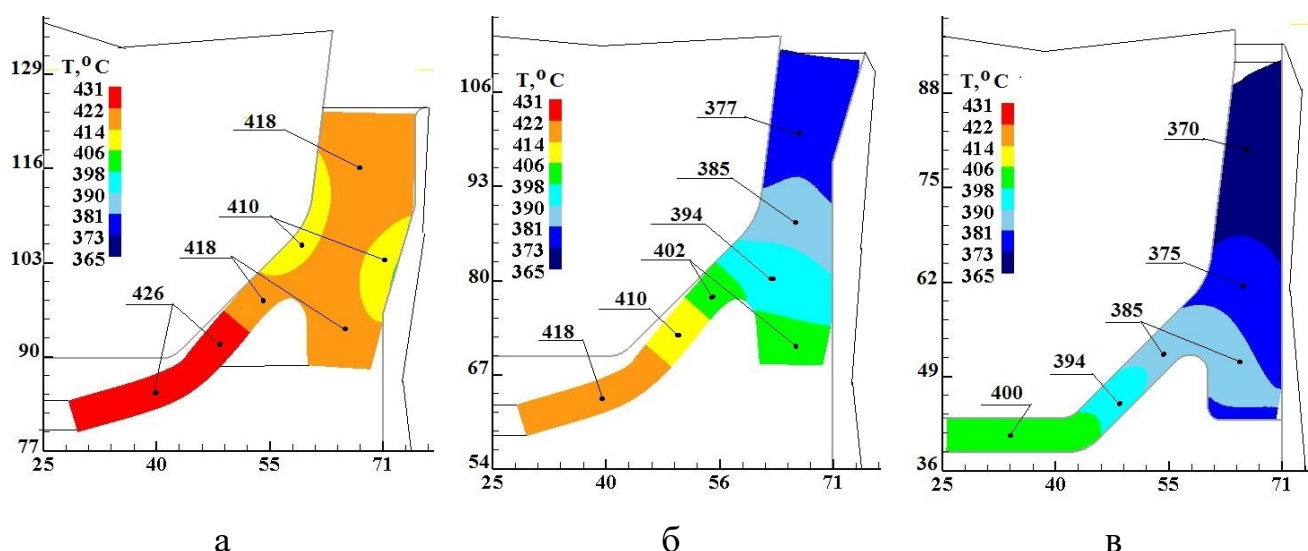


Рисунок 2.7 Етапи деформування деталі з розподілом температури по об'єму:
а- переміщення пуансона на 20мм, б-переміщення пуансона на 40 мм, в-кінцеве положення

На другому етапі (рис. 2.7б), при переміщенні на 40 мм (рис. 2.7в) температура в стінці знизилася до 377°C, в дні мінімальне значення становило 394°C.

Також для підбору матеріалу при проектуванні інструмента визначено розподіл нормальних напружень σ_n (рис.2.8) на контактуючих поверхнях заготовки та інструменту. Розміри на рис.2.8 та 2.9 по осях вказані в міліметрах.

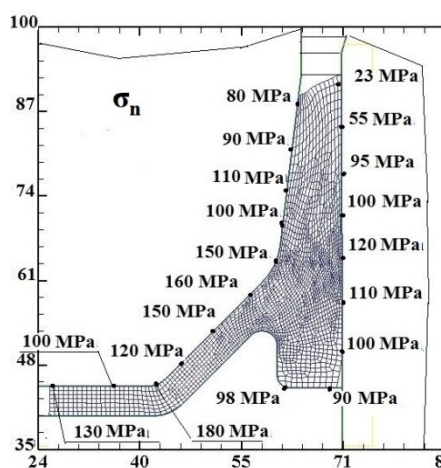


Рисунок 2.8 Розподіл нормальних напружень σ_n на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі.

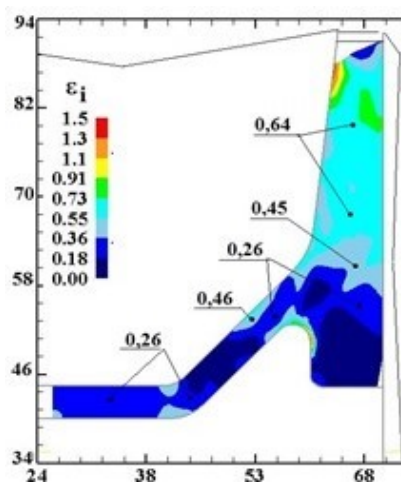


Рисунок 2.9 Розподіл інтенсивності деформації ϵ_i по об'єму заготовки.

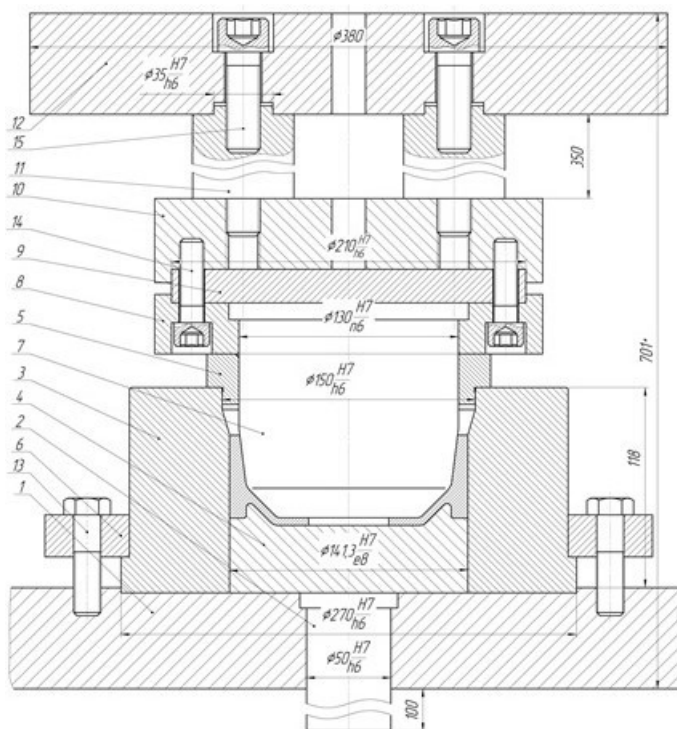
Максимальне значення σ_n на пуансоні досягло 180 МПа біля дна заготовки, на поверхні матриці максимальні значення напружень $\sigma_n=120$ біля середини по висоті стінки.

Встановлення пропрацювання структури металу пластичною деформацією оцінювали по величині інтенсивності деформації (рис.2.9). В стінці зверху $\varepsilon_i=0,26$ в нижній частині значення зростає до $\varepsilon_i=0,64$. В дні заготовки інтенсивність деформації була в межах $\varepsilon_i=0,26\div 0,46$.

Експериментальне оснащення та обладнання

Експеримент проводився з використанням гідравлічного пресу зусиллям 4 МН. Для проведення експерименту був спроектований та виготовлений штамп (рис.2.10).

На нижній плиті штампу 1 розміщується матриця 3, яка закріплена тримачем 6, з гвинтами 13. В середині матриці вкладений виштовхувач 4 та стержень виштовхувача 2, який знаходиться в плиті.



а



б

Рисунок 2.10 Вигляд штамп: а-креслення штамп, б- фото встановленого штамп на пресі

Верхня частина штампів складається з верхньої плити 12 до якої кріпляться подовжуючі шпильки 11 гвинтами 15. Знизу подовжуючі шпильки 11 вкручені в проміжну плиту 9. Пуансон 7 кріпиться за допомогою пуансонотримача 8 до проміжної плити 10 гвинтами 14. Між пуансоном 7 і проміжною плитою 10 встановлена підкладна плита 9. Направлення пуансона в штампі здійснюється по направляючому кільцю 5.

Відповідно до отриманих даних при комп'ютерному моделюванні процесу для забезпечення умов штампування було зроблено наступне: інструмент прогрівався газовою горілкою до 360°C. Заготовка покривалася змащенням LOCTITE 8191 і нагрівалася в електричній печі до 430 °C. Після підготовки заготовку закладали до матриці і при опусканні повзуна преси до низу виконували штампування. Зусилля процесу визначали за манометром на пресі. Максимальне значення в кінці деформування становило 1298 кН. Розбіжність з теоретичним значенням максимального зусилля становила 8%.

Вихідна заготовка показана на рис.2.11, а на рис. 2.12 представлені отримані вироби.



Рисунок 2.11 Вихідна заготовка



Рисунок 2.12 Отримані вироби

Після штампування виріб проходив термообробку по режиму T1, при якій відбувалося загартування при температурі 470°C і штучне старіння при температурі 130°C. Встановлення механічних характеристик проводилося при проведенні випробувань на розтяг зразків, які були вирізані зі стінки виробу в кількості 3 штук. Місце вирізання зразків позначено на рис.2.4. Результати отримані при випробуванні наступні: межа міцності σ_s умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$, відносне подовження δ і твердість HB. Дані замірів приведені в таблиці 1

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Зразок №	Механічні властивості			
	σ_{ϵ} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
1	510	480	4,1	152
2	510	470	4,3	155
3	510	470	4,1	152
Дані по кресленню	Не менше 480	Не менше 440	Не менше 4	Не менше 125

2.5. Висновки по розділу

1. Визначені основні параметри, які впливають на процеси гарячого і холодного пластичного формоутворення виробів. Параметри розподілені на три групи – конструктивні, технологічні та фізико-механічні. До конструктивних параметрів віднесено форму і розміри деформуючого інструменту. Технологічні параметри включають ступінь деформації, форму і розміри заготовки, наявність усталеної течії металу і локальний вигляд осередку деформації, розвантаження zdeформованого металу, тип змащення, температура, швидкість деформування. Фізико-механічні параметри включають діаграму істинних напружень, діаграму руйнування та пружні властивості матеріалу заготовки. Проведений аналіз параметрів та показаний їх вплив на силові режими формоутворення, технологічну пластичність металу та показники якості виробів.

2. Наведена методика аналізу процесів гарячого і холодного пластичного формоутворення виробів з використанням методу спільного розв'язку наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Представлена послідовність для такого методу отримання аналітичних залежностей для інженерних розрахунків, компонент напружень та зусилля деформування при формоутворенні вісесиметричних виробів.

3. Викладені основні залежності методу скінченних елементів для визначення пружно-пластичного стану металу з використанням великих переміщень. Наведені основні підходи методу для встановлення кінцевого деформованого стану при моделюванні гарячого і холодного пластичного формоутворення виробів.

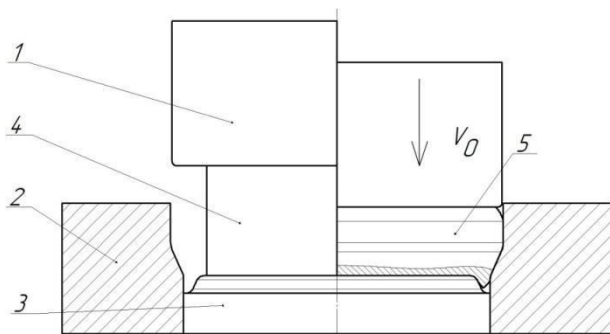
4. Запропонована, на прикладі моделювання методом скінченних елементів гарячого формоутворення порожнистого виробу з високоміцного алюмінієвого сплаву, методика проведення експериментальних досліджень для отримання виробу необхідної форми із заданими механічними властивостями zdeформованого металу.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАРЯЧОГО ПЛАСТИЧНОГО
ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОРОЖНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

3.1. Гаряче осаджування циліндричної заготовки

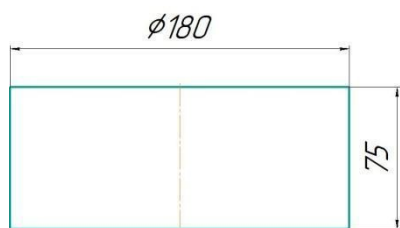
3.1.1. Схема процесу та розрахункові схеми осаджування

Рисунок 3.1 – Схема осаджування
заготовки

На рис 3.1 зображена схема процесу гарячого осаджування заготовки з метою отримання заготовки більшого діаметра з меншого, додатково відбувається калібрування верхньої та нижньої сторони і отримання кільцевого виступу на дні. Конусна частина заготовки формується по матриці і

служить для позиціонування на наступному переході. Заготовка 4 встановлена на виштовхувачі 3, який розміщений в матриці 2. При переміщенні пуансона 1 зі швидкістю V_0 до низу відбувається процес осаджування з формоутворенням кругового виступу на нижньому торці zdeформованої заготовки для подальшого утворення фланцю. Зовнішній діаметр заготовки отримується по внутрішньому діаметру матриці.

В якості вихідної заготовки використовується кругляк, який відрізаний з прутка діаметром 180 мм, матеріал латунь Л70. Для відрізання заготовки з прутка застосовуються методи механічної обробки або методи обробки металів тиском.

Рисунок 3.2 – Заготовка для
осаджування

Для заготовки вибираємо прутки за ГОСТом 2060-90 на гарячекатані прутки [159]. Форма та розміри заготовки показані на рис. 3.2.

Матеріал латунь Л70 має наступні характеристики, які відображені на рис. А.1

Наявні характеристики для латуні Л70 отримані з джерела [160]. В програмному

комплексі в основному представлені найменування матеріалів за іноземними стандартами. Тому підбирали матеріал, який за фізико-механічними властивостями та хімічним складом найближчий до латуні Л70. Найближчим аналогом для латуні Л70 є матеріал CuZn30 за позначенням німецького стандарту EN 12163: 1998 Copper and copper alloys. Rod for general purposes, який відсутній, та CuZn28, характеристики якого [161] показані на рис. А.2 - він подібний до CuZn30 і наявний в каталозі програми, тому він був використаний для розрахунку.

Розрахунок процесу осаджування проводився в програмі Deform 2D. Розрахункові схеми осаджування показані на рис. Б.1.

На рис. Б.1а показано початкове положення перед осаджуванням заготовки. Заготовка 2 знаходиться на виштовхувачі 4 і зверху притиснута пуансоном 1. Кінцеве розташування інструменту при осаджуванні показано на рис. Б.1б. Виштовхування напівфабрикату з матриці (рис. Б.1в).

Осаджування заготовки 2 проходить в декілька етапів: спочатку під дією пуансона 1, що тисне згори, заготовка 4 приймає форму бочки збільшуючись в діаметрі, і проходить затікання матеріалу в порожнину між матрицею 3 і виштовхувачем 4 для формування виступу для майбутнього фланця. Наприкінці осаджування матеріал впирається в стінку матриці 3, при цьому проходить формування зовнішньої циліндричної стінки напівфабрикату 5, яка донизу переходить в конічну (рис. Б.1б). Після осаджування пуансон 1 підіймається, напівфабрикат 5 залишається в матриці. При підйомі виштовхувача 4, який впирається знизу в напівфабрикат 5, відбувається виштовхування останнього з матриці (рис. Б.1в).

Початковими даними для моделювання було прийнято: заготовка: діаметром 180 мм та висотою 76 мм, коефіцієнт тертя між поверхнями деформуючого інструмента та заготовки за Зібелем $\mu=0,2$. Швидкість переміщення пуансона $v=40$ мм/сек. При моделюванні початкова температура заготовки була встановлена $T=850^{\circ}\text{C}$.

3.1.2. Силкові режими та питомі зусилля

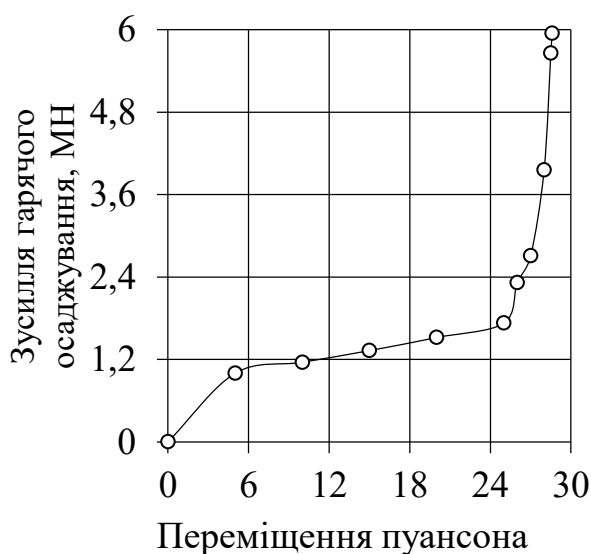


Рисунок 3.3 – Залежність зусилля осаджування від переміщення пуансона

На рис.3.3 наведено залежність зусилля гарячого осаджування від переміщення пуансона. Тут показано зміну величини зусилля на всьому протязі осаджування. На першій стадії деформування (при переміщенні пуансона до 10 мм) відбувається звичайне осаджування заготовки, при якому вона набуває бочкоподібної форми, зусилля спочатку різко, а потім плавно зростає до 1,16 МН. На проміжку переміщення 10-25 мм

відбувається затікання матеріалу у впадину на виштовхувачі для формування виступу для фланця, зусилля має значення 1,73 МН. На проміжку від 25-28,6 мм відбувається різке зростання зусилля при дотику осадженою заготовкою стінки матриці, початком формування зовнішньої стінки заготовки і завершенням формування виступу фланця. В цей час заготовка впирається в конічну, а потім в циліндричну частину матриці. Осаджування припиняється при проходженні пуансоном 28,6 мм. Зусилля в кінці процесу становить 5,95 МН.

Для оцінки питомих зусиль, які виникають в процесі осаджування, розглянемо рис. 3.4, на якому показані значення нормального напруження σ_n при деформуванні.

При розгляді нормальних напружень (рис. 3.4) спостерігається рівномірний їх розподіл на поверхнях інструменту. По центру заготовки на виштовхувачі і пуансоні подібні значення напружень $\sigma_n=167\div178$ МПа. До краю заготовки розбіжність значень зростає.

На пуансоні напруження зростають до $\sigma_n=299$ МПа.

На виштовхувачі напруження менші - $\sigma_n=208$ МПа, це значення в точці на радіусі.

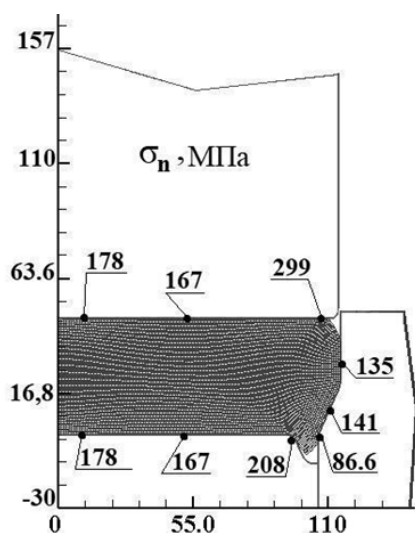


Рисунок 3.4 – Розподіл нормальних напружень на інструменті при осаджуванні

На матриці напруження розподіляються на поверхні, яка утворена перетином конуса і двох циліндрів. Внизу біля виступу значення напружень $\sigma_n=86,6$ МПа. Між поверхнями заготовки і конічної частини матриці - $\sigma_n=141$ МПа. На верхній циліндричній частині матриці нормальні напруження зростають до $\sigma_n=135$ МПа. За величиною нормальних напружень для процесу осаджування можна застосувати однобандажну матрицю.

3.1.3. Напружено-деформований стан напівфабрикату та температурний розподіл

Визначення напружень та деформацій, які спостерігаються при процесі гарячого осаджування, показано на рис. Б.2 та рис. Б.3. Значення напружень в кінці процесу були отримані при максимальному зусиллі. Для оцінки пропрацювання матеріалу в zdeформованому напівфабрикаті величини деформацій були визначені в кінці процесу.

Розподіл напружень в радіальному напрямку показаний на рис. Б.2а. Загалом переважають стискаючі напруження. Найбільші значення по центру заготовки становлять $\sigma_r=-163$ МПа. Наближаючись до поверхні напівфабрикату напруження зменшуються і зверху становлять $\sigma_r=-85$ МПа, до краю напівфабрикату зменшуючись до $\sigma_r=-15$ МПа, знизу напівфабрикату - $\sigma_r=-100$ МПа. Біля матриці значення стискаючих напружень становлять $\sigma_r=-150$ МПа. У виступі на дні заготовки напруження змінюються на розтягувальні і становлять $\sigma_r=18$ МПа.

Тангенціальні напруження, які показані на рис. Б.2б, мають схожий характер розподілу по об'єму напівфабрикату: в середині найбільші значення, до

краю заготовки поступово зменшуючись. Так, в центрі напівфабрикату вони становлять $\sigma_{\theta} = -156$ МПа. Біля поверхонь пуансона і виштовхувача значення досягають $\sigma_{\theta} = -127$ МПа. Поблизу краю zdeформованої заготовки біля виштовхувача - $\sigma_{\theta} = -83$ МПа, а біля пуансона - $\sigma_{\theta} = -98,9$ МПа. На кромці напівфабрикату напруження становлять $\sigma_{\theta} = -13,3$ МПа. В середині біля матриці напруження зростають до $\sigma_{\theta} = -173$ МПа. Так, як і радіальні напруження на виступі внизу напівфабрикату, напруження змінюються на розтягувальні зі значенням $\sigma_{\theta} = 25$ МПа.

Напружений стан в осьовому напрямку на круглій заготовці має вигляд кіл і показаний на рис. Б.2в. Зменшення напружень спостерігається з центру і до краю. В середині напруження досягають найбільшого значення $\sigma_z = -190$ МПа. Наступна зміна величини напружень при наближенні до краю заготовки має значення $\sigma_z = -155$ МПа. На краю заготовки значення напружень зменшуються до $\sigma_z = -104$ МПа. Локально біля радіуса виштовхувача осьові напруження досягають максимального значення $\sigma_z = -197$ МПа. Напруження у виступі змінюються на розтягувальні і становлять $\sigma_z = 30$ МПа.

Загальний розподіл напружень можна оцінити по інтенсивності напружень на рис. Б.2г. Найбільша інтенсивність напружень спостерігаються біля краю пуансона $\sigma_i = 90$ МПа і на радіусу виштовхувача $\sigma_i = 75$ МПа. В середньому шарі заготовки значення інтенсивності напруження знаходяться в діапазоні $\sigma_i = 28 \div 33,3$ МПа. Наближаючись до торців заготовки значення зростають до $\sigma_i = 43$ МПа. Біля інструменту спостерігається збільшення інтенсивності напружень до $\sigma_i = 81$ МПа. Максимальні значення знаходяться на кромці напівфабрикату $\sigma_i = 90$ МПа. У виступі інтенсивність напружень становить $\sigma_i = 25$ МПа.

На рисунку Б.3 показано розподіл компонент деформацій в напівфабрикаті після осаджування.

Радіальні деформації (рис. Б.3а) в центрі заготовки становлять $\varepsilon_r = -0,29$. В центрі всередині заготовки значення деформацій менші і дорівнюють $\varepsilon_r = -0,11$. В напрямку до краю значення деформацій є $\varepsilon_r = 0,2 \div 0,25$. Ближче до краю

деформації зростають до $\varepsilon_\rho = -0,3$. Біля матриці значення деформацій менші ніж в інших ділянках заготовки: на конічній частині - $\varepsilon_\rho = -0,18$, на циліндричній частині - $\varepsilon_\rho = 0,01$. Найбільші значення деформації знаходяться на верхній кромці напівфабрикату і становлять $\varepsilon_\rho = 0,33$. Тобто, в радіальному напрямку загалом переважають розтягувальні деформації.

Тангенціальний напрямок розподілу деформацій характеризується тільки розтягувальними деформаціями (рис. Б.3б). Всередині напівфабрикату максимальні значення становлять $\varepsilon_\theta = 0,31$. Біля поверхні напівфабрикату значення деформацій малі - $\varepsilon_\theta = 0,1$, і наближаючись до краю біля пуансона, зростають до $\varepsilon_\theta = 0,22$. Біля виштовхувача сягають $\varepsilon_\theta = 0,18$. Всередині напівфабрикату від центру і до краю деформації мають значення $\varepsilon_\theta = 0,27$. Біля циліндричної частини матриці деформації розтягувальні зі значенням $\varepsilon_\theta = 0,25$. У виступі на дні заготовки деформації приймають найменшого значення $\varepsilon_\theta = 0,14$.

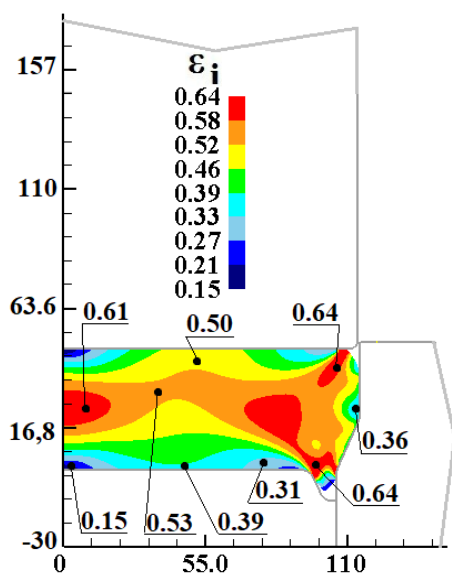


Рисунок 3.5 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i

Пропрацювання металу можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій по об'єму напівфабрикату рис. 3.5.

Найбільша інтенсивність деформацій спостерігається біля кромки напівфабрикату $\varepsilon_i = 0,64$ та посередині - $\varepsilon_i = 0,61$. Віддаляючись від середини деформації зменшуються до $\varepsilon_i = 0,53$.

Біля поверхні пуансона інтенсивність деформацій становить $\varepsilon_i = 0,5$. На поверхні напівфабрикату значення деформацій змінюється в діапазоні $\varepsilon_i = 0,31 \div 0,39$.

Розподіл деформацій по об'єму напівфабрикату по осьовому напрямку має наступний вигляд (рисунку Б.3в). Максимальне значення деформації мають всередині та біля краю напівфабрикату - $\varepsilon_z = -0,62$. На ділянках біля поверхні в центрі деформації зменшуються до $\varepsilon_z = 0,2$. По більшій частині напівфабрикату середні деформації становлять $\varepsilon_z = -$

0,52. Біля поверхні виштовхувача значення стискаючих деформацій коливається в діапазоні $\varepsilon_z = -0,31 \div -0,4$. На кромці зверху напівфабрикату деформації трохи збільшуються до значення $\varepsilon_z = -0,56$. Деформації, які виникають всередині напівфабрикату біля матриці на циліндричній частині зверху, мають значення $\varepsilon_z = -0,25$. Розтягувальні деформації також присутні в осьовому напрямку - $\varepsilon_z = 0,1$, хоч і вони значно менші стискаючих. У нижньому виступі деформації стискаючі і мають значення $\varepsilon_z = -0,26$.

Розподіл температури по напівфабрикаті на різних стадіях деформування показаний на рис. 3.6. Інструмент показаний тонкими сірими лініями.

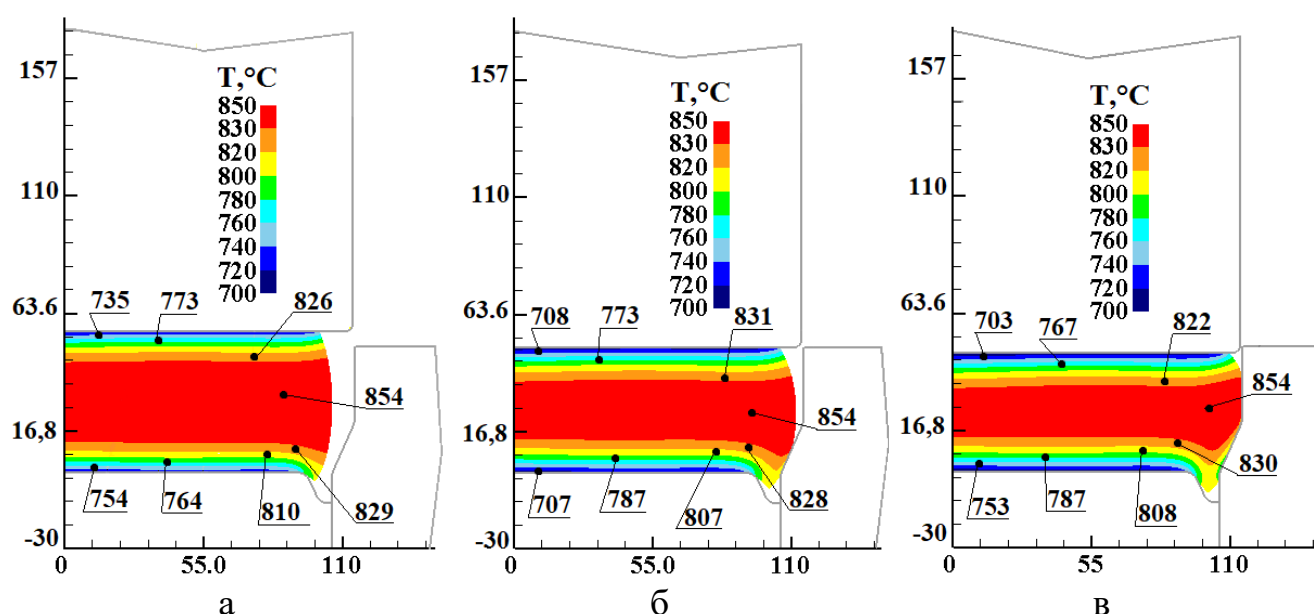


Рисунок 3.6 – Розподіл температури у напівфабрикаті при різному переміщенні пуансона: а - 20мм, б - 26 мм, в – 28,6 мм

Охолодження заготовки під час деформування відбувається поступово по мірі деформування - найбільш інтенсивна втрата тепла відбувається на контактних поверхнях інструмента та заготовки. Початкова температура заготовки становила $T = 850^\circ\text{C}$. При ході пуансона на 20 мм (рис. 3.6а) температура біля пуансона має значення $T = 735\text{--}826^\circ\text{C}$, біля виштовхувача значення змінилися до $T = 754\text{--}810^\circ\text{C}$. Нижчі значення спостерігалися по центру заготовки, до краю вони збільшилися. Всередині температура заготовки навіть трохи збільшилася за рахунок виділення тепла при деформуванні $T = 850\text{--}854^\circ\text{C}$. Після проходження 26 мм (рис. 3.6б) температура біля торця пуансона продовжує падати. На контактних

поверхнях по центрі заготовки вона становить $T=707-708\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ближче до середини заготовки температура особливо не змінилася і знаходиться в діапазоні $T=828-831\text{ }^{\circ}\text{C}$, біля контактних поверхонь $T=773-787\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура в готовому напівфабрикаті рис. 3.6в все ще знаходиться в діапазоні кувальних температур, що виключає утворення дефектів у вигляді тріщин. По центру заготовки температура коливається в діапазоні $T=703-753\text{ }^{\circ}\text{C}$, біля виштовхувача холодніше. Так як напівфабрикат знаходиться на виштовхувачі, то внизу температура значно вища $T=753-808\text{ }^{\circ}\text{C}$, біля пуансона температура змінюється до $T=703-822\text{ }^{\circ}\text{C}$. Всередині напівфабрикат залишається нагрітий до $T=854\text{ }^{\circ}\text{C}$.

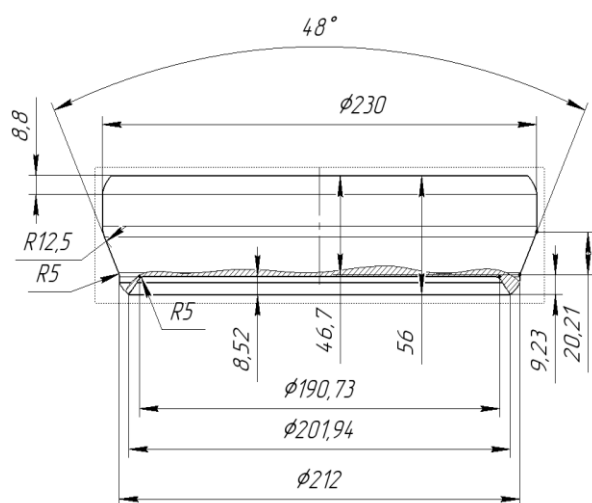


Рисунок 3.7 Форма і розміри напівфабрикату після гарячого осаджування

Проаналізувавши ці дані потрібно передбачити охолодження пуансона та матриці для зменшення нагріву та збільшення стійкості інструменту.

Кінцеві форма та розміри напівфабрикату показані на рис.3.7.

3.2. Гаряче зворотне видавлювання

3.2.1. Схема процесу та розрахункові схеми

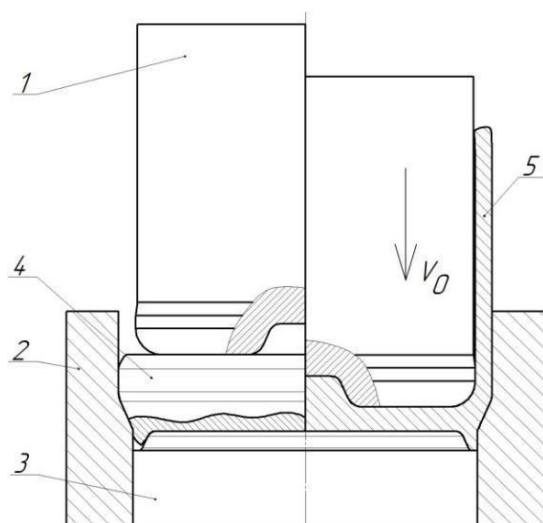


Рисунок 3.8 – Схема гарячого зворотного видавлювання

Процес гарячого зворотного видавлювання попередньо здеформованої заготовки показано на рис.3.8. Під час зворотного видавлювання пуансон 1 рухається вниз, а метал заготовки 4, стискаючись між пуансоном 1 і виштовхувачем 3, рухається вгору видавлюючись в проміжок між матрицею 2 і пуансоном 1 формуючи стінку.

Результати дослідження процесу гарячого зворотного видавлювання

публікувалися в статтях [164, 165].

Результати розрахунку наведені в додатку В. Моделювання виконувалося за допомогою програмного комплексу DEFORM 2D з використанням методу скінченних елементів.

Початкове розташування інструменту перед видавлюванням показано на рис.В1а. Напівфабрикат укладений в матрицю 2 на виштовхувач 3. На першій стадії пуансон 1 притискає заготовку 4 зверху. Друга стадія процесу видавлювання починається при русі пуансона вниз, метал стискається між пуансоном 1 і виштовхувачем 3, при цьому метал починає затікати в проміжок між пуансоном 1 і матрицею 2, виходячи назовні з матриці формуючи стінку. Також на цій стадії формується виступ всередині на дні заготовки і остаточно формується кінцевий виступ зовні на дні напівфабрикату. Пуансон зупиняється в кінцевому положенні внизу (рис.В1б). На третій стадії пуансон підіймається, напівфабрикат під дією сил тертя, які діють на стінку зовні, залишається в матриці (рис.В1в). На останній стадії виштовхувач 3 підіймається, впирається в дно напівфабрикату 5 та виштовхує його з матриці.

Початкові умови моделювання були такі: напівфабрикат попередньо осаджений (рис. 3.7), коефіцієнт тертя на контактних поверхнях за Зібелем $\mu=0,2$. Швидкість руху пуансона $V=40$ мм/сек. Початкова температура заготовки $T=850^{\circ}\text{C}$. Для зниження швидкості охолодження заготовки і забезпечення оптимальних температур штампування, нагрів інструменту становив $T=200^{\circ}\text{C}$.

3.2.2. Силкові режими та питомі зусилля

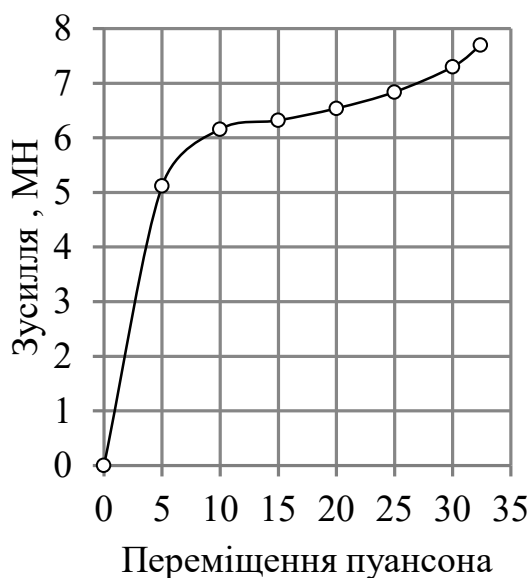


Рисунок 3.9 – Залежність зусилля гарячого зворотного видавлювання від переміщення пуансона

На графіку зусилля-хід (рис 3.9) показано зміну величини зусилля в залежності від переміщення пуансона на різних стадіях процесу гарячого зворотного видавлювання.

На проміжку переміщення інструменту 0-5 мм відбувається різке зростання зусилля деформування до 5,12 МН, на цьому етапі відбувається формування виступу на дні в середині та формування кільцевого виступу зовні внизу заготовки.

Також метал починає затікати в проміжок між пуансоном і матрицею. На проміжку 5-10 мм виступи на дні заготовки цілком сформовані і стінка починає виходити з матриці, зусилля деформування становить 6,16 МН. На проміжку 10 - 32,4 мм метал видавлюється в зазор між пуансоном і матрицею формуючи стінку, зусилля плавно зростає до 7,7 МН. Зусилля виштовхування напівфабрикату становило $P_{вишт.} = 11,5$ кН.

Питомі зусилля, які виникають на поверхні деформуючого інструменту при гарячому зворотному видавлюванні, можна оцінити за величинами нормального напруження σ_n (рис.3.10).

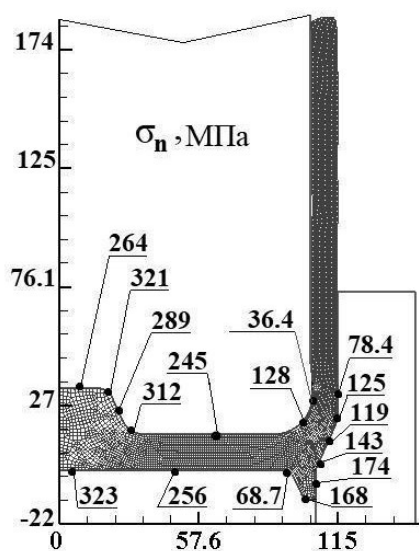


Рисунок 3.10 – Розподіл нормальних напружень на інструменті при зворотному видавлюванні

На рис.3.10 показано, що найбільші значення напруження спостерігаються на виштовхувачі по центру - $\sigma_n=323$ МПа. На плоскій поверхні виштовхувача значення напруження становлять $\sigma_n=256$ МПа. Віддаляючись від центру виштовхувача напруження зменшуються і на радіусі становлять $\sigma_n=68,7$ МПа. На пуансоні високі значення спостерігаються біля виступу по центру заготовки на радіусі верхньої кромки виступу - $\sigma_n=321$ МПа та при його основі - $\sigma_n=312$ МПа. На торці пуансона величина напружень становить $\sigma_n=245$ МПа, наближаючись до радіусу напруження зменшуються до $\sigma_n=128$ МПа. Найменші значення напружень спостерігаються на пояску пуансона - $\sigma_n=36,4$ МПа. На матриці основне навантаження сприймають циліндрична поверхня біля виступу - $\sigma_n=174$ МПа та конічна частина матриці, тут значення змінюються в діапазоні $\sigma_n=143$ МПа в низу і зменшуючись до верху $\sigma_n=125$ МПа на радіусі переходу конічної частини в циліндричну. Верхня циліндрична частина сприймає навантаження тільки при основі циліндру $\sigma_n=78,4$ МПа.

3.2.3. Напружено-деформований стан металу та температурний розподіл

На рис.В.2 показано напружений стан при гарячому зворотному видавлюванні. Результати отримані при найбільшому зусиллі, яке спостерігалось в кінці процесу.

Напруження, які виникають в радіальному напрямку, можна побачити на рис.В.2а. Загалом, в напівфабрикаті в цьому напрямку спостерігаються великі стискаючі напруження, а також в стінці напівфабрикату виявлені невеликі розтягуючі напруження - $\sigma_r=0,1$ МПа. На дні заготовки напруження розподілилися наступним чином. По центру у виступі на дні напруження

стискаючі становлять $\sigma_r = -280$ МПа. В дні заготовки напруження також стискаючі і знаходяться в діапазоні $\sigma_r = -105 \div -199$ МПа. В місці переходу дна в стінку значення напруження становить $\sigma_r = -94$ МПа і в подальшому до верху вони зменшуються до $\sigma_r = -35$ МПа. У кільцевому виступі на дні заготовки напруження мають значення $\sigma_r = -83,3$ МПа

Розподіл напружень в тангенціальному напрямку зображено на рис.В2 б. Здебільшого напруження стискаючі з невеличкою ділянкою, де спостерігаються розтягуючі напруження. На дні напівфабрикату у виступі стискаючі напруження мають значення $\sigma_\theta = -280$ МПа. На плоскій частині дна значення напружень знаходиться в межах $\sigma_\theta = -92,5 \div -194$ МПа. В ділянці з'єднання стінки та дна величина напружень становить $\sigma_\theta = -75$ МПа. Внизу стінки напівфабрикату напруження мають значення $\sigma_\theta = -32,5 \div -42,3$ МПа. Зовні напівфабрикату біля з'єднання конічної і циліндричної поверхонь стінки напруження розтягувальні - $\sigma_\theta = 20$ МПа. В самій стінці напруження змінюються від $\sigma_\theta = -4$ МПа до $\sigma_\theta = -17,5$ МПа. Напруження в кільцевому виступі зовні на дні заготовки мають середнє значення $\sigma_\theta = -55$ МПа.

В осьовому напрямку (рис.В.2в) на дні напівфабрикату напруження стискаючі, а стінці вони змінюються. У донній частині заготовки на виступі напруження стискаючі - $\sigma_z = -319$ МПа. При переході в плоску частину дна стискаючі напруження зменшуються і змінюються в діапазоні $\sigma_z = -91,3 \div -255$ МПа. На переході дна і стінки осьові напруження становлять $\sigma_z = -68,5$ МПа. Внизу стінки напруження всередині зі сторони пуансона додатні $\sigma_z = 46$ МПа, піднімаючись до верху додатні напруження зменшуються до $\sigma_z = 4,21$ МПа. З зовнішньої сторони стінки внизу біля матриці напруження становлять $\sigma_z = -27,3$ МПа, потім на невеликій ділянці змінюються на розтягуючі - $\sigma_z = 3,61$ МПа і до верху знову стають стискаючими - $\sigma_z = -3,37$ МПа.

Розподіл інтенсивності напружень в напівфабрикаті показано на рис В.2г. Найбільші значення спостерігаються в місті переходу дна і кільцевого виступу зовні - $\sigma_i = 110$ МПа. У виступі в середині напівфабрикату - $\sigma_i = 22,3$ МПа.

Інтенсивність напружень в плоскому дні змінюється в межах $\sigma_i=50\div57,7$ МПа. На радіусі біля пуансона значення становлять $\sigma_i=61$ МПа. Невеликі значення інтенсивності напружень спостерігаються в стінці напівфабрикату - $\sigma_i=4,12$ МПа.

Розподіл деформацій показаний на рис.В.3. Значення отримані в здеформованому напівфабрикаті в кінці гарячого зворотного видавлювання.

Значення величин деформації в радіальному напрямку зображені на рис. рис.В.3а. На плоскій частині дна значення загалом $\varepsilon_\rho = 0,45\div0,69$, біля центру пуансона вони зростають до $\varepsilon_\rho = 1,32$. У виступі на дні деформації знаходяться в діапазоні $\varepsilon_\rho = -0,19\div0,1$. В місці переходу стінки в дно $\varepsilon_\rho = 0,36$. У виступі зовні на дні заготовки $\varepsilon_\rho = -0,39$. Радіальні деформації в стінці напівфабрикату розподілилися наступним чином: з внутрішньої сторони від низу і до верху $\varepsilon_\rho = -0,08\div-0,34$, з зовнішньої сторони стінки біля матриці внизу $\varepsilon_\rho = -2,42$, піднімаючись до середини деформації зменшуються $\varepsilon_\rho = -1,41$. У верхній частині стінки є дві зони радіальних деформацій які переважають: це $\varepsilon_\rho = -0,85$ і зона на торці заготовки, де значення деформацій становлять $\varepsilon_\rho = -0,34$.

Тангенціальний розподіл деформацій показаний на рис.В.3б. По ньому бачимо, що деформації загалом спостерігаються розтягувальні. Аналізуючи донну частину бачимо, що в виступі в середині заготовки деформації змінюються в межах $\varepsilon_\theta = -0,2\div0,04$, зовні в центрі біля виштовхувача спостерігаються найбільші деформації в цьому напрямку $\varepsilon_\theta = 0,64$. В плоскій частині дна значення деформацій $\varepsilon_\theta = 0,51$. Біля радіусу та в місці переходу дна в стінку є зона великих деформацій $\varepsilon_\theta = 0,58$. У виступі на дні зовні деформації невеликі додатні $\varepsilon_\theta = 0,01\div0,11$. В стінці напівфабрикату деформації розтягувальні, біля дна їх значення $\varepsilon_\theta = 0,23\div0,51$. В середині стінки напівфабрикату - $\varepsilon_\theta = 0,27$. Наближаючись до верху стінки деформації продовжують зменшуватися і становлять $\varepsilon_\theta = 0,17$. Зона деформацій зі значенням $\varepsilon_\theta = 0,07$ знаходиться на торці стінки та спускається по стінці з зовнішньої сторони до матриці.

Розподіл осьових деформацій ε_z можна побачити на рис.В.3в. Загалом в розподілі переважають додатні деформації. В дні деформації розподілилися

наступним чином: у виступі в середині заготовки деформації мають значення $\varepsilon_z = -0,03 \div -0,38$, плоска частина дна характеризується стискаючими деформаціями $\varepsilon_z = -0,95 \div -1,6$, у виступі на дні напівфабрикату деформації незначні - $\varepsilon_z = 0,05$. З'єднання стінки та дна характеризується змінними деформаціями $\varepsilon_z = -0,6 \div 0,04$. В стінці напівфабрикату зона внизу біля матриці характеризується найбільшими додатними в цьому напрямку деформаціями $\varepsilon_z = 2$, в середині стінки деформації зменшуються до $\varepsilon_z = 1,07$. Піднімаючись вище по стінці деформації зменшуються і в цій частині переважає зона розтягувальних деформацій зі значенням $\varepsilon_z = 1,29$. Біля торця стінки значення знаходяться в межах $\varepsilon_z = 0,49 \div 0,97$. На торці стінки деформації мають значення $\varepsilon_z = 0,05 \div 0,1$.

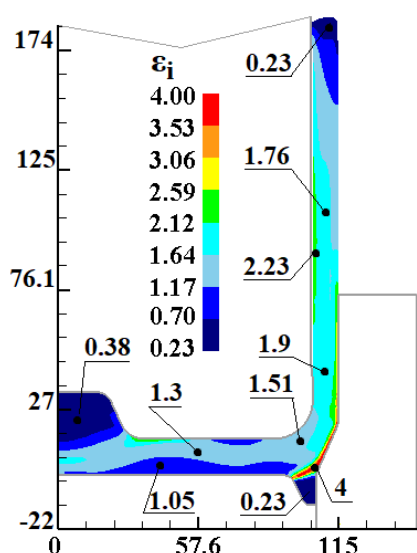


Рисунок. 3.11 – Розподіл інтенсивності деформацій

ε_i

Характер пропрацювання матеріалу оцінюємо за інтенсивністю деформацій (рис.3.11). Значення інтенсивності у виступі на дні заготовки становлять $\varepsilon_i = 0,38$. Від центру і до краю в плоскій частині дна є дві зони інтенсивності деформацій: перша внизу біля виштовхувача $\varepsilon_i = 1,05$, друга $\varepsilon_i = 1,3$ вверху під пуансоном. У місці з'єднання стінки та дна інтенсивність деформацій має значення $\varepsilon_i = 1,51$. Зона біля кінцевої поверхні матриці характеризується максимальною інтенсивністю деформацій $\varepsilon_i = 4$. В нижній та середніх частинах стінки напівфабрикату значення інтенсивності по всьому об'єму стінки знаходяться в межах $\varepsilon_i = 1,76 \div 2,23$. В торці напівфабрикату спостерігається невелика інтенсивність деформацій $\varepsilon_i = 0,23$.

Температурний розподіл в заготовці на різних етапах гарячого зворотного видавлювання показано на рис. 3.12. Інструмент показаний тонкими сірими лініями. Напівфабрикат охолоджується за рахунок контакту з інструментом та віддачею тепла в навколишнє середовище. Початкова температура заготовки становила $T = 850^\circ\text{C}$. Дозволений температурний інтервал штампування $T = 750-$

850°C для ділянок, що деформуються. На першому етапі (рис.3.12а) при переміщенні пуансона на 20мм напівфабрикат починає охолоджуватися біля торців. Температура на внутрішньому виступі біля поверхні становить $T=798^{\circ}\text{C}$, під плоскою частиною пуансона напівфабрикат охолов до $T=780^{\circ}\text{C}$. Біля виштовхувача температура напівфабрикату становить $T=774-782^{\circ}\text{C}$. Виступ зовні на дні, що вже сформувався охолов до $T=716^{\circ}\text{C}$. Температура в середині напівфабрикату коливається в межах $T=852-862^{\circ}\text{C}$. В частині сформованої стінки температура розподілилася наступним чином: при основі стінки $T=862^{\circ}\text{C}$, у внутрішній частині стінки $T=835^{\circ}\text{C}$, з зовнішньої сторони біля поверхні знизу стінки $T=775^{\circ}\text{C}$ до $T=797^{\circ}\text{C}$ у верху.

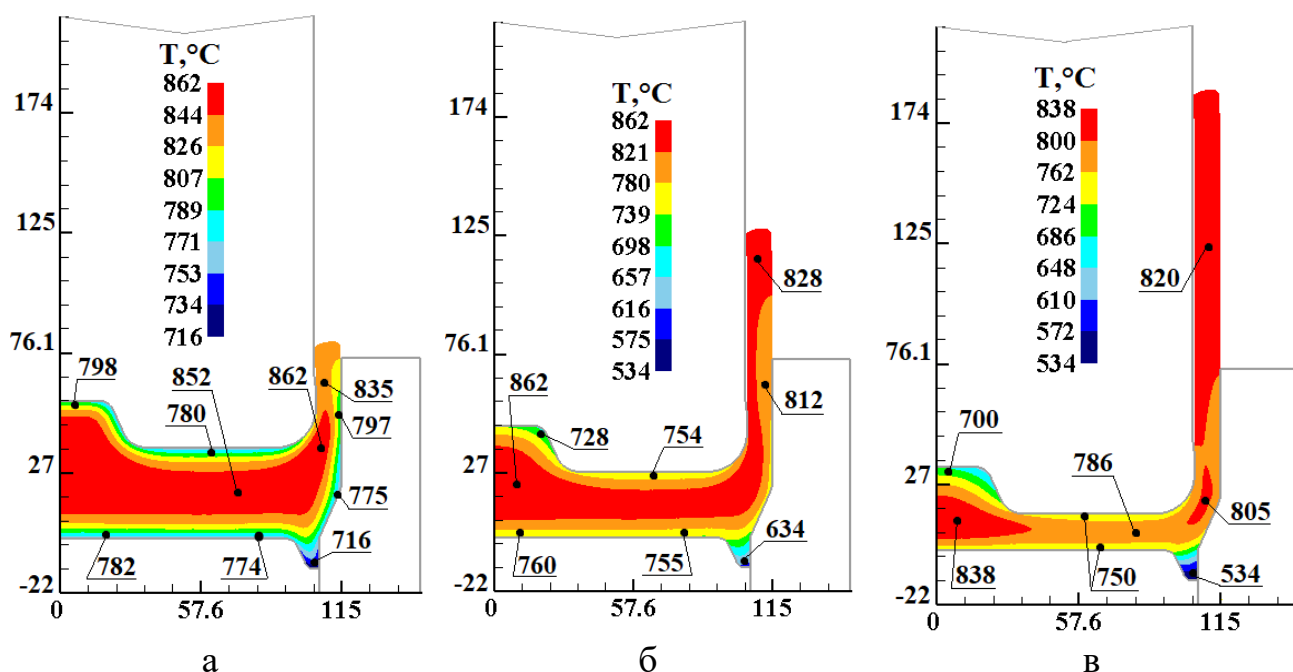


Рисунок 3.12 – Розподіл температур у напівфабрикаті при різному переміщенні пуансона: а - 20мм, б - 26 мм, в – 28,6 мм

При проходженні пуансоном 26 мм (рис.3.12б) гарячий метал з середини напівфабрикату переміщується в стінку. Виступ в середині напівфабрикату охолоджується до $T=728^{\circ}\text{C}$, плоска частина дна – до $T=754^{\circ}\text{C}$. Температура заготовки біля виштовхувача становить $T=755-760^{\circ}\text{C}$. В середині напівфабрикату температура становить $T=862^{\circ}\text{C}$. Виступ зовні внизу охолов до $T=634^{\circ}\text{C}$. Температура в стінці розділилася на 2 зони. Внутрішня частина стінки і торець нагріті до $T=828^{\circ}\text{C}$, зовнішня сторона – до $T=812^{\circ}\text{C}$.

В кінці видавлювання (рис.3.12в) температура в готовому напівфабрикаті розподілилася наступним чином: в центрі на дні напівфабрикату $T=838^{\circ}\text{C}$, виступ $T=700^{\circ}\text{C}$, плоска частина дна має температуру $T=750-786^{\circ}\text{C}$, зовнішній виступ на дні охолов до $T=534^{\circ}\text{C}$. Температура в місці з'єднання стінки з дном та частини стінки, яка контактує з матрицею, всередині прогріта до $T=805^{\circ}\text{C}$, біля поверхні вона охолола до $T=786^{\circ}\text{C}$. По всій стінці, яка не контактує з матрицею, матеріал напівфабрикату нагрітий до $T=820^{\circ}\text{C}$.

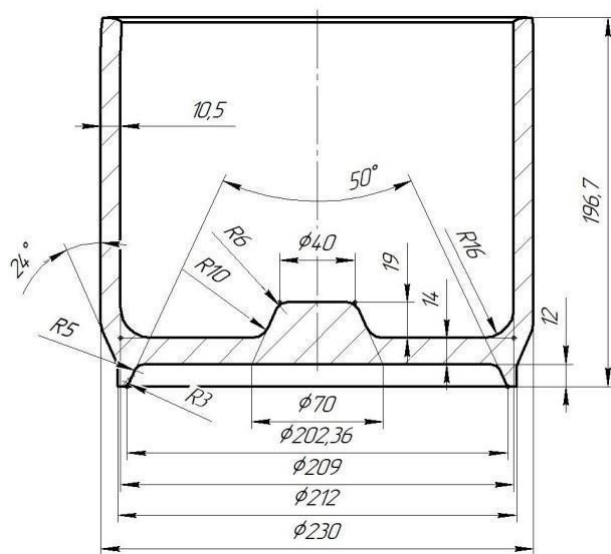


Рисунок 3.13 Форма і розміри напівфабрикату після гарячого зворотного видавлювання

Форма та розміри напівфабрикату, отриманого гарячим зворотним видавлюванням, показано на рис.3.13

3.3. Висновки

1. З використанням методу скінченних елементів створені математичні моделі та проведене комп'ютерне моделювання процесу отримання порожнистого напівфабрикату, який складається із операції гарячого осаджування циліндричної заготовки з отриманням виступу на нижньому торці та операції подальшого гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату.

2. Для операцій осаджування і видавлювання встановлені швидкості деформування, які забезпечили необхідний температурний інтервал гарячої деформації на протязі всіх процесів формоутворення.

3. Для вибору пресового обладнання і проектування штампового оснащення виявлені залежності зусиль деформування від переміщення деформуючого інструменту та розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях між zdeформованими заготовками та інструментом.

4. Моделюванням визначені напружено-деформований стан у zdeформованих заготовках, температурний розподіл після формоутворення та кінцеві форми і розміри напівфабрикатів, які отримані осаджуванням і видавлюванням.

РОЗДІЛ 4

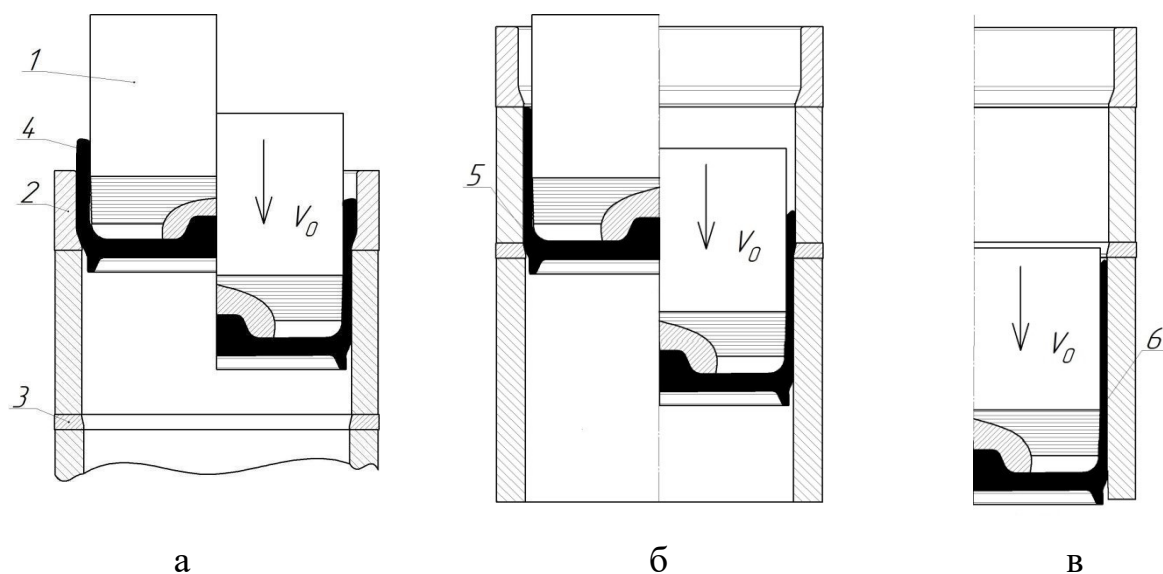
АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕРЕХОДІВ ВИТЯГУВАННЯ
З ПОТОНШЕННЯМ4.1. Аналіз першого переходу витягування з потоншенням напівфабрикату
після гарячого видавлювання4.1.1. Схеми витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані
матриці та розрахункові схеми

Рисунок 4.1 – Схема витягування з потоншенням через дві матриці

Схема процесу витягування з потоншенням зображена на рис. 4.1. Витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці призначено для отримання напівфабрикату з тонкою стінкою. Збільшення ступеня деформації при витягуванні досягається за рахунок використання двох послідовно розташованих матриць та пуансона з нижньою зовнішньою поверхнею спеціального профілю. Використання такого пуансона сприяє збільшенню ступеня деформації в матрицях за рахунок створення тягнучого зусилля за стінку zdeформованого напівфабрикату, яке зменшує розтягувальні осьові напруження у стінці в небезпечному перерізі біля донної частини та знижує зусилля, що прикладається до донної частини. На початку процесу витягування напівфабрикат 4 розміщений в направляючій частині першої матриці 2 (рис. 4.1a). При переміщенні до низу пуансон 1 деформує напівфабрикат 4 через першу матрицю 2

(рис. 4.1 б). Після закінчення витягування в матриці 2 здійснюється формоутворення в другій матриці 3 з отриманням напівфабрикату 6 (рис. 4.1в), який в подальшому знімається з пуансона знімачем при його зворотному переміщенні вгору.

Заготовкою є напівфабрикат, отриманий методом гарячого зворотного видавлювання (рис. 3.13).

Розрахунки процесу витягування з потоншенням виконувалися в програмі Deform 2D. Результати розрахунків наведені в додатку Г. Розрахункові схеми витягування показано на рис Г.1а. Напівфабрикат 6 знаходився в направляючій частині першої матриці 2, притиснутий пуансоном 1 з середини через дно. При русі пуансона 1 до низу напівфабрикат деформується в першій матриці 2, де стінка потоншується і ми отримуємо напівфабрикат 7, що пройшов першу матрицю 2 і знаходиться в направляючій втулці 3 (рис Г.1 б). Пуансон 1 продовжує рух до низу, деформуючи напівфабрикат 7 в другій матриці 4, в результаті висота напівфабрикату стає більшою і стінка продовжує потоншуватися. Після другої матриці 4 готовий напівфабрикат 8 потрапляє до другої направляючої втулки 5 (рис Г.1 в).

Для моделювання були застосовані наступні умови: математична модель напівфабрикату, отримана моделюванням гарячого зворотного видавлювання, коефіцієнт тертя між поверхням напівфабрикату та інструментом $\mu=0,08$ за Кулоном, швидкість переміщення деформуючого інструменту 7 мм/сек і температура процесу 20°C. Результати дослідження процесу публікувалися в статті [167].

4.1.2. Силкові режими та питомі зусилля

На графіку рис. 4.2 показано залежність зусилля при витягуванні з потоншенням через дві матриці від переміщення пуансона. На першій стадії деформування при переміщенні на 10 мм відбувається різке зростання зусилля до 1,26 МН, при якому відбувається початок деформування в конічній частині та на

робочому пояску матриці. В подальшому зусилля продовжує зростати до 1,52 МН і залишається сталим на проміжку 40-60 мм.

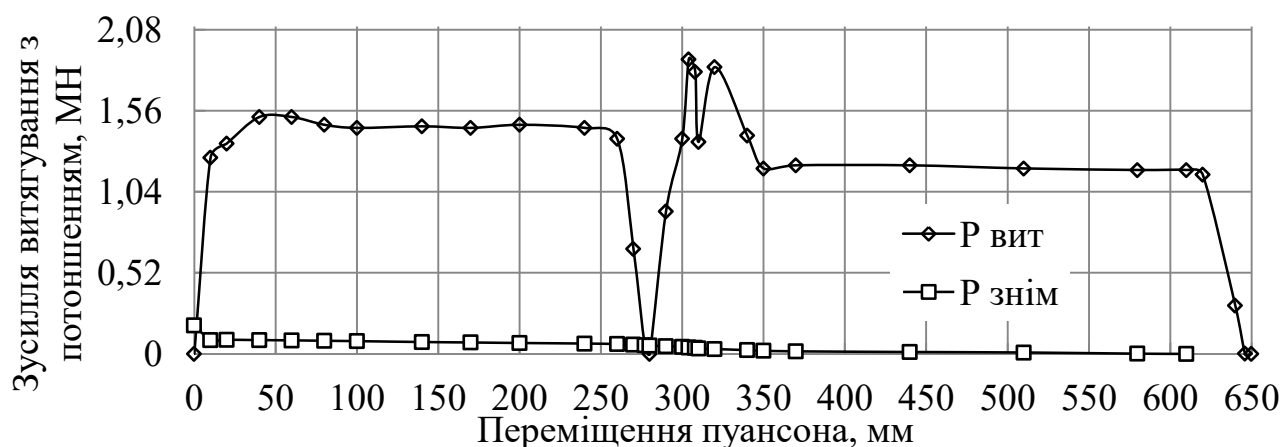


Рисунок 4.2 Залежність зусилля витягування з потоншенням від переміщення пуансона

При переміщенні на 80 мм зусилля трохи спадає і в подальшому змінюється в діапазоні 1,45-1,47 МН на проміжку 80-240 мм. При переміщенні на 260 мм наприкінці витягування в першій матриці зусилля починає спадати до значення 1,38 МН, а на проміжку 270-280 мм відбувається кінець деформування і вихід заготовки з першої матриці, зусилля зменшується з 1,38 МН до 0 МН. В цей час відбувається перехід з першої матриці до другої. На початку деформування в другій матриці 290-300 мм відбувається скачок зусилля з 0,92 МН до 1,89 МН, що потім спадає до 1,36 МН при переміщенні на 310 мм. На проміжку 310-320 мм відбуваються різкі скачки зусилля проходження місця з'єднання дна заготовки зі стінкою і починається деформування тонкої стінки. Після цього відбувається різкий спад зусилля до 1,19 МН на ході 350 мм і вирівнювання зусилля в діапазоні 1,18-1,21 МН на проміжку 370-610 мм, де відбувається потоншення рівномірної тонкої стінки. Після переміщення до 620 мм зусилля становить 1,15 МН і при подальшому деформуванні зменшується до 0,31 МН при переміщенні до 640 мм, далі напівфабрикат контактує тільки з робочим поясом матриці. При досягненні 650 мм напівфабрикат повністю виходить з матриці і зусилля спадає до 0-0,002 МН, процес витягування з потоншенням закінчений. Максимальне зусилля знімання $P_{\text{знім}}$ напівфабрикату з пуансона становить 0,18 МН.

Питомі зусилля на інструменті при витягуванні з потоншенням можна оцінити по розподілу нормальних напружень, який показано на рис. 4.3. Так як напівфабрикат довгий, він поділений дві частини.

На верхній частині напівфабрикату (рис. 4.3а) нормальні напруження виникають тільки на поверхні пуансона завдяки пружним деформаціям заготовки, і вони знаходяться в межах $\sigma_n = 14,4 \div 19$ МПа.

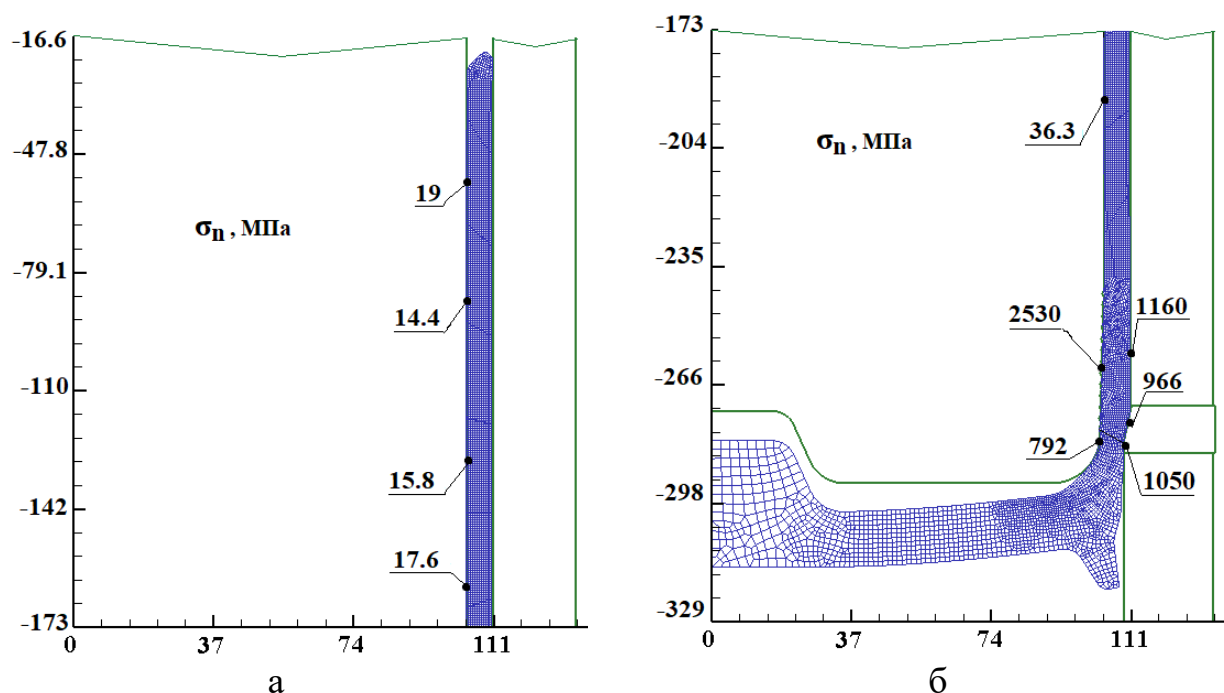


Рисунок 4.3 – Розподіл нормальних напружень на інструменті при витягуванні з потоншенням: а-верхня частина, б-нижня частина

На нижній частині напівфабрикату (рис. 4.3б) нормальні напруження значно більші. На пуансоні біля радіуса напруження мають значення $\sigma_n = 792$ МПа. На конічній частині нормальні напруження досягають значення $\sigma_n = 2530$ МПа, на вершинах гребнів конічної поверхні, утвореної перетином торів, наближаючись до верху вони зменшуються до $\sigma_n = 36,3$ МПа. На обоймі є невелика площа контакту через викривлення стінки заготовки перед входом в матрицю, тут нормальні напруження досягають значення $\sigma_n = 1160$ МПа. На матриці на конічній поверхні значення напруження становить $\sigma_n = 966$ МПа, а на робочому пояску $\sigma_n = 1050$ МПа.

По максимальним значенням нормальних напружень встановлено, що можна застосувати одnobандажні матриці.

4.1.3. Напружено-деформований стан напівфабрикату

Через велику довжину заготовки для зручності аналізу напівфабрикат поділений на дві частини. Оцінити величини напруження та деформації в верхній частині напівфабрикату можна на рис. Г.2. Деформуючий інструмент показаний тонкими сірими лініями. Отримані значення напружень приведені при найбільшому зусиллі. Деформований стан визначався в кінці процесу витягування з потоншенням.

В радіальному напрямі у верхній частині (рис. Г.2а) спостерігаються напруження біля торця заготовки $\sigma_r=92,8$ МПа. Спускаючись донизу значення напруження в стінці становить $\sigma_r=8,59$ МПа. Також є невелика ділянка, в якій напруження становлять $\sigma_r=21$ МПа.

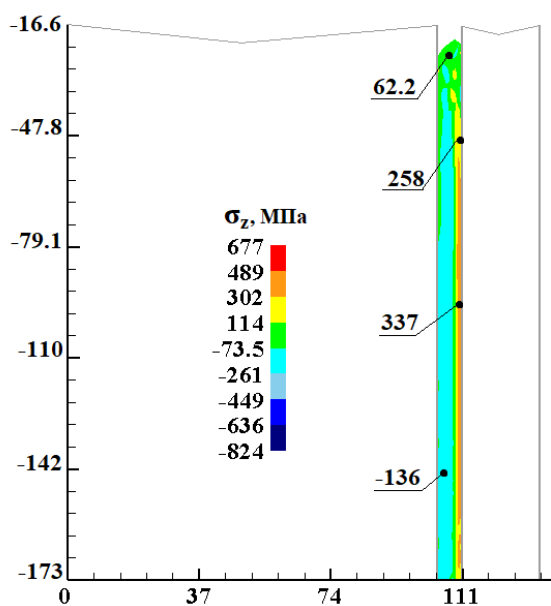


Рисунок 4.4 – Розподіл напружень σ_z верхній частині напівфабрикату

Розподіл осевих напружень (рис.4.4) виглядає наступним чином. На торці значення напруження $\sigma_z=62.2$ МПа. З зовнішньої сторони стінки є шар, в якому напруження становлять $\sigma_z=258$ МПа, і до низу напруження збільшуються до $\sigma_z=337$ МПа. По більшій частині об'єму стінки з внутрішньої сторони напруження мають значення $\sigma_z=-136$ МПа.

В тангенціальному напрямку напруження (рис. Г.2б) розподілилися наступним чином: біля торця є ділянка заготовки, на якій напруження стискаючі - $\sigma_\theta=-89,1$ МПа. Трохи нижче напруження стають додатними $\sigma_\theta=150$ МПа, вони також розповсюджені по стінці до низу з внутрішньої сторони. Зовнішня частина стінки характеризується більшими розтягувальними напруженнями - $\sigma_\theta=324$ МПа.

З розподілу інтенсивності напруження (рис.Г.2в) спостерігається інтенсивність напружень $\sigma_i=31,3\div 134$ МПа, а нижче по об'єму стінки інтенсивність збільшується до $\sigma_i=382$ МПа.

Напруження в нижній частині заготовки в радіальному напрямку показані на рис.Г.3а. В центрі у виступі на дні заготовки напруження додатні $\sigma_r=26,7$ МПа. В плоскій частині дна зверху напруження стискаючі $\sigma_r=-157$ МПа. В нижній частині дна від центру і до краю спостерігаються розтягуючі напруження $\sigma_r=147$ МПа. В кільцевому виступі зовні на дні заготовки напруження мають значення $\sigma_r=-4,9$ МПа.

Тангенціальні напруження в нижній частині (рис.Г.3б) заготовки здебільшого стискаючі.

В стінці зверху в частині з внутрішньої сторони є напруження $\sigma_\theta=-138$ МПа, з зовнішньої сторони - $\sigma_\theta=317$ МПа. В стінці над матрицею напруження розтягувальні - $\sigma_\theta=646$ МПа. В зоні, яка контактує з матрицею, найбільші напруження становлять $\sigma_\theta=-1020$ МПа. На дні спостерігаються напруження у центральному виступі $\sigma_\theta=-26,9$ МПа, на плоскій частині - $\sigma_\theta=-129$ МПа. Біля радіусу пуансона - $\sigma_\theta=-258$ МПа. Зовні на дні заготовки напруження розтягувальні $\sigma_\theta=40,9\div 114$ МПа.

Розглянувши розподіл інтенсивності напружень (рис.Г.3в) встановлено, що в донній частині спостерігається менша інтенсивність напружень в межах $\sigma_i=6,58\div 201$ МПа (те саме показали розподіли за напрямками), в осередку деформації напруження досягають свого найбільшого значення $\sigma_i=542\div 660$ МПа. В нижній частині стінки інтенсивність напружень зменшуються до $\sigma_i=368$ МПа.

За осьовим розподілом напружень (рис.4.5) встановлено, що в дні напруження менші порівняно зі стінкою $\sigma_z=27\div -121$ МПа. Біля осередку деформації напруження найбільші, але спостерігається значна різниця між стискаючими та розтягувальними напруженнями, зсередини стискаючі становлять $\sigma_z=-824$ МПа, ззовні біля матриці розтягувальні - $\sigma_z=677$ МПа. Вище по стінці

напруження зменшуються і в більшій частині по об'єму становлять $\sigma_z = -158$ МПа, з тонким прошарком, в якому значення додатні - $\sigma_z = 193$ МПа.

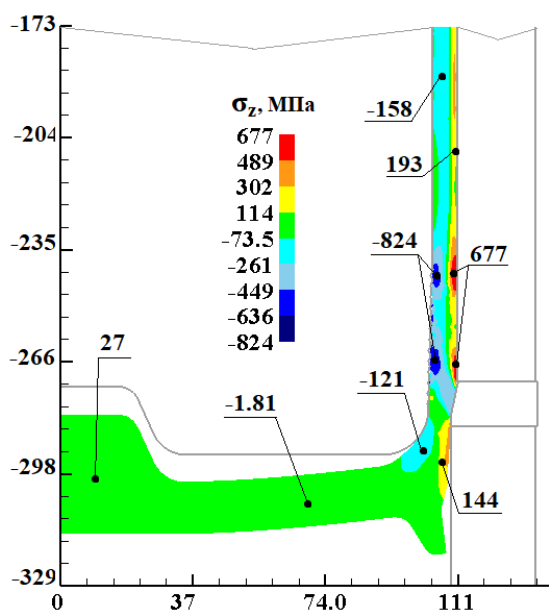


Рисунок 4.5 – Розподіл напружень σ_z нижньої частини

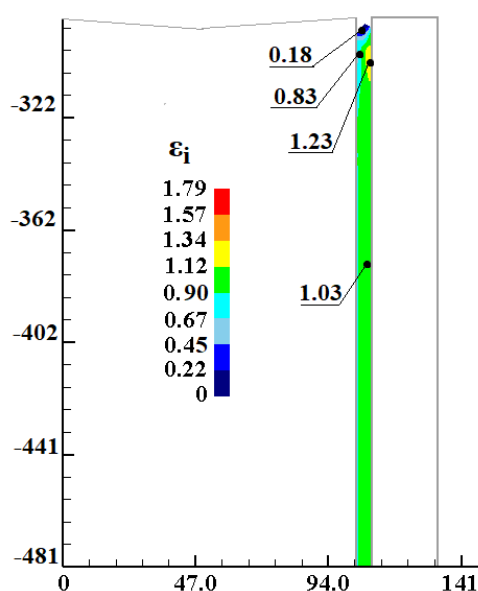


Рисунок. 4.6 – Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i верхньої частини

Деформації радіальні (рис. Г.4а) у верхній частині стінки біля торця становлять $\epsilon_\rho = 0.1$. Спускаючись донизу вони зменшуються до $\epsilon_\rho = -0.87$. Нижче значення деформацій коливається в межах $\epsilon_\rho = -0.74 \div -0.75$.

Тангенціальні деформації (рис. Г.4б) мають вигляд шарів які розташовані від внутрішньої сторони стінки до зовнішньої. Внутрішній шар має деформації $\epsilon_\theta = -0.01$, наближаючись до зовнішньої поверхні стінки вони збільшуються до $\epsilon_\theta = -0.05$. На торці стінки значення деформації складають $\epsilon_\theta = -0.06$.

В осьовому напрямку деформації додатні (рис. Г.4в) . На торці є кромка зі стискаючими деформаціями $\epsilon_z = -0.06$. На зовнішніх стінках біля торця додатні деформації становлять $\epsilon_z = 0.94$. Нижче по стінці вони зменшуються до $\epsilon_z = 0.79$.

За розподілом інтенсивності (рис.4.6) деформацій найбільші спостерігаються біля торця - $\epsilon_i = 0.83 \div 1.23$. На самій кромці деформації менші - $\epsilon_i = 0.18$. Вниз по стінці інтенсивність деформацій розподілена рівномірно зі значенням $\epsilon_i = 1.03$.

Деформації в нижній частині напівфабрикату показані рис.Г.5.

В донній частині в радіальному напрямі деформації (рис.Г.5а) практично відсутні $\varepsilon_r=0,001$, але є невелика зона біля основи виступу зсередини з деформаціями $\varepsilon_r=-0,026$. У місці з'єднання дна і стінки деформації від'ємні $\varepsilon_r=-0,11$. Вверх по стінці деформації збільшуються і становлять $\varepsilon_r=-0,74 \div -0,77$.

Тангенціальні деформації в нижній частині заготовки (рис.Г.5б) розподілені по шарам з внутрішньої сторони - $\varepsilon_\theta=-0,029$, в напрямку до зовнішньої сторони вони збільшуються до $\varepsilon_\theta=-0,06$. По об'єму дна в центрі і в середньому шарі незначні стискаючі деформації $\varepsilon_\theta=-0,005$. З внутрішньої сторони дна стискаючі деформації $\varepsilon_\theta=-0,01$, а з зовнішньої сторони - розтягувальні $\varepsilon_\theta=0,01$. В місці з'єднання стінки і дна наявна зона деформації зі значення $\varepsilon_\theta=-0,02$.

Розподіл осьових деформацій (рис.Г.5в) характеризується розтягувальними деформаціями. По об'єму дна деформації малі - $\varepsilon_z=0,012$, при переході в стінку збільшуються до $\varepsilon_z=0,26$. При основі стінки деформації становлять $\varepsilon_z=0,64$. Далі вгору по об'єму стінки деформації збільшуються до $\varepsilon_z=0,78$ з невеликою зоною $\varepsilon_z=0,84$.

За інтенсивністю деформацій (рис.4.7) спостерігається, що найкраще

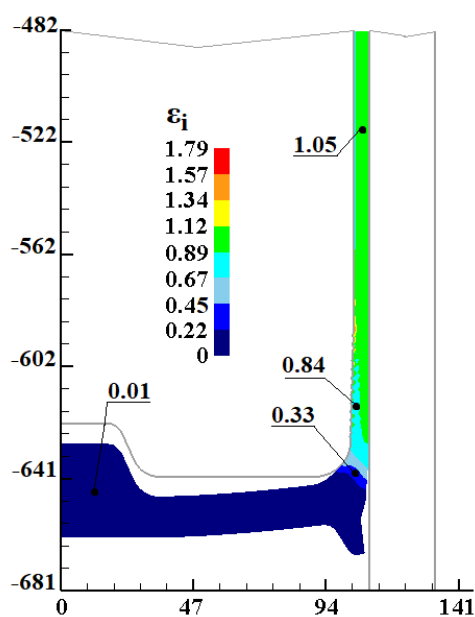


Рисунок. 4.7 – Розподіл інтенсивності деформацій ε_i нижньої частини

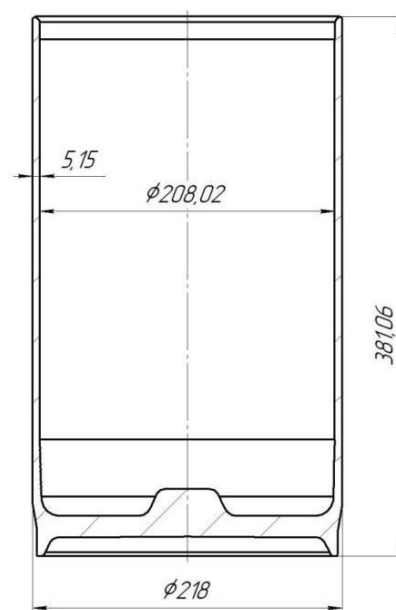


Рисунок 4.8 Форма та розміри напівфабрикату після витягування з потоншенням

пропрацьовується деформацією стінки напівфабрикату стінка зі значенням $\varepsilon_i=1,05$. Менша інтенсивність деформацій була при основі стінки $\varepsilon_i=0,33\div0,84$. Найгірше пропрацьовується деформацією дно заготовки $\varepsilon_i=0,01$.

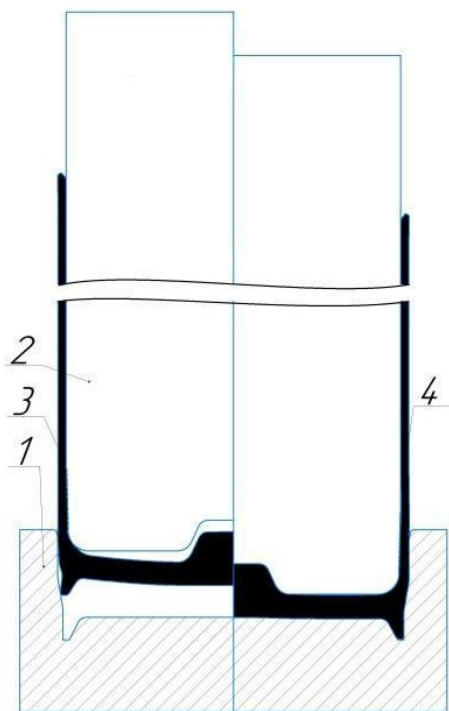
Форма та розміри кінцевого напівфабрикату після першого переходу витягування з потоншенням (рис.4.8).

4.2. Вирівнювання донної частини

Схема процесу та розрахункові схеми вирівнювання донної частини

При витягуванні з потоншенням відбувається викривлення дна внаслідок значного розтягувального осьового і радіального зусилля, яке виникає при протягуванні через другу матрицю здеформованого напівфабрикату.

Для використання напівфабрикату на наступних переходах витягування з потоншенням потрібно вирівняти дно та прокалібрувати діаметр для позиціонування напівфабрикату в направляючій частині матриці (рис.4.9).



На наступних переходах калібрування дна не потрібне, напівфабрикат деформується тільки в одній матриці.

Калібрування відбувається за допомогою пуансона 1 та оправки 2. При опусканні пуансона 1 донизу напівфабрикат 3 затискається між оправкою та пуансоном, при цьому вирівнюється дно, циліндрична частина запобігає роздуванню стінки біля дна.

При розрахунку приймалися наступні початкові дані: напівфабрикат після витягування з потоншенням, коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях за Зібелем $\mu=0,1$, швидкість руху пуансона 7 мм/сек, початкова температура заготовки $T=650^{\circ}\text{C}$.

Силові режими та питомі зусилля на інструменті

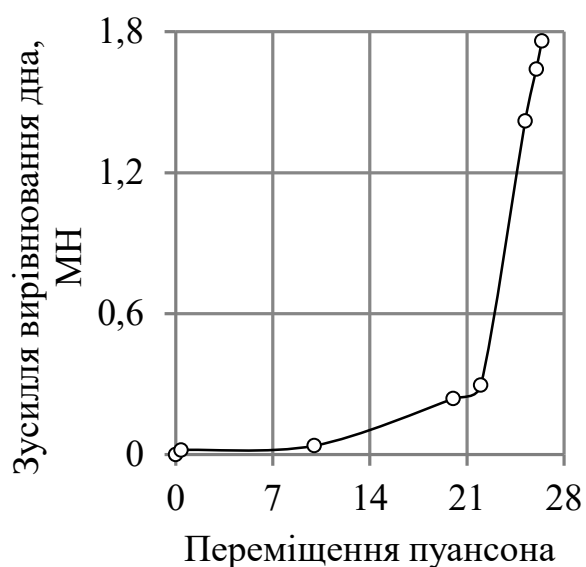


Рисунок 4.10 Залежність зусилля напівгарячого вирівнювання дна від переміщення пуансона

Зусилля при вирівнюванні дна показано на графіку (рис.4.10). На проміжку від 0 до 22 мм зусилля зростає плавно в межах 0-0,296 МН, при цьому відбувається заходження напівфабрикату в матрицю і починається вирівнювання дна. При 25,2 мм зусилля стрімко починає зростати до 1,42 МН. В цей час дно практично вирівнялося і починається калібрування дня. Процес зупиняється при переміщенні на 26,4 мм, зусилля процесу максимальне 1,76 МН.

Оцінку питомих зусиль проведено за рис.4.11, де показані величини нормальних напружень, які виникають на контактуючих поверхнях

Найбільші значення напружень спостерігаються в кінці вирівнювання. На радіусі оправки становлять $\sigma_n=455$ МПа, по центру оправки напруження менші - $\sigma_n=112$ МПа. На пуансоні напівфабрикат контактує тільки біля зовнішнього краю - $\sigma_n=18\div 174$ МПа та на конічній поверхні - $\sigma_n=183$ МПа.

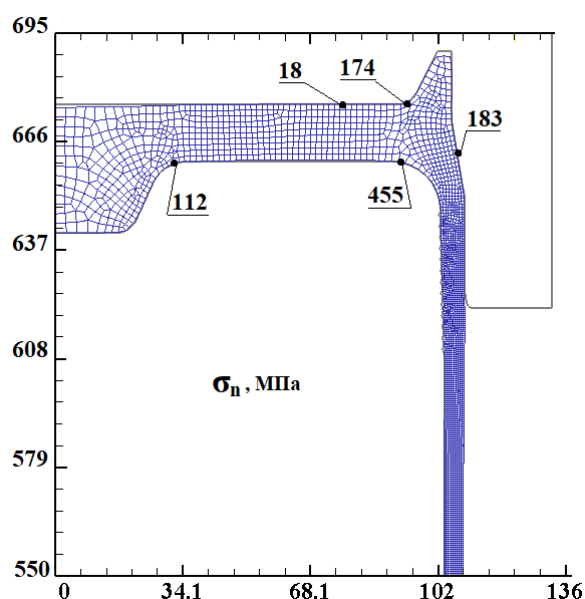


Рисунок 4.11 Розподіл нормальних напружень на інструменті при вирівнюванні дна

Напружено-деформований стан напівфабрикату

Характеристики напруженого стану в напівфабрикаті при вирівнюванні дна в кінці процесу показано на рис.Г.6.

Розподіл напружень в радіальному напрямку показаний на рис.Г.6а. Спостерігаються переважно стискаючі напруження в донній частині $\sigma_r = -44,9 \div -214$ МПа. Біля центру дна ззовні напівфабрикату є невелика ділянка з напруженнями розтягу $\sigma_r = 92$ МПа. Найбільші ж значення напружень виникають в місці з'єднання стінки та дна - до $\sigma_r = -214$ МПа. Стінка напівфабрикату біля основи сприймає стискаючі напруження $\sigma_r = -49,9$ МПа, які при виході з контакту з матрицею змінюються на $\sigma_r = 0,37$ МПа.

Значення напружень в тангенціальному напрямі показано на рис.Г.6б. Найбільші напруження виникають на радіусах в місцях з'єднань елементів - $\sigma_\theta = -166 \div -178$ МПа. В центральному виступі напруження стискаючі - $\sigma_\theta = -27,6$ МПа. Розтягувальні напруження виникають в виступі під фланцем - $\sigma_\theta = 91,6$ МПа та в стінці напівфабрикату - $\sigma_\theta = 10,9 \div 42,8$ МПа.

Розподіл осьових напружень (рис. Г.6в) відрізняється від загального характеру розподілу напружень. В донній частині напруження переважно розтягувальні $\sigma_z = 13 \div 32,8$ МПа. В невеликій ділянці на радіусі напруження змінюються на стискаючі $\sigma_z = -229$ МПа. В стінці напруження змінюються в межах $\sigma_z = -39,1 \div 55$ МПа.

За інтенсивністю напружень (рис. Г.6г) бачимо, що найбільша зміна напружень спостерігається в донній частині, яка деформується. В виступі на дні напруження незначні і становлять $\sigma_i = 15,1$ МПа. В плоскій частині дна інтенсивність напружень змінюється в межах $\sigma_i = 71,3 \div 81,5$ МПа. Найбільша інтенсивність напружень спостерігається на радіусах переходів до $\sigma_i = 124$ МПа. Стінка переважно не приймає участі в процесі вирівнювання дна, проте в ній також виникають напруження, які за значеннями інтенсивності змінюються в межах $\sigma_i = 42,2 \div 48,1$ МПа. .

Оцінити пропрацювання структури матеріалу пластичною деформацією при напівгарячому вирівнюванні дна можна за рис. Г.7.

На радіальному розподілі деформацій (рис. Г.7а) бачимо, що в донній частині заготовки практично відсутнє накопичення деформацій - $\varepsilon_r = -0,01 \div 0,12$. На радіусі переходу дна в стінку деформації становлять $\varepsilon_r = -0,14$. Деформації в стінці мають значення $\varepsilon_r = -0,63 \div 0,76$ і були накопичені на попередньому переході витягування з потоншенням.

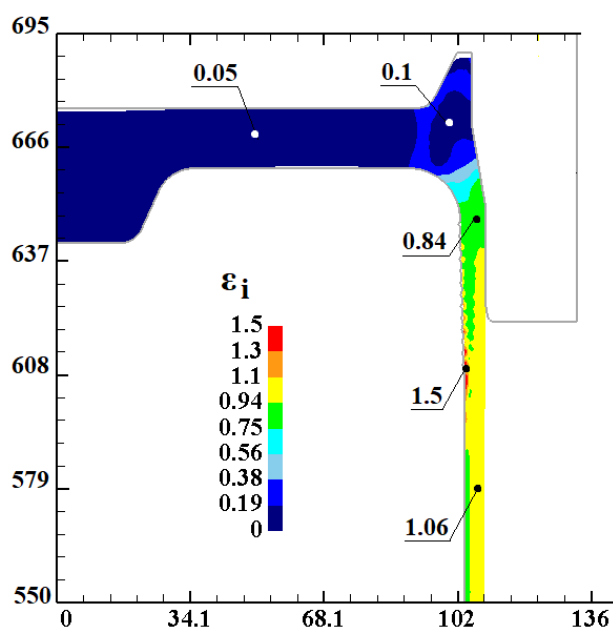


Рисунок 4.12 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i

За інтенсивністю деформацій (рис. 4.12) можна сказати, що при напівгарячому процесі вирівнювання дна накопичення деформацій в цій зоні практично відсутнє - $\varepsilon_i = 0,05 \div 0,1$. В стінці інтенсивність деформацій залишилась на тому ж рівні, що свідчить про те, що стінка напівфабрикату не деформується в процесі вирівнювання дна.

Температурний розподіл в заготовці на різних етапах напівгарячого вирівнювання дна показано на рис 4.13.

Напівфабрикат, для полегшення вирівнювання дна та зменшення зусилля деформування, розігрівається до температури $T = 650^\circ\text{C}$. При проходженні деформуючим інструментом 23,2 мм (рис.6.12а) більшої частини шляху

Тангенціальний напрямок розподілу (рис. Г.7б) характеризується ще меншими деформаціями в дні - $\varepsilon_\theta = -0,001 \div -0,01$. В стінці деформації залишилися на рівні попередніх значень - $\varepsilon_\theta = -0,001 \div -0,05$.

Деформації в осьовому напрямі (рис. Г.7в) більші, ніж в двох інших. В центрі деформації практично відсутні - $\varepsilon_z = 0,004$. Проте в плоскій частині дна та на радіусі вони збільшуються до $\varepsilon_z = -0,1 \div 0,05$.

деформування, напівфабрикат залишається достатньо нагрітим до $T=650\text{ }^{\circ}\text{C}$ в донній частині для подальшого деформування, стінка охолоджується до $T=521^{\circ}\text{C}$.

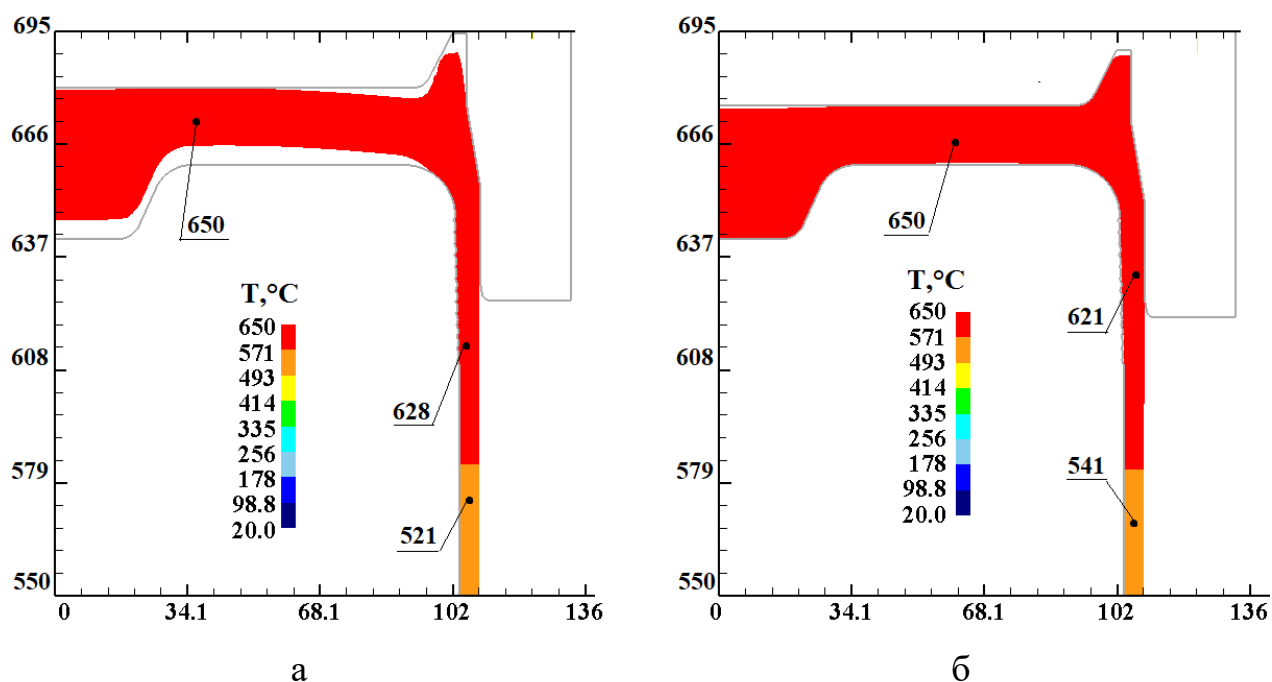


Рисунок 4.13 Розподіл температур у напівфабрикаті при різному переміщенні пуансона: а – 23,2мм, б – в кінці 26,4 мм

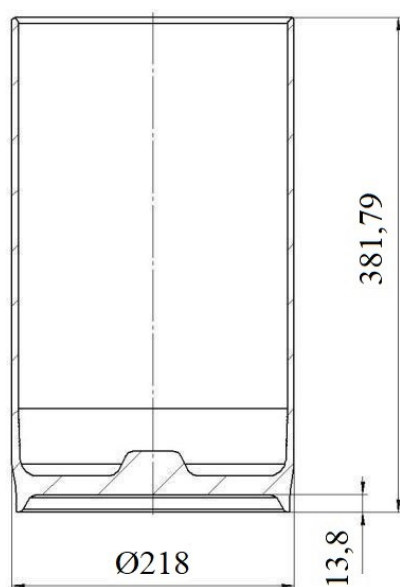


Рисунок 4.14
Форма та розміри
напівфабрикату після
вирівнювання дна

В кінці вирівнювання дна (рис. рис.6.12б) напівфабрикат залишається все ще нагрітим до температури $T=650^{\circ}\text{C}$, що цілком дозволяє зменшити зусилля при вирівнюванні дна на протязі всього процесу вирівнювання. Форма та розміри отриманого напівфабрикату після вирівнювання дна показані на рис.4.14. Розміри проставлені в міліметрах.

4.3. Аналіз другого переходу витягування з потоншенням через одну матрицю

4.3.1. Схема та розрахункові схеми витягування пуансоном спеціального профілю

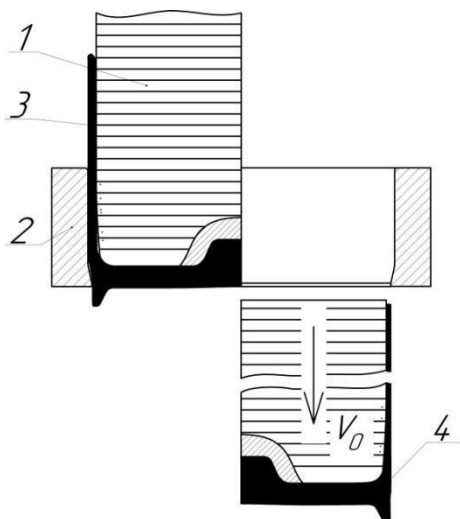


Рисунок 4.15 Схема другого та третього переходу витягування з потоншенням

На рис.4.15 показана схема процесу витягування крізь одну матрицю. Особливістю даного процесу витягування є використання пуансона з поверхнею, яка утворена перетином торів, розташованих з певним кроком. Хвиляста поверхня пуансона 1 дозволяє отримати вищу стінку заготовки внаслідок розвантаження небезпечного перерізу в стінці і втримуючи її за рахунок тертя по всій довжині, коли матеріал частково заходить в заглибини, збільшуючи площу контакту пуансона і стінки. Процес витягування з потоншенням полягає в тому, що пуансон 1 проштовхує заготовку 3 крізь матрицю 2, стінка заготовки потонщується і, як наслідок, збільшується її висота.

На початку процесу напівфабрикат 3 знаходиться в направляючій частині матриці 2 разом з пуансоном 1. Рухаючись донизу, пуансон 1 витягує напівфабрикат 3 в матриці 2, в результаті чого в кінці переходу формується напівфабрикат 4.

Моделювання виконувалося в програмному комплексі DEFORM 2D з застосуванням методу скінченних елементів.

Початкове положення інструменту показано на рис.Г.8 а. Напівфабрикат 4 укладений в матрицю 2. Пуансон 1 знаходить всередині заготовки 4, впираючись в її дно. Рухаючись вниз пуансон 1 проштовхує напівфабрикат 4 крізь матрицю 2, де проходить подальше витягування заготовки. Після проходження робочої

частини матриці 2 напівфабрикат 4 з потоншеною стінкою потрапляє до направляючої втулки 3, яка допомагає направляти напівфабрикат під час процесу витягування і слугує додатковою підтримкою матриці 2. В кінці витягування (рис.Г.8 б) отримуємо напівфабрикат 5.

Початкові умови для розрахунку процесу витягування були: математична модель напівфабрикату, отримана при розрахунку першого переходу витягування з потоншенням, який пройшов відпал, коефіцієнт тертя між поверхнями напівфабрикату та інструменту взято за Кулоном $\mu=0,08$, швидкість руху пуансона 7 мм/сек.

4.3.2. Силкові режими та питомі зусилля

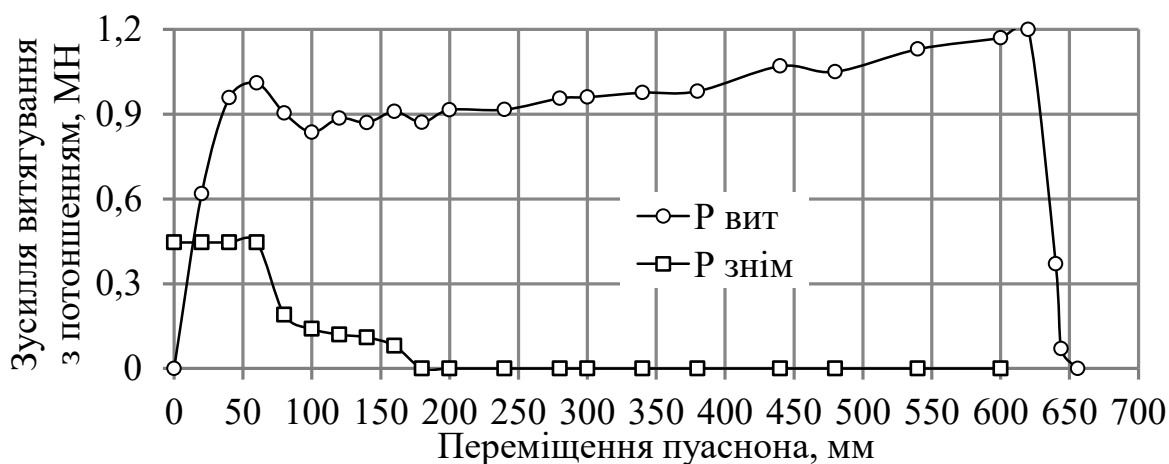


Рисунок 4.16 Залежність зусилля витягування з потоншенням від переміщення пуансона

Графік на рис.4.16 показує зміну величини зусилля від переміщення на різних стадіях деформування напівфабрикату. Спочатку, пройшовши 20 мм, відбувається різке зростання зусилля до 0,618 МН, в цей момент в матриці починає деформуватися донна частина напівфабрикату. Зростання зусилля спостерігається на проміжку 20-60 мм до величин 0,618-1,01 МН. На цьому проміжку деформується дно та нижня частина стінки. Після проходження цієї ділянки зусилля зменшується і знаходиться в діапазоні 0,87-0,981 МН на проміжку 80-380мм. Починаючи з 380 мм зусилля починає зростати через більше потоншення стінки змінної товщини. Ця залежність спостерігається майже до

кінця процесу витягування і на ділянці ходу 380 мм до 620 мм зусилля зростає від 0,981 до 1,2 МН - максимального значення зусилля в процесі витягування. Наприкінці процесу при переміщенні 640-644 мм зусилля спадає з 0,37 МН до 0,07 МН. Після виходу напівфабрикату з матриці подальше зусилля прошовування напівфабрикату по направляючій втулці становить 0,05 МН. Максимальне зусилля знімання напівфабрикату з пуансона становить 0,45 МН.

Питомі зусилля на поверхні, яка контактує з напівфабрикатом при витягуванні з потоншенням, можна визначити за величинами нормальних напружень.

Для зручності аналізу виникаючих нормальних напружень, напівфабрикат поділений на 3 частини, дані для кожної частини показані на рис. 4.17.

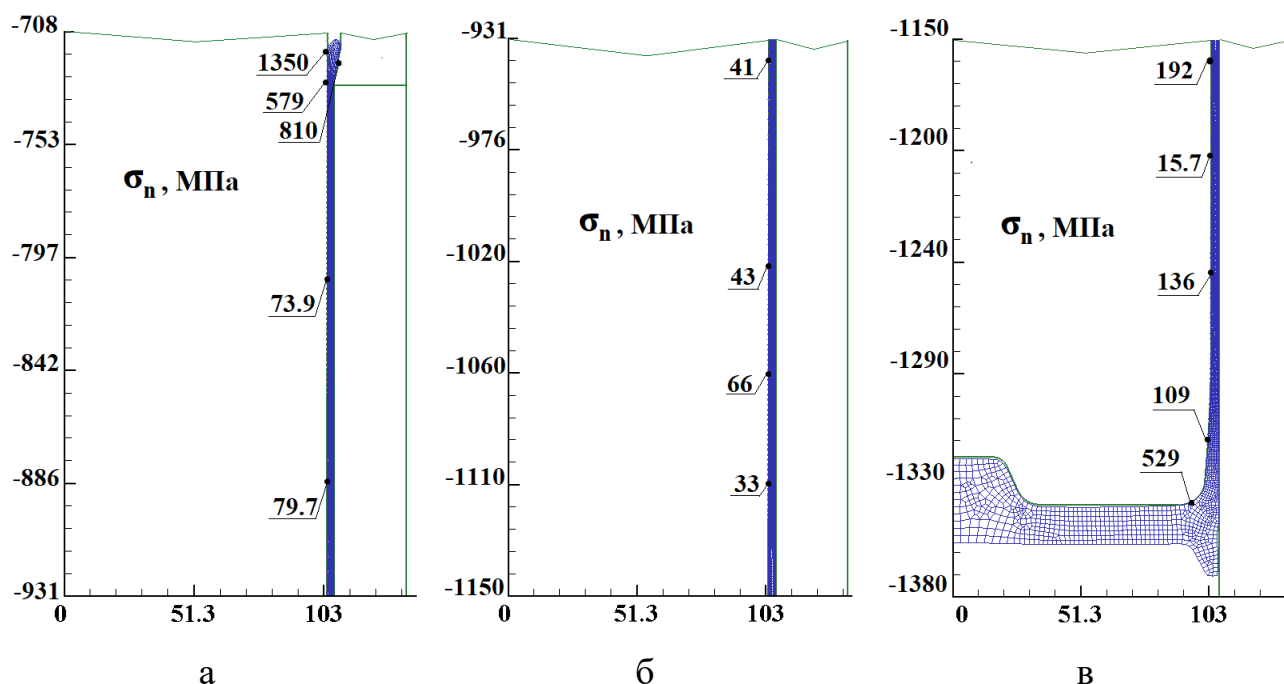


Рисунок 4.17 Розподіл нормальних напружень на інструменті при витягуванні з потоншенням: а – зверху, б- посередині, в-знизу

Нормальні напруження на поверхні зверху пуансона (рис. 4.17 а) найбільш високі, тому що тут знаходиться осередок деформації. Біля конічної частини поверхні матриці напруження становлять $\sigma_n=810$ МПа. На поверхні пуансона напруження дорівнюють $\sigma_n=579\div1350$ МПа. Нижче матриці напруження спадають і діють тільки на поверхні пуансона в межах $\sigma_n=73,9\div79,7$ МПа.

На середній частині (рис.4.17 б) між напівфабрикатом і пуансоном нормальні напруження продовжують зменшуватися і виникають лише завдяки пружній деформації заготовки - $\sigma_n = 33 \div 66$ МПа.

На нижній частині (рис.4.17 в) найбільші нормальні напруження на поверхні пуансона спостерігаються на радіусі - $\sigma_n = 529$ МПа, на конічній частині напруження менші - $\sigma_n = 109$ МПа. Циліндрична поверхня пуансона сприймає нормальні напруження з величиною $\sigma_n = 15,7 \div 192$ МПа.

4.3.3. Напружено-деформований стан напівфабрикату

На другому переході висота напівфабрикату значно зростає, тому для зручності проведення аналізу напруження та деформацій напівфабрикат поділений на три частини. Інструмент показаний тонкими сірими лініями. Розміри по осям показані в міліметрах. Значення величин напружень, які не позначено виносками, можна оцінити за графіком.

Напружений стан в верхній частині напівфабрикату показаний на рис. Г.9

Напружений стан в радіальному напрямку (рис. Г.9а) характеризується здебільшого стискаючими напруженнями. В осередку деформації найбільші стискаючі напруження $\sigma_r = -630$ МПа. На торці стінки є невелика ділянка з розтягуючими напруженнями $\sigma_r = 36$ МПа. Далі по стінці напруження стискаючі в межах $\sigma_r = -13 \div -30$ МПа з невеликими ділянками в середині стінки, де напруження розтягувальні - $\sigma_r = 41$ МПа.

Розподіл тангенціальних напружень (рис. Г.9б) змінюється по об'єму стінки. На торці та в осередку деформації напруження становлять $\sigma_\theta = -110$ МПа та $\sigma_\theta = -300$ МПа. Після виходу заготовки з матриці напруження змінюються на розтягувальні $\sigma_\theta = 110$ МПа і опускаючись нижче, збільшуються біля зовнішньої поверхні до $\sigma_\theta = 390$ МПа і в середині стінки до $\sigma_\theta = 270$ МПа.

За інтенсивністю напруження (рис. Г. 9в) бачимо, що найбільші значення спостерігаються в осередку деформації $\sigma_1 = 683$ МПа. На торці інтенсивність в цій частині напівфабрикату найменша - $\sigma_1 = 130$ МПа. Після матриці в стінці є ділянка,

в якій інтенсивність напружень складає $\sigma_i=570$ МПа і, опускаючись до низу, зменшується до значень $\sigma_i=380\div410$ МПа.

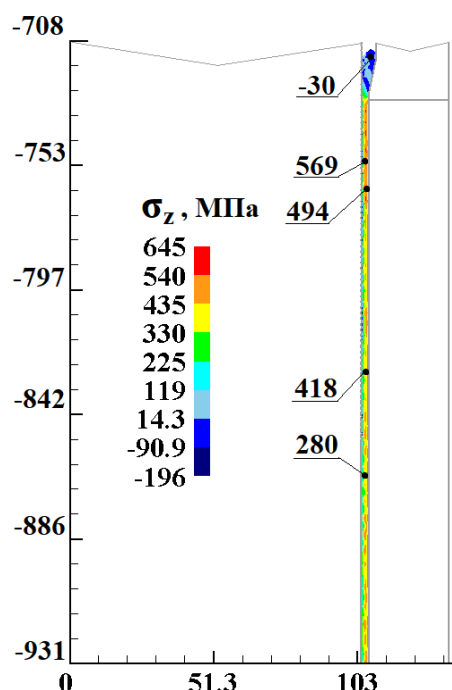


Рисунок 4.18 Розподіл осевих напружень σ_z у верхній частині

Розподіл осевих напружень показаний на рис. 4.18. Напруження здебільшого спостерігаються додатні. В частині стінки, яка знаходиться перед матрицею, осеві напруження стискаючі - $\sigma_z=-30$ МПа. Нижче матриці зона додатних напружень становить $\sigma_z=494\div569$ МПа. Опускаючись до дна напруження зменшуються до $\sigma_z=280\div418$ МПа.

Напружено-деформований стан в середній частині напівфабрикату показаний на рис Г.10.

Розподіл напружень в радіальному напрямку (рис. Г.10а) в середній частині стінки здебільшого складається з стискаючих з невеликими ділянками розтягувальних напружень всередині стінки. Стискаючі напруження по об'єму стінки змінюються в межах $\sigma_r=-1,7\div-41$ МПа. В невеликих точкових ділянках зустрічаються розтягувальні напруження, які досягають значень $\sigma_r=7,6\div37,7$ МПа.

Тангенціальні напруження (рис. Г.10б) в цій частині стінки додатні, спостерігаються дві ділянки, в яких напруження змінюються в межах $\sigma_\theta=77\div-180$ МПа всередині стінки для першої ділянки та друга ділянка, яка розташована біля зовнішньої стінки з напруженнями в межах $\sigma_\theta=180\div290$ МПа. Ближче до дна біля зовнішньої стінки з'являється ділянка максимальних напружень $\sigma_\theta=390$ МПа.

Загалом, в середній частині стінки інтенсивність напружень (рис. Г.10в) вище $\sigma_i=370\div420$ МПа і опускаючись до низу вона змінюється в межах $\sigma_i=300\div440$ МПа.

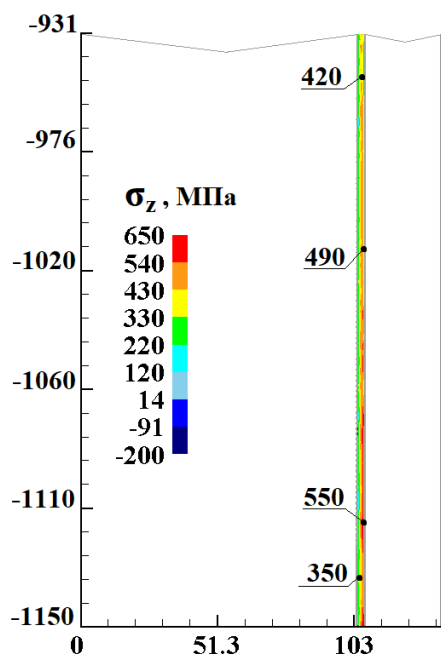


Рисунок 4.19 Розподіл осьових напружень σ_z у середній частині

напруження здебільшого розтягувальні $\sigma_p = 17,3 \div 31,6$ МПа, змінюючись на невеликі стискаючі - $\sigma_p = -7,63$ МПа. На радіусі біля дна є ділянка стискаючих напружень $\sigma_p = -243$ МПа. В самому дні напруження мають розподіл по шарах, на плоскій частині дна $\sigma_p = 59,5$ МПа, в середині дна напруження стискаючі $\sigma_p = -37,8$ МПа і в зовнішньому шарі дна напруження знову розтягувальні - $\sigma_p = 80$ МПа. В центральному виступі напруження практично відсутні - $\sigma_p = 0,33$ МПа.

Тангенціальні напруження (рис.Г.11б) також додатні. В стінці напівфабрикату напруження становлять $\sigma_\theta = 76,8 \div 208$ МПа зверху та збільшуються до $\sigma_\theta = 331$ МПа внизу. На переході з'єднання стінки та дна напруження становлять $\sigma_\theta = -169$ МПа. В донній частині є дві ділянки напружень: біля пуансона - $\sigma_\theta = 16,9$ МПа та в зовнішньому шарі - $\sigma_\theta = 99,3$ МПа.

Розподіл осьових напружень показаний на рис.4.20. В стінці спостерігається збільшення напружень від внутрішньої частини стінки $\sigma_z = 291$ МПа до зовнішньої - $\sigma_z = 618$ МПа. На товщій частині стінки знизу напруження змінюються всередині та на радіусі вони сягають значення $\sigma_z = -196$ МПа, біля зовнішньої стінки

Осьові напруження в середній частині стінки напівфабрикату розподілилися наступним чином (рис. 4.19): з внутрішньої частини стінки вони менші і становлять $\sigma_z = 420$ МПа, біля зовнішньої частини стінки є дві ділянки, де напруження становлять $\sigma_z = 490$ МПа та $\sigma_z = 550$ МПа.

Напружено-деформований стан в нижній частині напівфабрикату показаний на рис. Г.11.

Радіальні напруження (рис. Г.11а) в нижній частині стінки напівфабрикату розподілилися наступним чином: в стінці

змінюються на додатні $\sigma_z=172$ МПа. В самій донній частині напруження практично відсутні - $\sigma_z=0,1$ МПа.

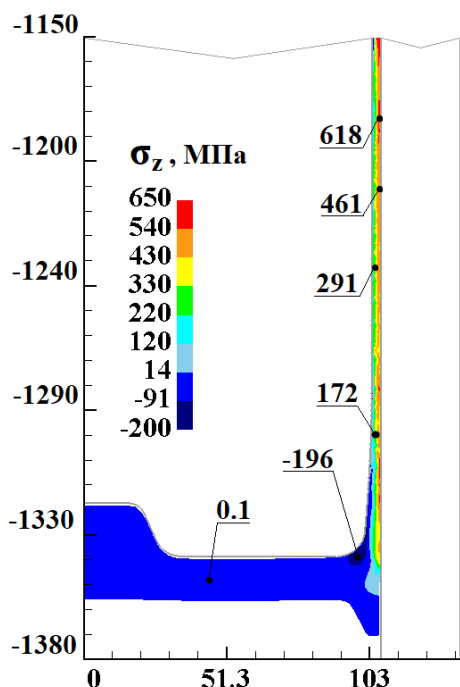


Рисунок 4.20 Розподіл осьових напружень σ_z у нижній частині

За інтенсивністю напруження (рис.Г.11в) найбільші зміни спостерігаються в стінці зверху - $\sigma_i=277\div522$ МПа. Опускаючись до дна інтенсивність напруження падає до значень $\sigma_i=206\div467$ МПа. В донній частині інтенсивність напружень найменша - $\sigma_i=15,1\div97,3$ МПа.

Деформований стан заготовки можна оцінити за рис. Г.12, рис. Г13, рис. Г14. Інструмент показаний тонкими сірими лініями, розміри по осям - в міліметрах. Дані отримувалися на zdeформованому напівфабрикаті після витягування з потоншенням. Напівфабрикат поділений на

три частини для зручності проведення оцінки накопичених деформацій.

Радіальні деформації (рис.Г.12а), накопичені при витягуванні з потоншенням, в цій частині напівфабрикату є стискаючими - $\varepsilon_r=-0,72\div0,77$. Біля торця напівфабрикату деформації зменшуються до $\varepsilon_r=-0,54$, а на самому торці стають розтягувальними $\varepsilon_r=0,01$.

Розподіл тангенціальних деформацій (рис.Г.12б) показує, що їхні значення значно менші ніж радіальні. Вони розташовуються шарами вздовж стінки спускаючись до низу. З внутрішньої сторони стінки деформації $\varepsilon_\theta=-0,0023\div-0,01$, а зовні вони досягають значення $\varepsilon_\theta=-0,02$.

Розподіл осьових деформацій (рис.Г.12в) показує, що в цьому напрямку деформації розтягувальні по всій верхній частині стінки напівфабрикату. На торці стінки деформації мають значення $\varepsilon_z=0,05\div0,39$. За розподілом деформацій в цій

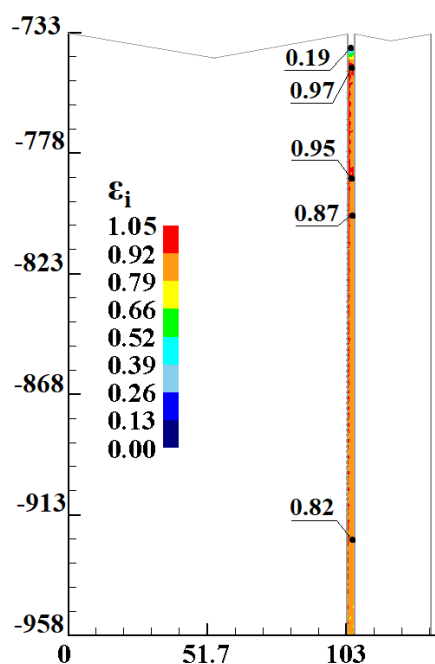


Рисунок 4.21 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в верхній частині

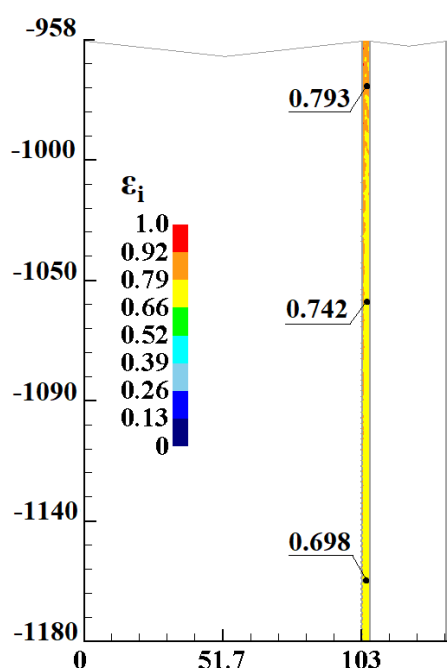


Рисунок 4.22 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в середній частині

частині значення зростають при наближенні до торця стінки становлять $\varepsilon_z=0,7\div0,82$.

При розгляді інтенсивності деформацій (рис.4.21) бачимо, що на цій частині напівфабрикату пропрацювання деформацією зростає при наближенні до торця.

Більша частина стінки має значення $\varepsilon_i=0,82\div0,87$. Є невелика зона біля торця зі значенням інтенсивності деформацій $\varepsilon_i=0,95\div0,97$. На краю стінки заготовки значення становлять $\varepsilon_i=0.19$.

Розподіл деформацій в середній частині напівфабрикату показаний на рис.Г.13.

На рис.Г.13а показано деформації в радіальному напрямку. Спостерігається зменшення значень деформацій при наближенні до дна заготовки - $\varepsilon_p=-0.696\div-0.561$.

Тангенціальний розподіл деформацій (рис.Г.13б) виглядає так, як і попередньому випадку: пошарове розташування вздовж стінки від внутрішньої сторони до зовнішньої, значення деформацій поступово збільшуються при наближенні до краю заготовки - $\varepsilon_\theta=-0,005\div-0,02$.

Деформації в осьовому напрямку (рис.Г.13в) цілком протилежні до двох попередніх - вони є розтягувальними. В верхній частині деформації додатні - $\varepsilon_z=0,64\div0,72$, до низу деформації зменшуються і становлять $\varepsilon_z=0,6$.

При розгляді інтенсивності деформацій (рис.4.22) можна сказати, що верхня частина пропрацьовується краще

деформацією $\varepsilon_i = 0,742 \div 0,793$. До низу інтенсивність деформацій спадає до значення $\varepsilon_i = 0,698$.

Нижня частина напівфабрикату та розподіл деформацій в ній показана на рис.Г.14.

В нижній частині радіальні деформації розподілені нерівномірно (рис.Г.14а). В донній частині деформації практично відсутні $\varepsilon_r = 0,01$. В конічній частині стінки деформації починають зростати до верху $\varepsilon_r = -0,23 \div -0,45$. В тонкій стінці деформації продовжують збільшуватися $\varepsilon_r = -0,55 \div -0,61$.

Тангенціальний розподіл деформацій (рис.Г.14б) також показує практично відсутні деформації в дні $\varepsilon_\theta = -0,001$. В місці переходу в стінку деформації збільшуються до $\varepsilon_\theta = -0,006 \div -0,023$. В стінці з внутрішньої сторони мають значення $\varepsilon_\theta = -0,007$, в напрямку зовнішньої сторони збільшуються до $\varepsilon_\theta = -0,02$.

При розгляді осевого розподілу деформацій (рис.Г.14в) в цьому напрямку по всій частині напівфабрикату деформації розтягувальні. В тонкій стінці деформації становлять $\varepsilon_z = 0,56 \div 0,63$. Конічна частина стінки біля дна містить деформації $\varepsilon_z = 0,26 \div 0,5$. В дні деформації практично відсутні - $\varepsilon_z = 0,001$.

Інтенсивність деформацій в напівфабрикаті розглянута на рис.4.23.

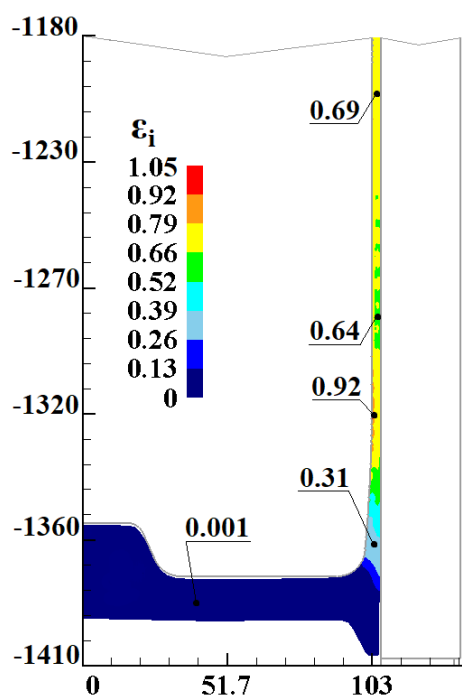


Рисунок 4.23 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в нижній частині

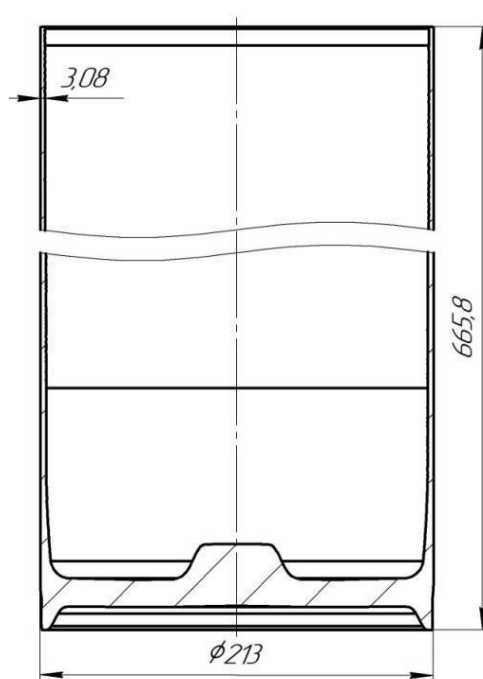


Рисунок 4.24 Напівфабрикат після другого витягування з потоншенням

Найкраще деформацією пропрацьована тонка стінка - $\varepsilon_i=0,64\div0,92$, в конічній частині інтенсивність деформацій дещо менша - $\varepsilon_i=0,31$. В доній частині значення деформації становить $\varepsilon_z=0,001$.

На рис.4.24 зображений напівфабрикат з розмірами та формою, який отримується після другого переходу витягування з потоншенням.

4.4. Аналіз третього переходу витягування з потоншенням

4.4.1. Схема витягування з потоншенням через одну матрицю та розрахункові схеми

На третьому переході витягування, на відміну від другого, використовується пуансон з гладкою поверхнею (рис.4.25). Пуансон 1 з напівфабрикатом 3, який знаходиться в матриці 2. Після витягування отримується напівфабрикат 4.

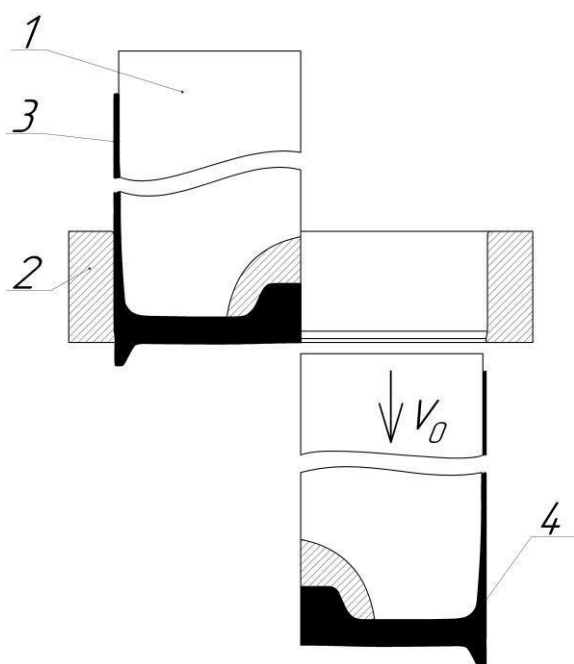


Рисунок 4.25 Схема витягування з потоншенням через одну матрицю

На рис.Г.15 показано початкове та кінцеве розташування інструменту при витягуванні з потоншенням в розрізі.

Моделювання проводилося в програмному комплексі DEFORM 2D використовуючи метод скінченних елементів.

Розташування інструменту на початку витягування з потоншенням показано на рис.Г.15а. Напівфабрикат після другого витягування з потоншенням знаходиться в направляючій частині матриці, пуансон знаходиться в середині напівфабрикату і

впертий в його дно. При русі пуансона вниз, він проштовхує напівфабрикат крізь матрицю, яка має діаметр менший ніж напівфабрикат. При проходженні стінка напівфабрикату стискається між пуансоном і робочим поясом матриці, потоншуючись при цьому, в цей же час вона росте у висоту. Після виходу з матриці (рис.Г.15б) напівфабрикат проходить через направляючу втулку, яка слугує направляючим елементом та підтримує матрицю в штампі.

Початкові умови: заготовка – математична модель, яка отримана в результаті розрахунку другого переходу витягування, відпалена. Коефіцієнт тертя

на контактуючих поверхнях між заготовкою та деформуючим інструментом прийнято за Кулоном $\mu=0,08$. Швидкість переміщення інструменту 7 мм/сек. Матеріал латунь Л70, в холодному стані 20°C, модель матеріалу пружно-пластична.

4.4.2. Силкові режими та питомі зусилля

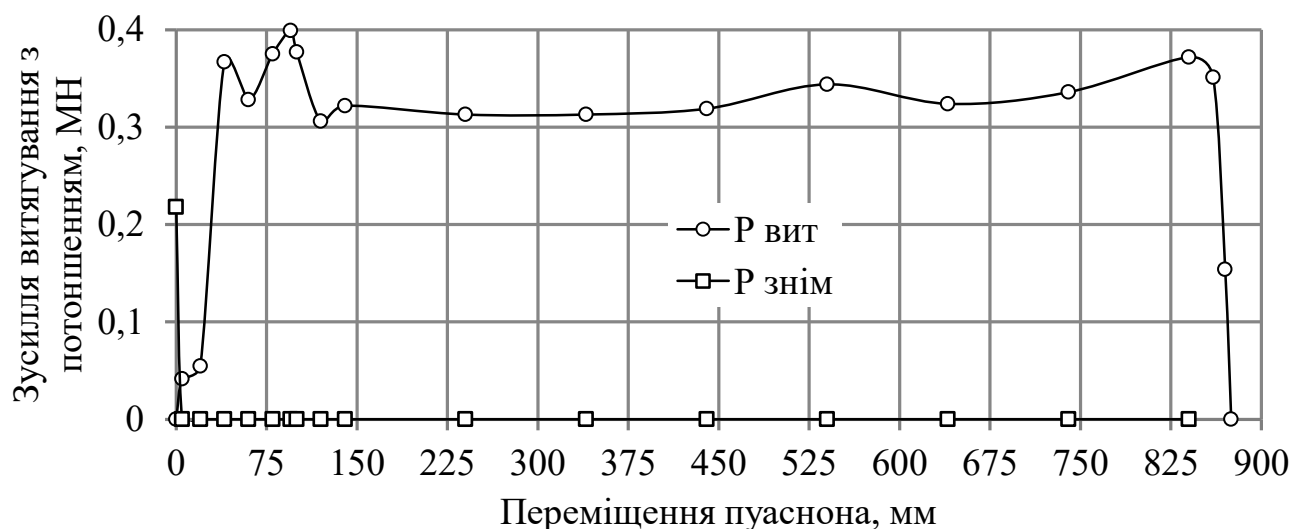


Рисунок 4.26 Залежність зусилля витягування з потоншенням від переміщення пуансона

На рис.4.26 показаний графік зусилля третього переходу витягування з потоншенням. На проміжку від 0 до 20 мм зусилля зростає не суттєво - 0,04-0,05 МН, деформування заготовки практично не відбувається. Починаючи з 40-100 мм деформується виступ під фланець та дно, зусилля тут досягають 37,5 МН. При продовженні витягування при переміщенні на 135 мм зусилля досягають свого максимального значення 39,9 МН, в цей час деформується нижня конічна частини стінки. Пройшовши 120 мм відбувається зменшення зусилля до 30,6 МН. На проміжку 120-440 мм, на якому відбувається потоншення тонкої циліндричної частини стінки, відбувається стабілізація зусилля в інтервалі 30,6-32,2 МН. Коли більша частина напівфабрикату вже пройшла матрицю, стінка зверху ще більше потоншується і зусилля починає зростати до 37,2 МН - це відбувається при переміщенні на 840 мм. Після цього моменту зусилля тільки зменшується і на проміжку 860-870 мм воно спадає з 35,1 МН до 14,5 МН. При виході стінки з

матриці на розмірі 875 мм зусилля становить 11,5 МН. Максимальне зусилля знімання становить 0,218 МН.

Розподіл нормальних напружень на поверхні деформуючого інструменту показано на рис.4.27.

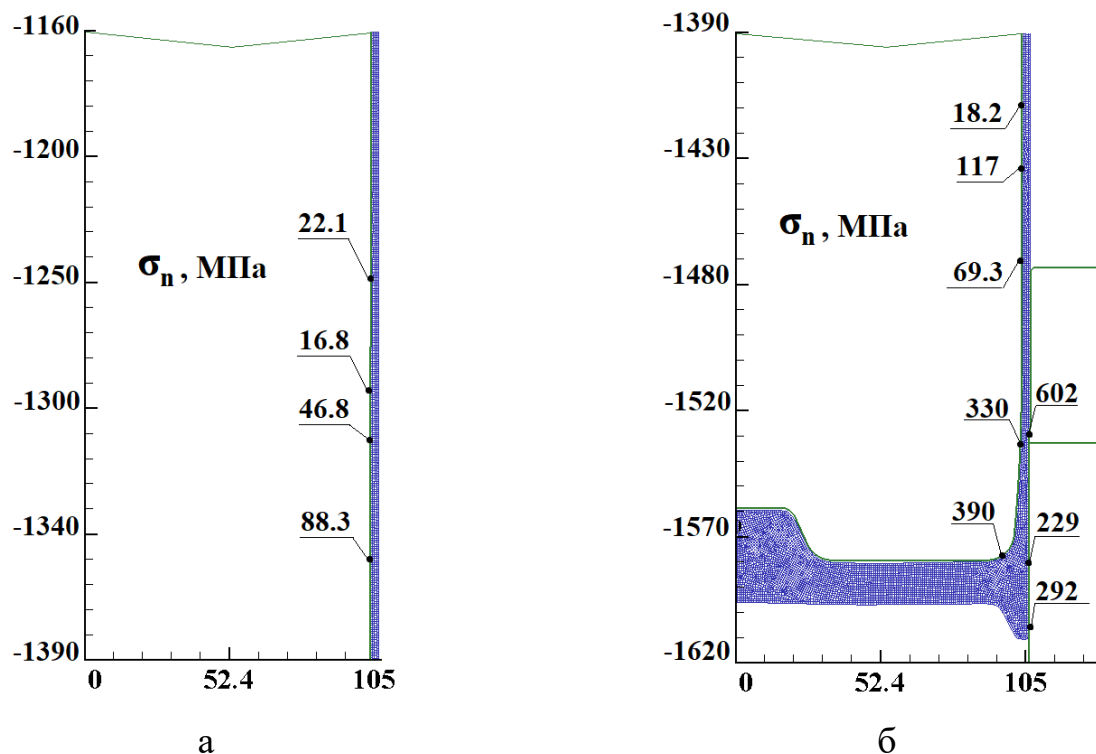


Рисунок 4.27 Розподіл нормальних напружень на інструменті при витягуванні з потоншенням : а - посередині, в-знизу

Напівфабрикат поділений на три частини через його висоту і тонку стінку. Верхню частину не розглядаємо через відсутність контакту поверхонь деформуючого інструменту з напівфабрикатом.

В середній частині напівфабрикату (рис.4.27а) нормальні напруження виникають тільки між пуансоном та стінкою. Вони змінюються в межах $\sigma_n=16,8\div22,1$ МПа вище і до низу зростають $\sigma_n=46,8\div88,3$ МПа.

На рис.4.27 б показано розподіл нормальних напружень в нижній частині. На циліндричній частині напруження становлять $\sigma_n=18,2\div69,3$ МПа, на конічній частині вони збільшуються до $\sigma_n=330$ МПа. На радіусі вони досягають $\sigma_n=390$ МПа. З направляючою частиною матриці напівфабрикат не контактує, а на робочому пояску є нормальні напруження $\sigma_n=602$ МПа. Направляюча втулка

контактує з дном та нижнім виступом на напівфабрикаті, нормальні напруження тут становлять $\sigma_n = 229 \div 292$ МПа.

4.4.3. Напружено-деформований стан напівфабрикату.

Розподіл напружень, які виникають в напівфабрикаті при найбільшому зусиллі у верхній частині, можна побачити на рис.Г.16.

Напруження в радіальному напрямку рис.Г.16а виникають через пружну деформацію металу. Близьче до верху вони розтягувальні - $\sigma_r = 0,02 \div 0,05$ МПа, опускаючись до дна напруження змінюються на стискаючі $\sigma_r = -9,17$ МПа.

Тангенціальні напруження на рис.Г.16б повністю розтягувальні і більша частина з них становить в середньому $\sigma_\theta = 3,16$ МПа, зона нижче містить більші напруження $\sigma_\theta = 76,1 \div 130$ МПа.

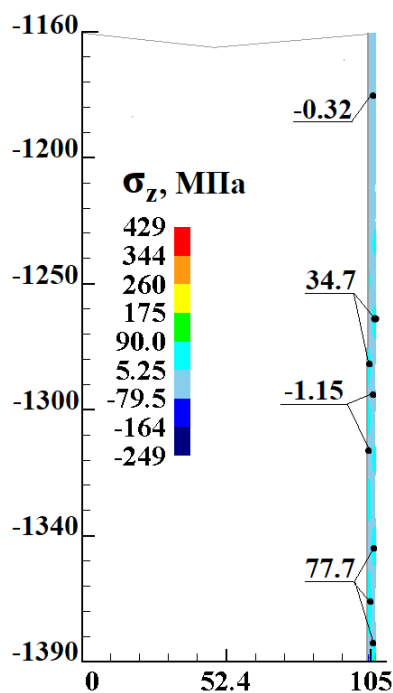


Рисунок 4.28 Розподіл осьових напружень σ_z у верхній частині

стілки в верхній частині - $\sigma_r = -2,93$ МПа, в осередку деформації найбільші стискаючі напруження $\sigma_r = -472$ МПа, в кінцевій частині стінки напруження стискаючі з невеликими зонами розтягувальних напружень $\sigma_r = 100$ МПа. В дні

Розподіл осьових напружень рис.4.28 показує, що в цій частині вони загалом додатні $\sigma_z = 34,7 \div 77,7$ МПа з невеликими від'ємними зонами $\sigma_z = -0,32 \div -1,15$ МПа, і ці зони чергуються, змінюючи одна одну.

За інтенсивністю напружень рис. Г.16г спостерігаємо, що більші значення виникають ближче до осередку деформації - $\sigma_i = 44,7 \div 119$ МПа. В вищій частині вони також є, але значно менші - $\sigma_i = 0,68 \div 20,4$ МПа.

На рис. Г.17 показана нижня частина напівфабрикату, частина стінки та дно.

Радіальні напруження рис. Г.17а в донній частині розподілилися наступним чином: в

напруження розподілилися наступним чином: в центрі напівфабрикату - $\sigma_r = -13,8 \div -70,7$ МПа, плоска частина дна містить напруження $\sigma_r = -22,9 \div -108$ МПа, на радіусі переходу в стінку - $\sigma_r = -142$ МПа.

Розподіл тангенціальних напружень рис.Г.176 показує, що в прямій тонкій стінці напруження знаходяться в межах $\sigma_\theta = 93,1 \div 124$ МПа. В зоні деформації, біля робочого пояса стискаючі напруження найбільші - $\sigma_\theta = -317$ МПа. В донній частині є три зони напружень: перша в виступі $\sigma_\theta = 7,57$ МПа, друга та третя зони напруження знаходяться в плоскому дні і становлять $\sigma_\theta = 43,9$ МПа та $\sigma_\theta = -100$ МПа. На зовнішній поверхні біля матриці напруження найбільші розтягувальні $\sigma_\theta = 173$ МПа.

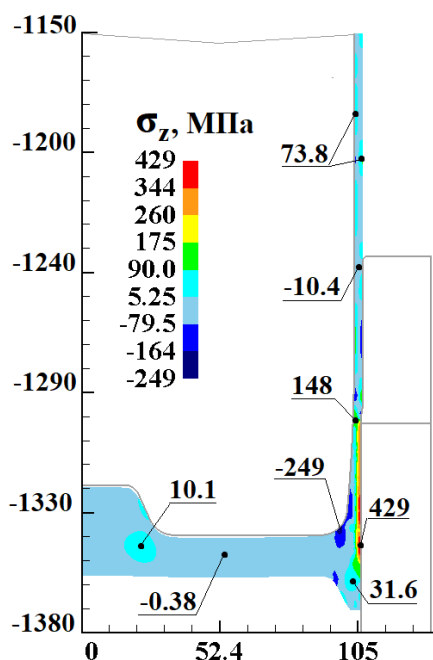


Рисунок 4.29 Розподіл осьових напружень σ_z у нижній частині

Розподіл осьових деформацій напружень зображений на рис.4.29. Найбільші стискаючі напруження знаходяться на радіусі переходу стінки і дна - $\sigma_z = -249$ МПа. Навпроти цієї зони напруження на зовнішній циліндричній поверхні є зона з найбільшими додатними напруженнями $\sigma_z = 429$ МПа. В тонкій стінці напруження змінюються в межах $\sigma_z = -10,4 \div 73,8$ МПа. В дні напруження знаходяться в межах $\sigma_z = -0,38 \div 10,1$ МПа.

За інтенсивністю напружень рис.Г.17в найбільші значення спостерігаються в осередку деформації $\sigma_i = 452$ МПа. В стінці напруження змінюються в межах $\sigma_i = 79,7 \div 120$ МПа. В дні інтенсивність напруження менша, ніж в стінці, і змінюється в межах $\sigma_i = 32,5 \div 88,1$ МПа. Доволі високі значення інтенсивності напружень були досягнуті в виступі зовні - $\sigma_i = 48,1 \div 128$ МПа.

Деформований стан зображений на рис.Г.18 та рис.Г.19. Дані отримувалися на zdeформованому напівфабрикаті після третього переходу витягування з

потоншенням. Інструмент показаний тонкими сірими лініями. Розміри по осям в міліметрах. Напівфабрикат для зручності проведення аналізу поділений на три частини, що пов'язано з великою довжиною та тонкою стінкою.

Розподіл деформацій в радіальному напрямку показаний на рис.Г.18а. Значення деформацій зростає при наближенні до торця стінки. В нижній частині стінки деформації складають $\varepsilon_r = -0.29$, до верху деформації зростають до $\varepsilon_r = -0.3 \div -0.33$.

Тангенціальні деформації (рис.Г.18б) в цій частині незначні порівняно з радіальними. Розподілені по шарам від внутрішньої поверхні, на якій вони найменші - $\varepsilon_\theta = -0.001$, і до зовнішньої поверхні, де вони зростають до $\varepsilon_\theta = -0.004$.

Осьові деформації (рис.Г.18в) розтягувальні. Найбільші деформації знаходяться на ділянці біля торця - $\varepsilon_z = 0.36$. Далі вниз по стінці деформації спадають до $\varepsilon_z = 0.28 \div 0.31$.

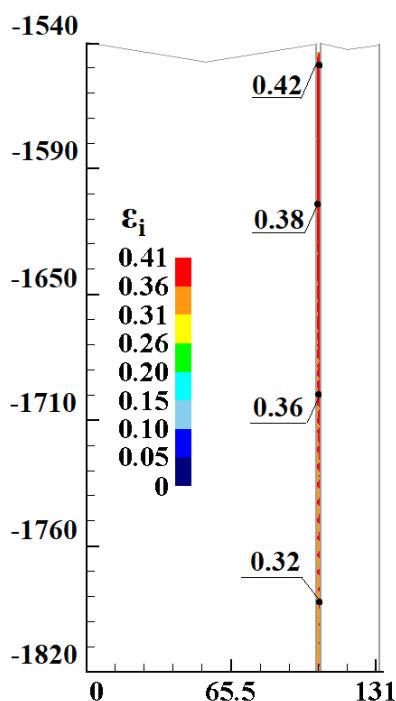


Рисунок 4.30 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i у верхній частині

За інтенсивністю деформацій (рис.4.30) в цій частині найкраще пропрацьована ділянка на краю $\varepsilon_i = 0.42$ і біля нього $\varepsilon_i = 0.38$. Знижуючись до дна інтенсивність деформацій спадає до $\varepsilon_i = 0.32 \div 0.36$.

Розподіл деформацій в середній частині напівфабрикату зображений на рис.Г.19.

В радіальному напрямі деформації (рис.Г.19а) розподілилися більш менш рівномірно: від верху - $\varepsilon_r = -0.27 \div -0.29$ і до низу - $\varepsilon_r = -0.25 \div -0.24$.

На розподілі тангенціальних деформацій (рис.Г.19б) зовнішня поверхня накопичила більші деформації $\varepsilon_\theta = -0.005$. В середині і біля внутрішньої поверхні стінки деформації менші - $\varepsilon_\theta = -0.0007 \div -0.003$.

Деформації осьові (рис.Г.19в), на відміну від двох попередніх напрямків, додатні. Ця частина напівфабрикату розділилася на дві ділянки деформацій: зверху більші деформації - $\varepsilon_z=0,26\div 0,28$, зі сторони дна менші - $\varepsilon_z=0,24$.

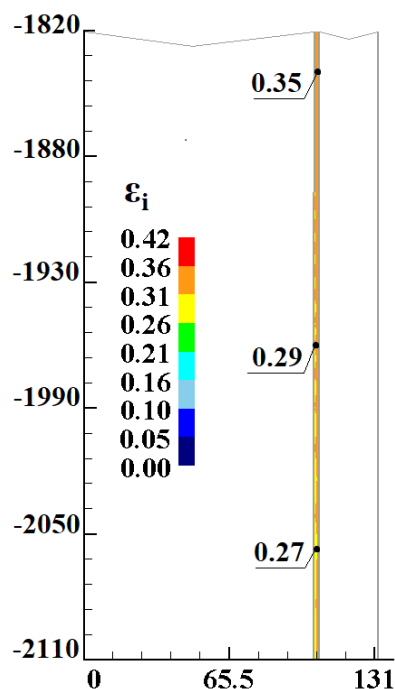


Рисунок 4.31 – Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в середній частині

Розглянувши розподіл інтенсивності деформацій (рис.4.31) можна встановити, що верхня частина пропрацьовується деформацією трохи краще - $\varepsilon_i=0,35$, ніж нижня - $\varepsilon_i=0,27\div 0,29$.

На рис.Г.20 показано розподіл деформацій в нижній частині напівфабрикату, яка складається з частини стінки, що потовщується біля дна, та самого дна з внутрішнім та зовнішнім виступом.

Деформації в радіальному напрямі (рис.Г.20а) найбільші у стінці. В дні деформації незначні - $\varepsilon_r=0,02$. Зверху стінки деформації знаходяться в межах $\varepsilon_r=-0,23\div -0,25$. В конічній частині стінки деформації змінюються від $\varepsilon_r=-0,09$ внизу до $\varepsilon_r=-0,27$ в верхній частині.

Тангенціальний напрямок розподілу деформацій (рис.Г.20б) має наступний вигляд: в дні деформації малі $\varepsilon_\theta=-0,0002\div -0,0005$, в стінці біля зовнішньої поверхні деформації більші стискаючі $\varepsilon_\theta=-0,005$, біля внутрішньої частини конічної стінки є ділянка розтягувальних деформацій $\varepsilon_\theta=0,001$.

Розподіл осьових деформацій (рис.Г.20в) відрізняється повністю розтягувальними деформаціями. В прямій стінці деформації становлять $\varepsilon_z=0,22\div 0,23$. При переході прямої стінки в конічну є ділянка з деформаціями $\varepsilon_z=0,27$. В конічній частині деформації на рівні $\varepsilon_z=0,11\div 0,27$. В дні накопичення деформацій незначне і складає $\varepsilon_z=0,0005$.

За інтенсивністю деформацій (рис.4.32) спостерігається незначне пропрацювання дна $\varepsilon_i=0,001$. Конічна частина стінки має більшу інтенсивність деформацій $\varepsilon_i=0,06\div0,208$. Починаючи від переходу конічної частини стінки в пряму стінку і вище, пропрацювання пластичною деформацією зростає до рівня $\varepsilon_i=0,31\div0,34$.

Форма та розміри отриманого напівфабрикату після третього переходу показані на рис.4.33. Розміри проставлені в міліметрах.

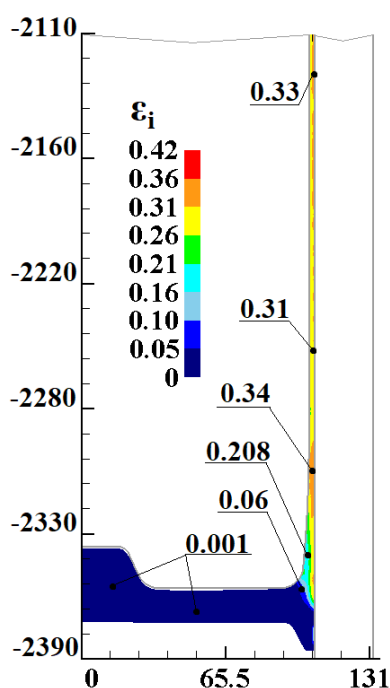


Рисунок 4.32 – Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в нижній частині

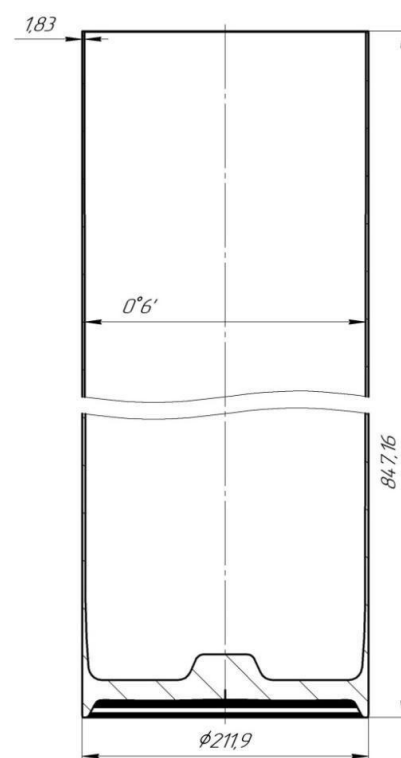


Рисунок 4.33 Форма та розміри напівфабрикату після третього витягування з потоншенням

4.5 Аналіз процесу витягування інженерними методами

Проводимо аналіз процесу витягування з потоншенням з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки.

Метод балансу потужностей (МБП) відносять до енергетичних методів теоретичного аналізу процесів обробки металів тиском (ОМТ). В процесах ОМТ потужність зовнішніх сил N_{3C} , які прикладаються до заготовки, витрачається на потужність для подолання сил опору деформування N_D , потужність на подолання сил тертя N_T частинок металу на контактуючій поверхні з деформуючим інструментом та потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву N_3 . Тоді рівняння балансу потужностей в будь-якому процесі ОМТ має вигляд:

$$N_{3C} = N_D + N_T + N_3 \quad (6.1)$$

Потужність зовнішніх сил N_{3C} можливо визначити, якщо відоме зусилля деформування P_d і швидкість переміщення деформуючого інструменту V_0 :

$$N_{3C} = P_d V_0 \quad (6.2)$$

Тоді з урахуванням рівняння (3.1) отримують:

$$P_d = \frac{1}{V_0} (N_D + N_T + N_3) \quad (6.3)$$

Потужність N_D визначають по формулі:

$$N_D = \iiint_V \sigma_s \dot{\epsilon}_i dV, \quad (6.4)$$

де: σ_s – напруження текучості; $\dot{\epsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформацій, яка в має вигляд $\dot{\epsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_\rho - \dot{\epsilon}_\theta)^2 + (\dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_\rho)^2 + \frac{3}{2} \dot{\gamma}_{\rho z}^2}$ в циліндричних координатах; dV - елементарний об'єм.

В циліндричних координатах ρ, z, θ при деформуванні вісесиметричної заготовки компоненти швидкостей деформацій через відповідні швидкості частинок металу розраховують по формулах:

$$\dot{\epsilon}_\rho = \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho}; \dot{\epsilon}_\theta = \frac{V_\rho}{\rho}; \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \dot{\gamma}_{\rho z} = \frac{\partial V_\rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial \rho} \quad (6.5)$$

Потужність, яка витрачається на подолання сил тертя N_T , визначають згідно виразу:

$$N_T = \iint_F \tau_k \sqrt{V_n^2 + V_t^2} dF, \quad (6.6)$$

де: $\tau_k = \mu \sigma_s$ - дотичне напруження на контактній поверхні (μ – коефіцієнт тертя);

V_n і V_l - швидкості частинок металу на контактуючій поверхні ; n і l узагальнені (ρ або z); dF – елементарна площа контактуючої поверхні.

Потужність на подолання сил зсуву визначають по виразу:

$$N_3 = \iint_G \tau_s |V_n - V_l| dG, \quad (6.7)$$

де: $\tau_s = \sigma_s/2$ - дотичне напруження зсуву; V_n і V_l - швидкості частинок металу вздовж поверхні зсуву; dG – елементарна площа поверхні зсуву; n і l – узагальнені координати, про які вказано вище.

Враховуючи, що заготовку при аналізі МБП розділяють на ряд об'ємів, то кінцева формула для визначення зусилля деформування має вигляд:

$$P_D = \frac{1}{V_0} \left(\sum_{i=1}^I \iiint_V \sigma_s \dot{\epsilon}_i dV + \sum_{j=1}^J \tau_k \sqrt{V_n^2 + V_l^2} dF + \sum_{h=1}^H \iint_G \tau_s |V_n - V_l| dG \right), \quad (6.8)$$

де: I – кількість об'ємів, де має місце деформування металу; J – кількість контактуючих поверхонь, на яких має місце тертя; H – кількість поверхонь зсуву.

Рівняння (3.8) є першим основним рівнянням МБП. При наявності лінії розділу течії металу її розмір R_p визначають з умови мінімуму зусилля деформування (правильний розмір повинен забезпечити мінімальне значення зусиллю P_D) :

$$\partial P_D / \partial R_p = 0 \quad (6.9)$$

Звідки отримують вираз для розрахунків розміру R_p . Рівняння (6.9) є другим основним рівнянням МБП.

На основі схеми деформування розробляємо розрахункову схему по аналогії з рішенням Попова Є.О. для витягування з потоншенням методом балансу робіт. Заготовка вісесиметрична, то розглядаємо її половину (рис.6.33). В заготовці 1, яка розміщена в матриці 2 і деформується зусиллям P_d за допомогою пуансону 3, виділяємо осередок деформації, який обмежений радіусами R і r . Для більш точного врахування тертя на контактуючих поверхнях надалі визначимо напруження в осередку деформації. На бокових поверхнях матриці і на пуансоні діють стискаючі напруження σ_θ та дотичні напруження, які по Кулону мають вигляд $\tau_k = \mu \sigma_\theta$. При цьому напрямок дії таких напружень на матриці відрізняється

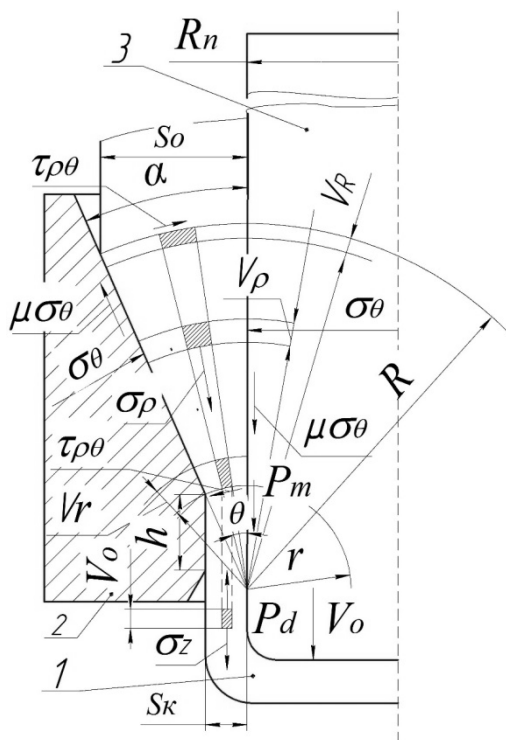


Рисунок 4.34 Схема витягування з потоншенням з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки

від пуансона, оскільки швидкість пуансона V_0 більша за швидкість переміщення частинок металу в осередку деформації. Крім напруження σ_θ в осередку деформації діють розтягувальні напруження σ_ρ . Також біля границь цього осередку радіусами R і r завдяки зміні траєкторії руху частинок металу виникають дотичні напруження $\tau_{\rho\theta}$, які приводять до виникнення сил зсуву. Тягнуче зусилля P_m за стінку здеформованої заготовки створюється пуансоном в зазорі між ним і матрицею висотою, на величину якого зменшується зусилля P_d , що прикладається до донної частини заготовки.

Запишемо рівняння балансу потужностей:

$$N_{3C} = P_d V_0 = N_D + N_{TM} + N_{TP} + N_{3R} + N_{3r} \quad (6.10)$$

де:

N_{3C} – потужність зовнішніх сил;

N_D – потужність, яка витрачається на подолання опору деформування;

N_{TM} – потужність, яка витрачається на подолання сил тертя на матриці;

N_{TP} – потужність, яка витрачається на подолання сил тертя на пуансоні;

N_{3R} – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву на верхній границі осередку деформації;

N_{3r} – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву на нижній границі осередку деформації;

Застосовуємо по Попову Є.О. полярну систему координат та приймаємо розмір дорівнює одиниці, який перпендикулярний площині креслення (див. рис. 4.34).

При визначенні потужності N_D по рівнянню (6.4) вважаємо, що зміцнення спочатку відсутнє і $\sigma_s = \sigma_i = \text{const}$. Крім цього, розглядається усталена стадія витягування з потоншенням, тому зсувні деформації в осередку деформації порівняно малі та має місце плоско-деформований стан і швидкості деформацій $\dot{\epsilon}_\rho = -\dot{\epsilon}_\theta$. Тоді інтенсивність швидкостей деформацій дорівнює :

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{\epsilon}_\theta = 1,15 \dot{\epsilon}_\theta \quad (6.11)$$

Визначаємо компоненти швидкостей деформацій та елементарний об'єм. Швидкість частинок металу на нижній границі осередку деформацій позначаємо через V_r , а швидкість на довільному радіусі ρ – через V_ρ . Тоді по закону постійності об'єму маємо:

$$V_\rho \rho = V_r r, \text{ або } V_\rho = V_r r / \rho \quad (6.12)$$

Швидкість деформації $\dot{\epsilon}_\theta$ дорівнює:

$$\dot{\epsilon}_\theta = V_\rho / \rho = V_r r / \rho^2 \quad (6.13)$$

Елементарний об'єм дорівнює $dV = \rho \alpha d\rho$.

Підставляємо знайдені величини $\dot{\epsilon}_i$, $\dot{\epsilon}_\theta$ і dV в формулу (3.4):

$$N_D = 1,15 \sigma_s \alpha r \int_r^R \frac{d\rho}{\rho} = 1,15 \sigma_s \alpha r V_r \ln \frac{R}{r}$$

Без врахування коефіцієнту Луде маємо:

$$N_D = \sigma_s \alpha r V_r \ln \frac{R}{r} \quad (6.14)$$

Для знаходження потужностей на подолання сил тертя визначаємо компоненти напружень в осередку деформації шляхом розв'язку наближених диференціальних рівнянь рівноваги $\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0$ з умовою пластичності $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s$.

Підставляємо в рівняння рівноваги умову пластичності та розділяємо змінні:

$$d\sigma_\rho = -\frac{\sigma_s d\rho}{\rho}$$

Після інтегрування отримуємо:

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \ln \rho + C$$

Довільну постійну C знаходимо із умови – при $\rho = R$ напруження $\sigma_\rho = -q$. Тут q величина напруження, яка виникає при прикладанні тягнучого зусилля за стінку здеформованої заготовки. Тоді:

$$C = \sigma_s \ln R - q$$

Кінцевий вираз для σ_ρ має вигляд:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} - q$$

З умови пластичності визначаємо напруження σ_θ :

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho - \sigma_s = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} + q - \sigma_s = -\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} - \frac{q}{\sigma_s}\right) \quad (6.15)$$

Далі визначаємо потужності на подолання сил тертя по виразу (6.7). На контактуючій поверхні матриці нормальне напруження $\sigma_n = |\sigma_\theta| = \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} - \frac{q}{\sigma_s}\right)$, швидкість частинок металу V_ρ , а елементарна площа поверхні $dF = d\rho \cdot 1$.

Тоді потужність на подолання сил тертя на матриці дорівнює:

$$N_{TM} = \int_r^R \mu \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} - \frac{q}{\sigma_s}\right) V_r r \frac{d\rho}{\rho}$$

Після інтегрування маємо:

$$N_{TM} = \mu \sigma_s r \left[1 + \ln(R/\sqrt{Rr}) - q/\sigma_s\right] \ln(R/r) V_r \quad (6.16)$$

Швидкість переміщення частинок металу по поверхні пуансону визначаємо по різниці $V_\rho - V_r = -V_r(1 - r/\rho)$. Тоді потужність сил тертя на пуансоні можна знайти по виразу:

$$\begin{aligned} N_{TP} &= - \int_r^R \mu \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} - \frac{q}{\sigma_s}\right) V_r (1 - r/\rho) d\rho = \\ &= -\mu \sigma_s V_r \left[\int_r^R \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right) (1 - r/\rho) d\rho - (q/\sigma_s) \int_r^R (1 - r/\rho) d\rho \right] = \\ &= -\mu \sigma_s V_r \{ r \ln(R/r) \ln(R/\sqrt{Rr}) - (q/\sigma_s) [R - r - r \ln(R/r)] \} \quad (6.17) \end{aligned}$$

Далі знаходимо потужності на подолання сил зсуву на верхній і нижній границях осередку деформації. Для цього визначаємо проекції швидкостей частинок металу на вказаних поверхнях при заданій швидкості переміщення пуансона V_r . На поверхні радіусом R маємо:

$$V_{\tau R} = V_R \operatorname{tg} \theta = (r/R) V_r \operatorname{tg} \theta$$

Для поверхні радіусом r :

$$V_{\tau r} = V_r \operatorname{tg} \theta = V_r \operatorname{tg} \theta$$

Величини приведених швидкостей дорівнюють нулю при куті $\theta = 0$ (біля поверхні пуансона та набувають максимальних значень при $\theta = \alpha$ (біля поверхні матриці). При витягуванні кут матриці приймають малим (α менший за 16°). Для таких кутів $\operatorname{tg} \theta \cong \theta$. Тоді потужність сил зсуву на верхній границі осередку деформації радіусом R дорівнює:

$$N_{3R} = \int_0^\alpha (\sigma_s r/2R) V_r R \theta d\theta = 0,5 \sigma_s r V_r \int_0^\alpha \theta d\theta = 0,25 \sigma_s r \alpha^2 V_r \quad (6.18)$$

Аналогічна потужність для нижньої границі радіусом r має вигляд:

$$N_{3r} = \int_0^\alpha (\sigma_s r/2) V_r \theta d\theta = 0,25 \sigma_s r \alpha^2 V_r \quad (6.19)$$

Потужність зовнішніх сил N_{3C} виразимо через напруження σ_z в протягнутій частині zdeформованої заготовки і швидкість V_o :

$$N_{3C} = \sigma_z S_\kappa V_o$$

Із умови витрат металу маємо:

$$S_\kappa V_o = r \alpha V_r$$

Тоді вираз для N_{3C} приймає вигляд:

$$N_{3C} = \sigma_z r \alpha V_r \quad (6.20)$$

Підставляємо формули для потужностей (6.14), (6.16), (6.17), (6.18), (6.19) і (6.20) в рівняння балансу потужностей (6.10) та отримуємо:

$$\begin{aligned} \sigma_z r \alpha V_r = & \sigma_s \alpha r V_r \ln \frac{R}{r} + \mu \sigma_s r [1 + \ln(R/\sqrt{Rr}) - q/\sigma_s] \ln(R/r) V_r + \\ & + \mu \sigma_s V_r \{ r \ln(R/r) \ln(R/\sqrt{Rr}) - (q/\sigma_s) [R - r - r \ln(R/r)] \} + \\ & + 0,25 \sigma_s r \alpha^2 V_r + 0,25 \sigma_s r \alpha^2 V_r \end{aligned}$$

Після перетворень і скорочення на $r \alpha V_r$ знаходимо:

$$\begin{aligned} \sigma_z = & \{ \sigma_s + \mu \sigma_s [1 - (q/\sigma_s)] / \alpha \} \ln(R/r) + \\ & + \mu \sigma_s [(R/r) - 1 - \ln(R/r)] (q/\sigma_s) + 0,5 \sigma_s \alpha \end{aligned} \quad (6.21)$$

Із схеми витягування (див. рис. 4.37) можна визначити, що $R = S_o / \sin \alpha$ і $r = S_\kappa / \sin \alpha$. Тоді із (6.21) маємо:

$$\sigma_z = \sigma_s \{ [\mu \sigma_s (1 - q/\sigma_s) / \alpha] \ln(S_o/S_k) + \mu [S_o/S_k - 1 - \ln(S_o/S_k)] (q/\sigma_s) / \alpha + 0,5\alpha \} \quad (6.22)$$

Із (6.22) видно, що розтягувальні напруження σ_z зростають із збільшенням ступеню деформації S_o/S_k і коефіцієнту тертя μ та зменшуються при дії додаткового напруження q , яке виникає при прикладанні розтягуючого зусилля до стінки заготовки.

Зміцнення при витягуванні з потоншенням можна врахувати по відомій степеневій апроксимації діаграми істинних напружень:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_\epsilon}{1 - \psi_u} \left(\frac{\psi}{\psi_u} \right)^{\psi/(1 - \psi_u)}, \quad (6.23)$$

де: σ_ϵ – межа міцності; ψ_u – відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку при випробуванні на розтяг; ψ – текуче значення відносного потоншення.

По Попову Є.О. в якості ψ можна взяти середнє значення деформації $\epsilon_{\theta_{cp}} = (S_o - S_k)/2S_o$. Тоді середнє значення напруження текучості в осередку деформації із (6.23) приймає вигляд:

$$\sigma_s^{cp} = \frac{\sigma_\epsilon}{1 - \psi_u} \left(\frac{S_o - S_k}{2S_o \psi_u} \right)^{\psi/(1 - \psi_u)}$$

Якщо підставити σ_s^{cp} у формулу (6.22), то буде враховане зміцнення при витягуванні.

Зусилля витягування з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки P_d буде складатися із зусилля для створення напруження σ_z (P_{σ_z}), зусилля на подолання сил тертя пуансона по zdeформованій заготовці в осередку деформації (P_T) та тягнучого зусилля за стінку заготовки P_m :

$$P_d = P_{\sigma_z} + P_T + P_m \quad (6.24)$$

Визначимо кожен складову зусилля P_d . Зусилля P_{σ_z} встановлюємо з урахуванням виразу (6.22):

$$P_{\sigma_z} = 2\pi R_n S_k \sigma_z = 2\pi R_n S_k \{ \sigma_s + \mu \sigma_s [1 - (q/\sigma_s)] / \alpha \} \ln(R/r) + \mu [S_o/S_k - 1 - \ln(S_o/S_k)] (q/\sigma_s) / \alpha + 0,5\alpha \}$$

Для визначення зусилля P_T використовуємо вираз (6.15), приймаючи абсолютну величину напруження σ_θ :

$$P_T = 2\pi R_n \int_r^R \mu \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} - \frac{q}{\sigma_s} \right) d\rho = 2\pi R_n \mu \sigma_s [(R - r)(1 - q/\sigma_s) - + 2R - r - r \ln(R/r)]$$

Тягнуче зусилля за стінку P_m знаходимо по питомому зусиллю q , яке прикладається в калібруючому пояску матриці висотою h :

$$P_m = 2\pi R_n h q$$

4.6 Висновки

1. З використанням методу скінченних елементів створені математичні пружно-пластичні моделі та проведене комп'ютерне моделювання другого переходу штампування виробу, який складається із трьох операцій холодного витягування з потоншенням. На першій операції здійснюється витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані конусні матриці. Друга і третя операції витягування здійснюються через одну матрицю.

2. Для скорочення кількості операцій витягування застосовано пуансон спеціального профілю, у якого конусна поверхня донної частини утворена шляхом перетину кіл однакового діаметру, центри яких розташовані під кутом з постійним кроком. При деформуванні напівфабрикату у матрицях метал заповнює впадини на вказаній поверхні, за рахунок чого створюється тягнуче зусилля за стінку при витягуванні. Таке зусилля забезпечує зниження розтягувальних осьових напружень у стінці і зменшення вірогідності її відриву від донної частини та приводить до розвантаження донної частини zdeформованого напівфабрикату.

3. Для кожної операції витягування з потоншенням встановлені залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів і розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті. Виявлені зусилля знімання zdeформованих напівфабрикатів з пуансонів при зворотному їх переміщенні. Визначені кінцеві форми і розміри напівфабрикатів після витягування та напружено-деформований стан zdeформованого металу.

4. Встановлено, що після першої операції витягування з потоншенням відбувається викривлення донної частини zdeформованого напівфабрикату, яке приводить до необхідності застосування операції калібрування донної частини. Запропоновано використання напівгарячого калібрування, що дозволяє зменшити зусилля деформування. Шляхом моделювання методом скінченних елементів виявлено зусилля калібрування, питомі зусилля на інструменті та напружено-деформований стан металу у донній частині.

5. Розрахунковим шляхом для третьої операції витягування з потоншенням визначені форма і розміри пуансона і розміри матриці, які забезпечують отримання напівфабрикату необхідних розмірів стінки змінної товщини по висоті із розподілом zdeформованого стану в стінці. Встановлені форма і розміри дозволять звести до мінімуму механічну обробку після кінцевого переходу штампування обтиском, а zdeформований стан забезпечить потрібну межу текучості zdeформованого металу.

6. З використанням методу балансу потужностей і методу спільного вирішення наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності* вперше проведений аналіз витягування з потоншенням з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки. Отримано аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля деформування з урахуванням дії сил тертя та зміцнення металу при холодному формоутворенні.

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ НАПІВГАРЯЧОГО
ОСАДЖУВАННЯ ФЛАНЦЯ

5.1. Схема та розрахункові схеми

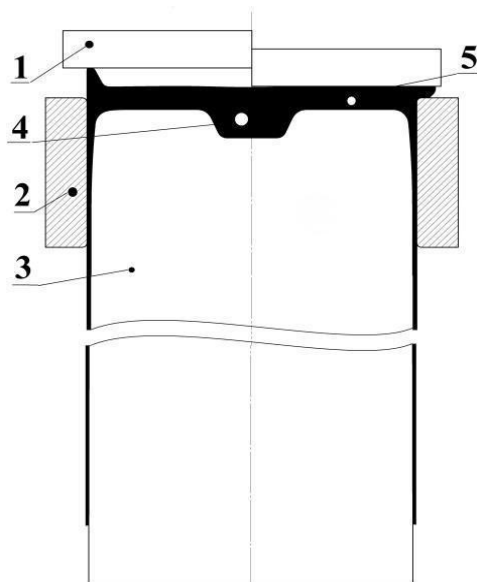


Рисунок 5.1 Схема процесу
осаджування фланця

За допомогою осаджування можна отримувати різні елементи на заготовці. В даному випадку (рис.5.1) процесом осаджування отримується фланець напівфабрикату 4 з попередньо утвореного виступу на торці донної частини напівфабрикату 3. При опусканні пуансона у вигляді плити 1 виступ поступово осаджується та згодом перегинається через радіус матриці 2 направляючись в бік та формуючи фланець.

Заготовкою служить напівфабрикат, отриманий після третього переходу витягування з потоншенням (див. рис. 4.34).

Моделювання процесу осаджування фланця проводилось за допомогою програмного комплексу DEFORM 2D. Результати розрахунків наведені в додатку Д.

Розташування інструменту перед осаджування показано на рис.Д.1а. Напівфабрикат 4 після витягування з потоншенням знаходиться на оправці 3 та в матриці 2, зверху притиснутий пуансоном 1. При осадженні фланця пуансон 1 рухається до низу даючи на виступ, який поступово спочатку осаджується, а потім вигинається в бік, перегинаючись через торець матриці 2. Після чого він калібрується в розмір осаджуючись між пуансоном 1 та торцем матриці 2. Завершений процес осаджування фланця показаний на рис.Д.1 б, де зображено готовий напівфабрикат 5.

Для моделювання були задані такі початкові умови: заготовка - це напівфабрикат, який отриманий на переході витягування з потоншенням, тертя на контактуючих поверхнях $\mu=0,1$ за Зібелем, напівфабрикат нагрівається до

температури 250°C, інструмент до 200°C. Для розрахунку задачі застосовувалась пружно-пластична модель матеріалу заготовки.

5.2 Силкові режими та питомі зусилля

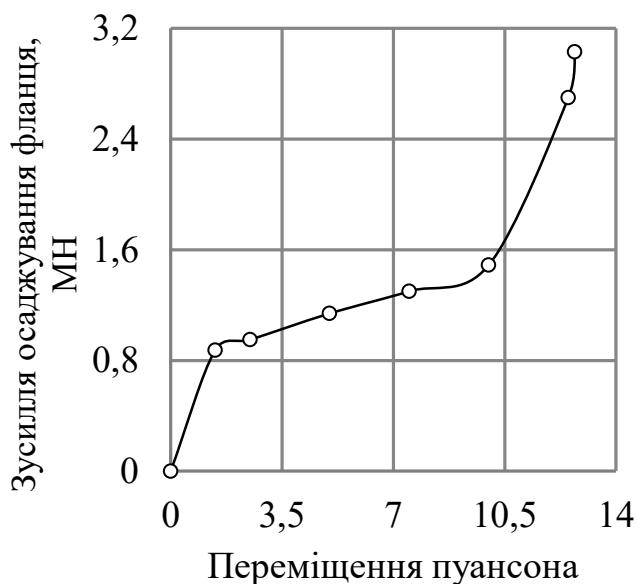


Рисунок 5.2 Залежність зусилля осаджування від переміщення пуансона

Графік зусилля показаний на рис. 5.2. На протязі всього процесу осаджування фланця відбувається зростання зусилля. На проміжку 0-15 мм зусилля різко зростає до 0,88 МН. Після цього відбувається плавне зростання зусилля на проміжку 1,5-10 мм, де його значення сягає 1,49 МН. Після чого відбувається калібрування фланця і дна на проміжку від 10 до 12,7 мм, зусилля при цьому знову різко зростає і становить 3,03 МН.

Розподіл питомих зусиль на контактній поверхні інструменту (рис.5.3).

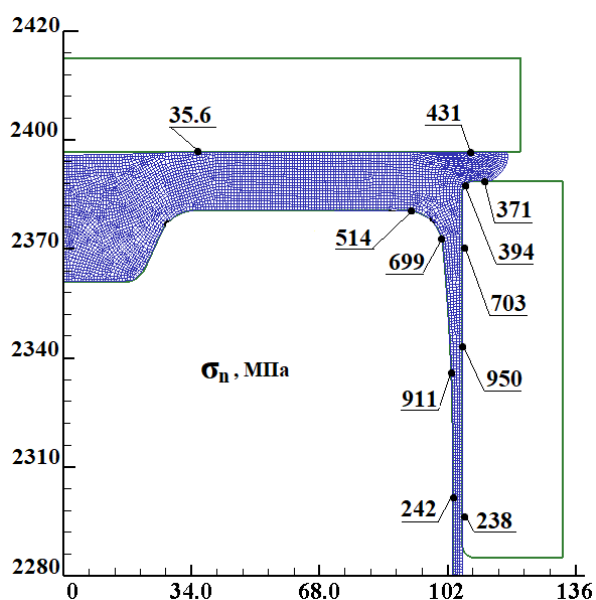


Рисунок 5.3 Розподіл нормальних напружень при осадженні фланця

Біля пуансона нормальні напруження виникають не по всій поверхні. Є невелика ділянка біля центру дна, де напруження становлять $\sigma_n = 35,6$ МПа, більші напруження виникають біля фланця $\sigma_n = 431$ МПа. На матриці поверхня сприймає найвищі нормальні напруження до $\sigma_n = 950$ МПа. На торці під фланцем та на радіусі напруження змінюються в межах $\sigma_n = 371 \div 394$ МПа. Сама циліндрична поверхня матриці сприймає напруження $\sigma_n = 238 \div 950$ МПа, менші

напруження розташовані нижче. Оправка, на яку надягається напівфабрикат, на циліндричній частині сприймає напруження $\sigma_n=242$ МПа, на конічній частині оправки напруження найбільші і мають значення $\sigma_n=911$ МПа.

Біля дна напівфабрикату на радіусі напруження становлять $\sigma_n=514\div 699$ МПа. За отриманими даними можна підібрати матеріал для виготовлення інструменту.

5.3 Напружено-деформований стан напівфабрикату

Розгляд напружено-деформованого стану проводиться тільки на донній частині (рис. Д.2). Деформуючий інструмент показаний тонкими сірими лініями. Дані отримувалися в кінці осаджування при найбільшому зусиллі.

На рис.Д.2а в радіальному напрямі напруження змінні, у фланці розтягувальні - $\sigma_r=20$ МПа, в плоскій частині дна змінюються на стискаючі - $\sigma_r=-160$ МПа, і у виступі на дні знову стають розтягувальними - $\sigma_r=190$ МПа, в середині виступу найбільші розтягувальні напруження складають $\sigma_r=430$ МПа. В стінці навпаки - по всьому об'єму стискаючі, на переході з дна - $\sigma_r=-260$ МПа, на конічній частині стінки напруження сягають свого максимуму $\sigma_r=-900$ МПа. Біля нижнього торця матриці радіальні напруження зменшуються $\sigma_r=-350$ МПа.

Тангенціальний напрямок розподілу напружень зображений на рис. Д.2б, він подібний на радіальний. Розтягувальні напруження спостерігаються у фланці - $\sigma_\theta=110$ МПа та у виступі - $\sigma_\theta=220\div 480$ МПа. В самому центрі дна напруження становлять $\sigma_\theta=140$ МПа, в плоскій частині $\sigma_\theta=150\div 280$ МПа. Напруження в стінці в конічній частині складають $\sigma_\theta=-890$ МПа зменшуючись до $\sigma_\theta=-300$ МПа в нижньому торці матриці.

Розподіл осевих напружень зображений (рис. Д.2в). За цими даними в центрі та виступі напруження додатні в межах $\sigma_z=190\div 420$ МПа. Плоска частина дна сприймає невеликі розтягувальні напруження $\sigma_z=20$ МПа. В місці з'єднання стінки та дна і у фланці - $\sigma_z=-260\div 400$ МПа. В стінці напруження повністю стискаючі - $\sigma_z=-100\div 760$ МПа.

За розподілом інтенсивності (рис. Д.2г). найменші величини спостерігаються у виступі - $\sigma_i=31,3$ МПа. Найбільша інтенсивність напружень спостерігалась в зоні фланця - $\sigma_i=170\div 210$ МПа. В стінці напруження більш рівномірні - $\sigma_i=150\div 170$ МПа.

Розподіл в деформацій в осьовому напрямку та інтенсивність деформацій зображені на рис.Д.3.

Радіальні деформації (рис.Д.3а) в дні розташовані нерівномірно. В більшій частині дна майже відсутні - $\varepsilon_r=-0,013$. В зоні біля фланця деформації становлять $\varepsilon_r=0,63$, а на торці фланця менші - $\varepsilon_r=0,03\div -0,13$. Стінка також деформується, але тут є частина деформацій, які залишилися після витягування з потоншенням - $\varepsilon_r=-0,11\div 0,28$.

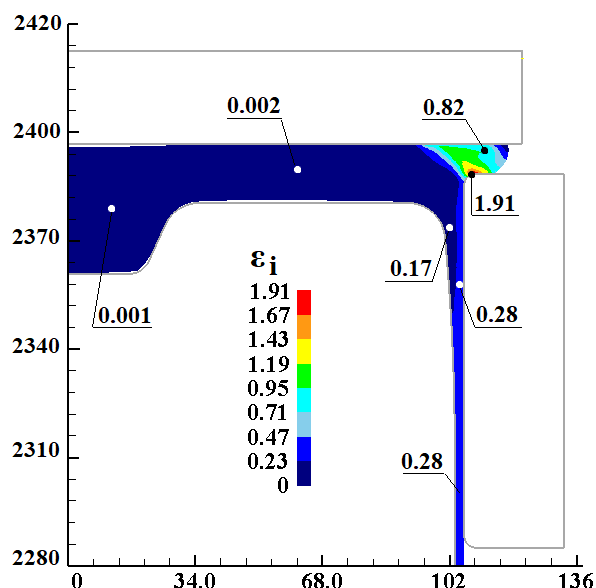


Рисунок 5.4 Розподіли інтенсивності деформацій ε_i по об'єму zdeформованого знизу напівфабрикату

За інтенсивністю деформацій (рис.5.4) можна сказати, що найкраще пропрацьований пластичною деформацією є фланець та зона біля нього - $\varepsilon_i=0,82\div 1,91$. Інтенсивність в стінці становить $\varepsilon_i=0,28$. В дні інтенсивність деформацій є низькою - до $\varepsilon_i=0,002$.

В тангенціальному напрямку (рис.Д.3б) деформації в основному зосереджені в фланці. Тут вони набувають найбільшого значення $\varepsilon_\theta = -0,11$. В дні та в прямій стінці при осадженні в цьому напрямку вони малі - $\varepsilon_\theta=-0,001\div -0,003$.

За розподілом осьових деформацій (рис. Д.3в) видно, що в дні деформації в цьому напрямку малі - $\varepsilon_z=0,001\div 0,002$. У фланці найбільші стискаючі деформації в цьому напрямку - $\varepsilon_z=-0,66$. В стінці спостерігаються розтягуювальні деформації, які залишилися від витягування з потоншенням - $\varepsilon_z=0,12\div 0,28$.

Розподіл температури по напівфабрикату в кінці деформування показаний на рис. 5.5.

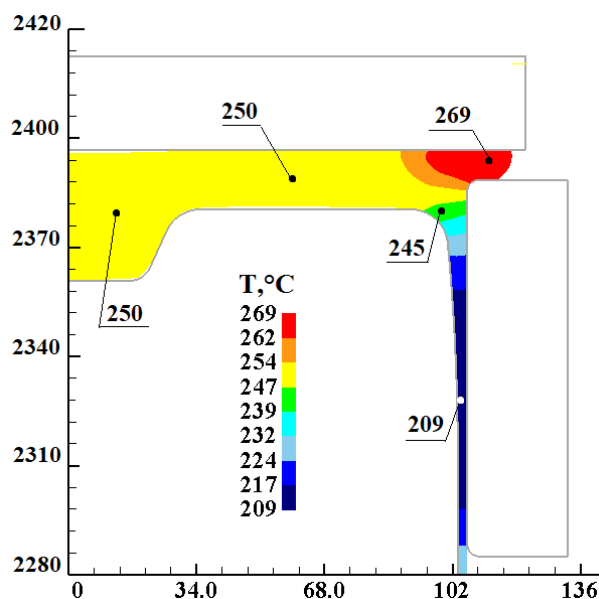


Рисунок 5.5 Розподіл температури у напівфабрикаті в кінці деформування

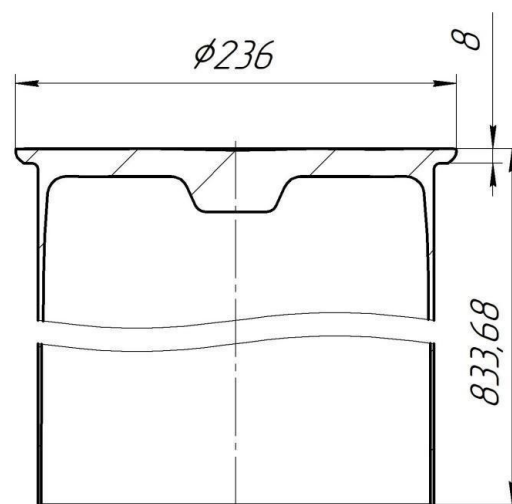


Рисунок 5.6 Кінцевий напівфабрикат після осаджування фланця

Інструмент показаний тонкими сірими лініями. Розміри по осям в міліметрах.

Дно заготовки нагрівалося до температури $T=250$ °С, інструмент підігрівався до $T=200$ °С. В дні заготовки температура залишилася така сама, як і на початку осаджування. У фланці, за рахунок деформування, температура навіть зросла до значення $T=269$ °С. Внизу по стінці температура має нижче значення - $T=209$ °С.

Кінцеві форма та розміри напівфабрикату після осаджування фланця показані на рис.5.6.

5.4 Висновки.

1. З використанням методу скінченних елементів і пластичної моделі металу проведено розрахунковий аналіз формоутворення фланцю шляхом осаджування виступу на торці донної частини в умовах напівгарячої деформації з місцевим розігрівом цієї частини. Вказаний виступ був утворений на першому переході штампування - гарячому осаджуванні. Вибрана схема деформування

дозволила додатково виконати калібрування донної частини та створити потрібну макроструктуру у здеформованому металі в місці переходу фланця в донну частину.

2. Встановлена залежність зусилля осаджування від переміщення пуансону, максимальна величина якого склала біля 3 МН. Виявлені розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях здеформованого напівфабрикату з інструментом, а також напружено-деформований стан у донній частині. Найбільші величини питомих зусиль в осередку деформації досягають 700 МПа. Пропрацювання структури металу напівгарячою деформацією оцінено по розподілу інтенсивності деформацій. Визначені кінцеві форма і розміри напівфабрикату перед останнім переходом штампування обтиском.

РОЗДІЛ 6

АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ОБТИСКУ

6.1 Схема та розрахункові схеми обтиску

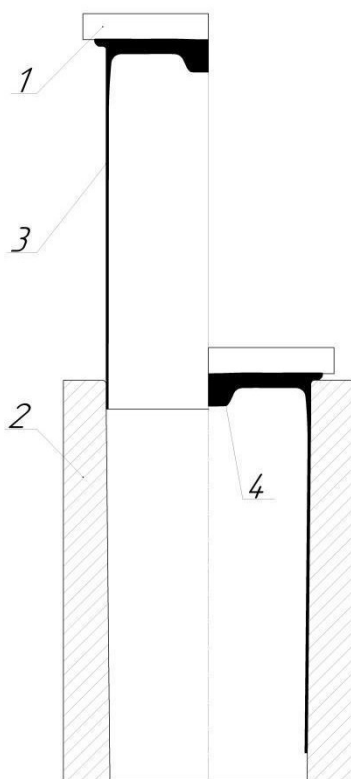


Рисунок 6.1 – Схема обтиску тонкостінного напівфабрикату

Обтиск циліндричного тонкостінного напівфабрикату в матриці, форма і розміри якої відповідають формі і розмірам виробу, дозволяє виконати необхідне формоутворення. Схему обтиску зображено на рис.6.1. Ліворуч від осі симетрії наведено положення перед обтиском, а праворуч – після обтиску. Напівфабрикат 3 встановлюється в матриці 2, зверху, впираючись в дно напівфабрикату 3, розміщений пуансон 1. При русі вниз пуансон 1 заштовхує напівфабрикат 3 в конічну матрицю 2. Стінка напівфабрикату деформується по поверхні матриці та поступово набуває конічної форми. В кінці обтиску отриманий виріб виштовхується з матриці 2.

Для обтиску було використано напівфабрикат після осаджування фланця (див. рис. 5.6) з розмірами стінки по висоті, які були отримані після третьої операції витягування з потоншенням.

Розрахунок процесу обтиску проводився в програмі DEFORM 2D з використанням методу скінченних елементів і пружно-пластичної моделі металу. Результати розрахунку наведені в додатку Е.

Розрахункові схеми представлено на рис. Е1. Розташування інструменту перед обтиском показано на рис.Е.1а. Напівфабрикат 4 розміщений з направленням по матриці 2. На донну частину напівфабрикату встановлений пуансон 1. Після початку обтиску пуансон 1 опускається донизу заштовхуючи напівфабрикат в конічну матрицю 2. При заштовхуванні в матрицю, стінка

напівфабрикату 4 прилягає до стінки матриці 2, рухаючись вздовж неї. В цей час відбувається кілька змін форми і розмірів:

- перша зміна - діаметр горловини напівфабрикату зменшується;
- друга зміна - в місцях де діаметр зменшується, стінка потовщується;
- третя зміна - напівфабрикат виростає в висоті за рахунок зменшення діаметру.

Готовий виріб 5 в матриці після обтиску показаний на рис.Е.1б. Після того, як напівфабрикат зайшов в матрицю і його фланець торкнувся торця матриці, пуансон 1 піднімається і напівфабрикат 5 виштовхується за допомогою нижнього виштовхувача 3, який піднімаючись впирається в його дно з середини (рис.Е.1в).

Для проведення моделювання були задані такі початкові умови: напівфабрикат, який отриманий витягуванням з потоншенням, з осадженим фланцем, коефіцієнт тертя контактуючих поверхонь за Кулоном $\mu=0,2$, швидкість переміщення інструменту 7 мм/сек. Задача вирішувалася з застосуванням пружно-пластичної моделі матеріалу.

6.2 Силіві режими та питомі зусилля

Зміну величини зусилля на протязі обтиску напівфабрикату показано на рис.6.2. На протязі всього процесу спостерігається рівномірне збільшення зусилля. На початку процесу з матрицею контактує тільки невелика частина напівфабрикату. Плавне зростання зусилля забезпечується в основному за рахунок відсутності в напівфабрикаті виступів, на яких зазвичай спостерігаються нерівномірні зміни зусилля. Загалом зростання зусилля настає через збільшення об'єму металу, який одночасно деформується, та площі контакту інструменту з напівфабрикатом. На початку зусилля має невеликі значення - 0,008-0,019 МН, але в процесі деформації воно поступово зростає. Максимальне зусилля спостерігається в кінці процесу - 0,486 МН. Максимальне зусилля виштовхування становить 0,22 МН.

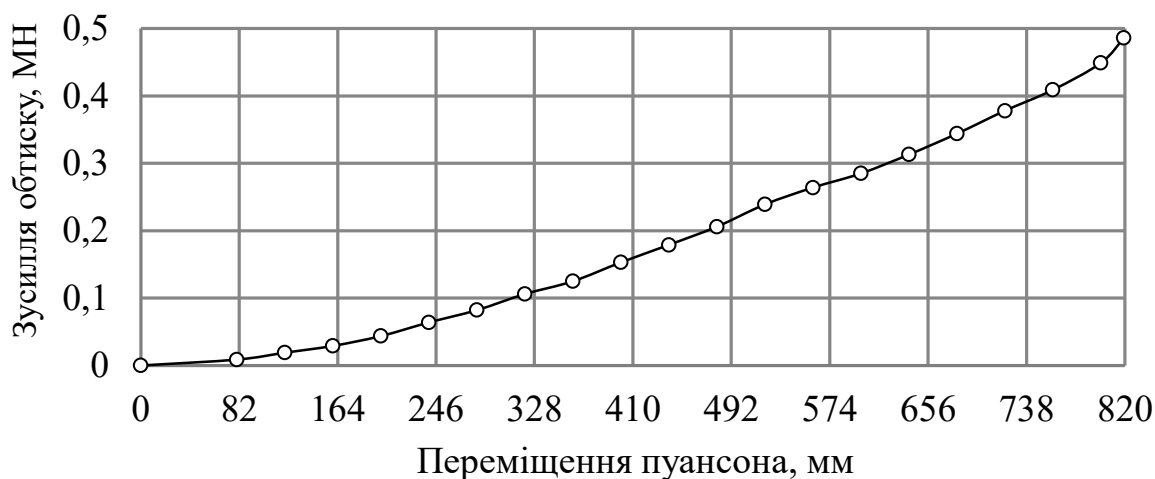


Рисунок 6.2 Залежність зусилля обтиску від переміщення пуансона

Питомі зусилля на поверхні деформуючого інструменту можна оцінити за величиною нормального зусилля показаного на рис.6.3. Використовуючи ці дані можна визначити найбільш навантажені ділянки та підібрати матеріал, який забезпечує найкращу стійкість деформуючого інструменту.

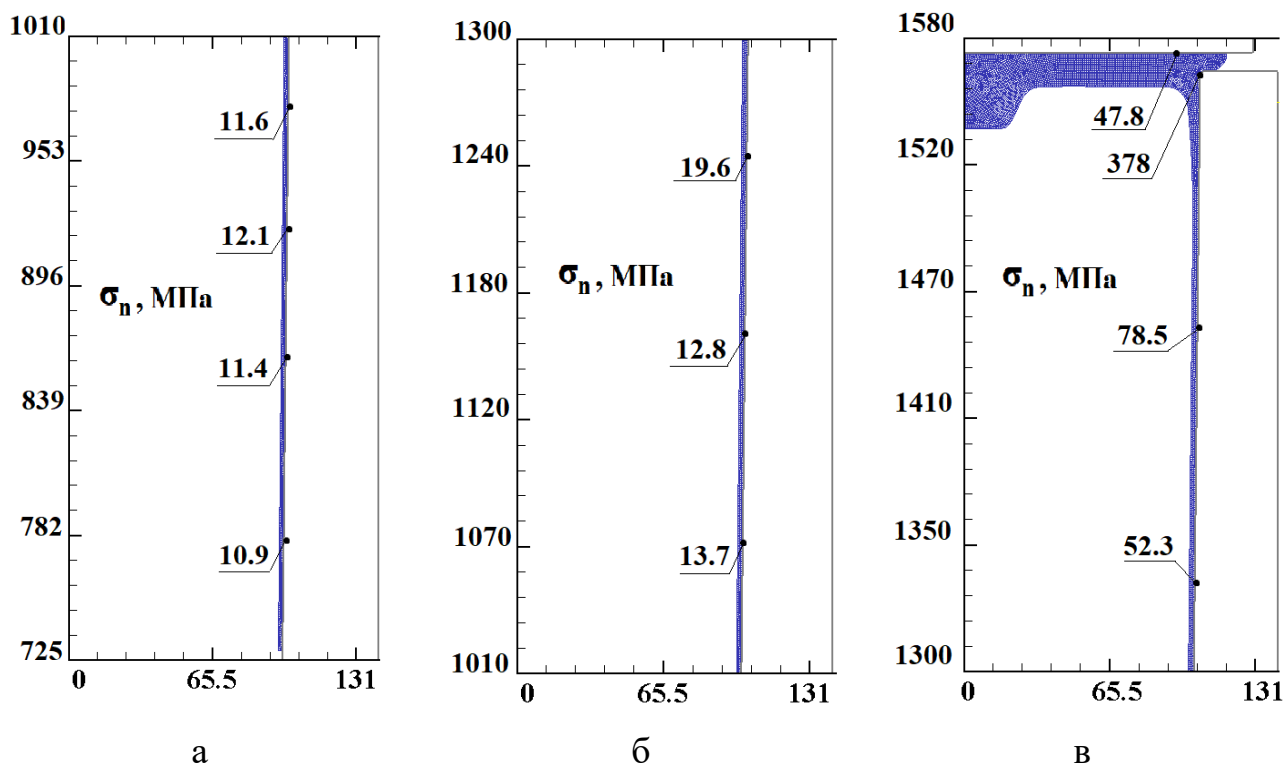


Рисунок 6.3 – Розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях заготовки з інструментом при обтиску: а - верхня частина, б - середня частина, в - нижня частина

Через велику довжину та тонку стінку напівфабрикату для зручності оцінки його було поділено на три частини. Інструмент показаний тонкими лініями.

Біля верхньої частини напівфабрикату (рис.6.3а) напруження мають наступний розподіл: біля торця - $\sigma_n=10,9$ МПа, опускаючись до низу напруження збільшуються і знаходяться в межах $\sigma_n=11,4\div 12,1$ МПа.

В середній частині (рис. 6.3 б) з матрицею контактує стінка напівфабрикату. Нормальні напруження, які знаходяться вище середини, мають величину $\sigma_n=12,8\div 13,7$ МПа, опускаючись до низу напівфабрикату вони зростають до значення $\sigma_n=19,6$ МПа. Нижня частина напівфабрикату (рис. 6.3 в) має контакт з поверхнями пуансона та матриці. З пуансоном контакт відбувається через дно напівфабрикату і біля фланця напруження становлять $\sigma_n=47,8$ МПа. В частині вище дна напруження знаходиться в межах $\sigma_n=52,3\div 78,5$ МПа. Найбільші напруження виникають на радіусній кромці матриці і радіусі біля фланця напівфабрикату - $\sigma_n=378$ МПа. Використовуючи ці дані можна підібрати матеріал інструменту.

6.3 Напружено-деформований стан при обтиску

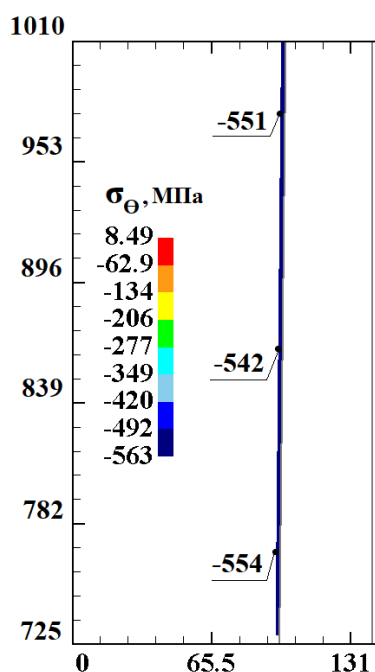


Рисунок 6.4 Розподіл тангенціальних напружень σ_θ у верхній частині

Інструмент показаний тонкими сірими лініями. Для зручності оцінки тонкостінного напівфабрикату великої довжини його поділено на 3 частини. Верхня частина напівфабрикату показана на рис. Е.2.

Результати дослідження опубліковано в статті [166].

Розподіл напружень в радіальному напрямку показаний на рис.Е.3 а. На торці напруження мають значення $\sigma_r=-2,76$ МПа. Опускаючись до низу напівфабрикату стискаючі напруження збільшуються до $\sigma_r=-7,05\div -10,7$ МПа.

В тангенціальному напрямку зверху

напівфабрикату (рис.6.4) спостерігаються повністю стискаючі напруження. На торці напруження становлять $\sigma_\theta = -554$ МПа. Нижче стінки напруження змінюються в межах $\sigma_\theta = -542 \div -551$ МПа.

Напружений стан в осьовому напрямку зображений на рис Е.2 б. На торці стінки $\sigma_z = -12,8$ МПа. Осьові напруження верхньої частини нижче змінюються в межах $\sigma_z = -53,3 \div -128$. В нижній частині напруження менші ніж зверху.

За інтенсивністю напруження у верхній частині (рис.Е.2 в) біля торця спостерігається значення $\sigma_i = 517$ МПа. Величина інтенсивності напруження зменшується до по стінці до низу - $\sigma_i = 474 \div 507$ МПа.

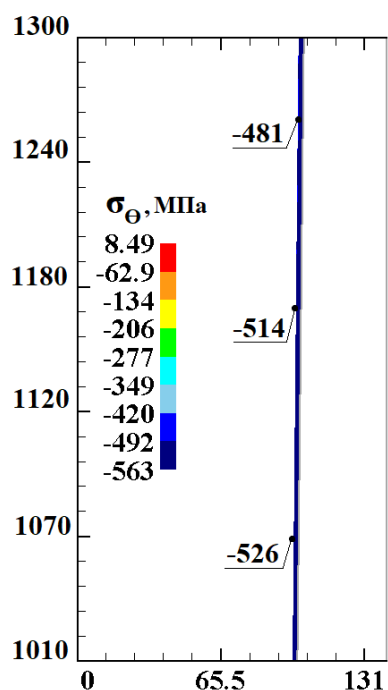


Рисунок 6.5 Розподіл тангенціальних напружень σ_θ у середній частині

Розподіл радіальних напружень в середній частині стінки показаний на рис Е.3а. Тут переважають стискаючі напруження в межах $\sigma_r = -3,89 \div -10,7$ МПа.

Тангенціальні напруження показані на рис. 6.5. Тут спостерігається зменшення напружень при опусканні до низу напівфабрикату. Максимальні напруження в цій частині становлять $\sigma_\theta = -526$ МПа. Загалом напруження змінюються в межах $\sigma_\theta = -481 \div -526$ МПа.

В осьовому напрямку (рис.Е.3б) спостерігається зворотна ситуація. Напруження починають зростати при опусканні до дна напівфабрикату. Вище напруження мають значення $\sigma_z = -157$ МПа, нижче по стінці напруження змінюються в межах $\sigma_z = -202 \div -244$ МПа.

За інтенсивністю напруження (рис.Е.3 в) спостерігаємо, що найбільші значення досягають в частині та що вище - $\sigma_i = 496$ МПа, а опускаючись до дна інтенсивність напружень починає спадати до $\sigma_i = 448 \div 469$ МПа.

Розподіл напруження в нижній частині напівфабрикату показаний на

рис.Е.4. Інструмент показаний тонкими сірими лініями. Зони напружень, значення яких не показані виносками, можна оцінити за кольоровою шкалою.

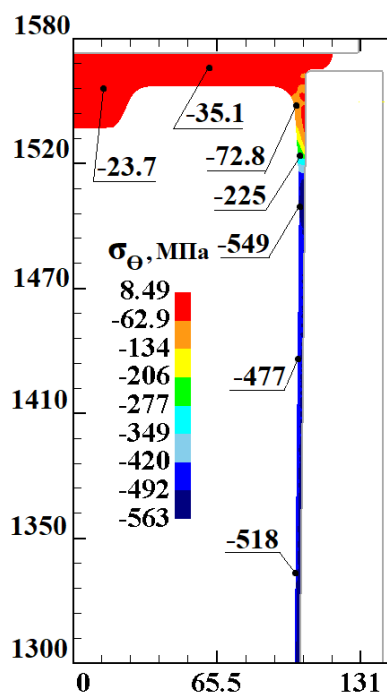


Рисунок 6.6 Розподіл тангенціальних напружень σ_{θ} у нижній частині

На рис.Е.4а показано розподіл радіальних напружень. В стінці напруження найнижчі - $\sigma_{\rho} = -1,14 \div -3,56$ МПа. В центрі у виступі спостерігають значення $\sigma_{\rho} = -4,71$ МПа. В плоскій частині дна вони змінюються в межах біля центру - $\sigma_{\rho} = -35,7$ МПа, на радіусу біля краю збільшуються до $\sigma_{\rho} = -68,7$ МПа. При переході в стінку починаються зменшуватися до $\sigma_{\rho} = -20,7$ МПа. Значення радіальних напружень у фланці незначні - $\sigma_{\rho} = -2,06$ МПа.

Тангенціальні напруження (рис.6.6) протилежні за характером розподілу до радіальних, в дні напівфабрикату вони значно менші, ніж стінці. В дні від центру до краю вони змінюються в межах $\sigma_{\theta} = -23,7 \div -72,8$ МПа. В стінці біля дна напруження зростають до $\sigma_{\theta} = -225 \div -549$ МПа. В тонкій частині стінки радіальні напруження змінюються в межах $\sigma_{\theta} = -477 \div -518$ МПа, збільшуючись в напрямку верху напівфабрикату.

За розподілом осьових напружень (рис.Е.4 б) бачимо, що в стінці вони більші ніж в дні. В тоншій частині стінки напруження становлять $\sigma_z = -242 \div -258$ МПа, більші значення вище по стінці. В частині стінки біля дна напруження змінні, біля пуансона - $\sigma_z = -378$ МПа, зі сторони матриці вони змінюються на розтягувальні - $\sigma_z = 24$ МПа. В плоскій частині дна та виступі радіальні напруження мають значення $\sigma_z = -0,19 \div -1,7$ МПа. В зоні з'єднання дна та стінки є осьові напруження зі значенням $\sigma_z = -57,7$ МПа.

З розподілу інтенсивності напруження (рис.Е.4 в) спостерігається, що найбільше напруження змінюються в стінці, в донній частині значення

інтенсивності менші. В частині стінки зверху значення становлять $\sigma_i=440$ МПа, потім опускаючись по стінці є зона, де інтенсивність зменшується до $\sigma_i=389\div 406$ МПа. В конічній частині стінки є невелика ділянка зростання інтенсивності $\sigma_i=454$ МПа. Наближаючись до дна інтенсивність зменшується. В самому дні вона становить $\sigma_i=15,6\div 86,6$ МПа. У фланці спостерігаються невеликі значення інтенсивності напружень - $\sigma_i=18$ МПа.

Розподіл деформацій в напівфабрикаті після обтиску показано на рис.Е.5, рис.Е.6 та рис.Е.7. Деформуючий інструмент показаний тонкими сірими лініями. Напівфабрикат поділений на три частини для зручності сприйняття та оцінки значень через його велику довжину та тонку стінку. Значення довжини та ширини по осях вказані в міліметрах.

Розподіл у верхній частині напівфабрикату показано на рис. Е.5

Розподіл деформацій в радіальному напрямку показаний на рис.Е.5а. Значення накопичених деформацій в радіальному напрямку зменшуються при опусканні вздовж стінки до низу. Біля торця стінки вони мають значення $\varepsilon_\rho=-0.3$, нижче по стінці значення деформацій становить $\varepsilon_\rho=-0.23\div -0.25$.

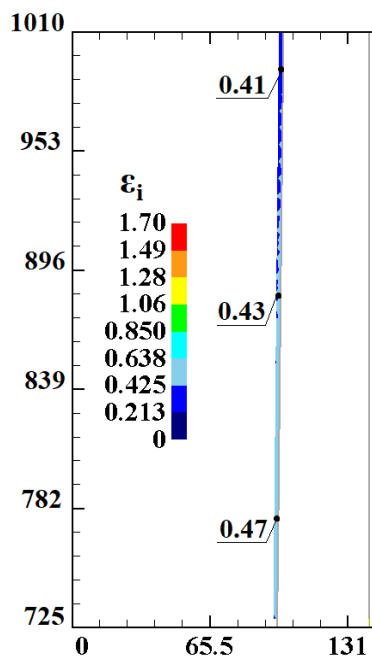


Рисунок. 6.7 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i у верхній

За інтенсивністю деформацій спостерігаємо (рис.6.7) більше пропрацювання деформаціями торця стінки напівфабрикату - $\varepsilon_i=0.47$. Віддаляючись від торця інтенсивність зменшується до значень $\varepsilon_i=0.41\div 0.43$.

Розподіл тангенціальних деформацій (рис.Е.5б) показує, що деформації в цьому напрямку малі. Біля торця значення становлять $\varepsilon_\theta=-0.9$, нижче деформації зменшуються до $\varepsilon_\theta=-0.07\div -0.09$.

Розподіл деформацій в осьовому напрямку (рис.Е.5в) характеризується додатними значеннями. На торці найбільші значення

становлять $\varepsilon_z=0.39$. В нижній частині деформації зменшуються до $\varepsilon_z=0.3\div 0.32$.

В середній частині напівфабрикату (рис.Е.6а) радіальні деформації стискаючі і змінюються в невеликих межах $\varepsilon_r=-0.22\div -0.23$.

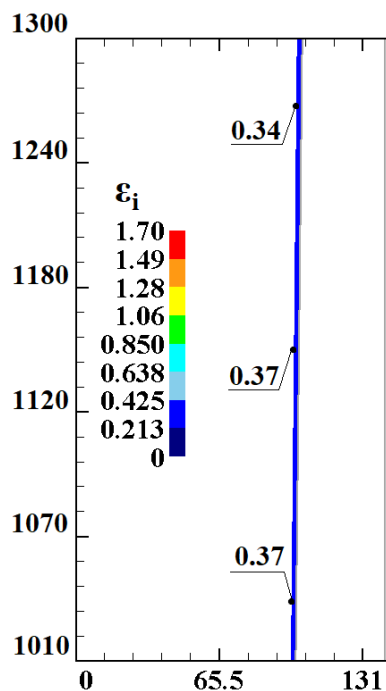


Рисунок. 6.8 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i у середній частині

Розподіл осьових напружень (рис. Е.6б) на відміну від попередніх, характеризується додатними деформаціями. Вище по стінці напівфабрикату деформації мають значення $\varepsilon_z=0.26\div 0.28$, ділянка деформацій нижче по стінці - $\varepsilon_z=0.24$.

Тангенціальний розподіл деформацій (рис.Е.6 в) характеризується двома зонами, які виділяються: перша, та що ближче до торця, - $\varepsilon_\theta=-0.05$, зона нижче має значення деформацій $\varepsilon_\theta=-0.03\div -0.04$.

За розподілом інтенсивності (рис. 6.8) деформацій спостерігаємо, що краще пропрацьовується метал на ділянці ближче до торця, деформації мають значення $\varepsilon_i=0.37$, опускаючись до низу - $\varepsilon_i=0.34$.

Розподіл деформацій в нижній частині напівфабрикату відображено на рис. Е.7.

В радіальному напрямку деформації (рис. Е.7а) розподілилися наступним чином: в стінці $\varepsilon_r=-0.21\div -0.22$, в товщій частині стінки $\varepsilon_r=-0.13$, біля фланця деформації залишилися на тому ж рівні - $\varepsilon_r=0.14\div 0.65$.

Тангенціальний розподіл (рис.Е.7 б) характеризується незначними деформаціями в стінці $\varepsilon_\theta=-0.004\div -0.025$, зменшуючись при наближенні до дна. В самому дні деформації практично відсутні $\varepsilon_\theta=-0.005\div -0.008$.

В осьовому напрямку деформації (рис. Е.7в) в стінці додатні $\varepsilon_z=0.2\div 0.29$. В фланці не змінилися і мають значення $\varepsilon_z=-0.28\div -0.68$. В самому ж дні спостерігаються малі деформації - $\varepsilon_z=0.01\div -0.08$.

За інтенсивністю деформацій (рис. 6.9) можна сказати, що найбільш інтенсивно деформувалася стінка - $\varepsilon_i = 0,3 \div 0,35$. В донній частині інтенсивність деформацій спостерігається незначна - $\varepsilon_i = 0,01 \div 0,08$. В самому фланці інтенсивність також була малою - $\varepsilon_i = 0,14$.

Форму та розміри отриманого напівфабрикату після обтиску показано на рис. 6.10. Розміри вказані в міліметрах.

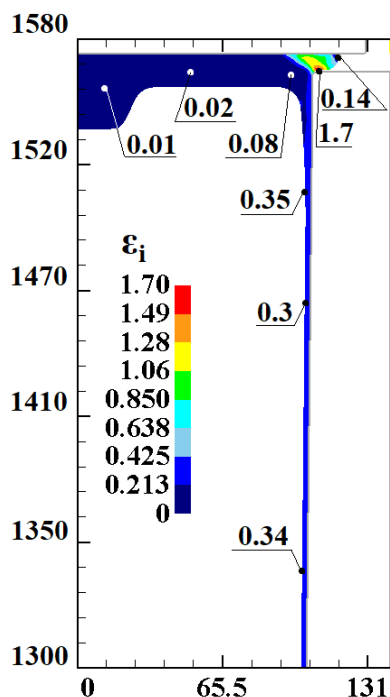


Рисунок. 6.9 Розподіл інтенсивності деформацій ε_i у нижній частині

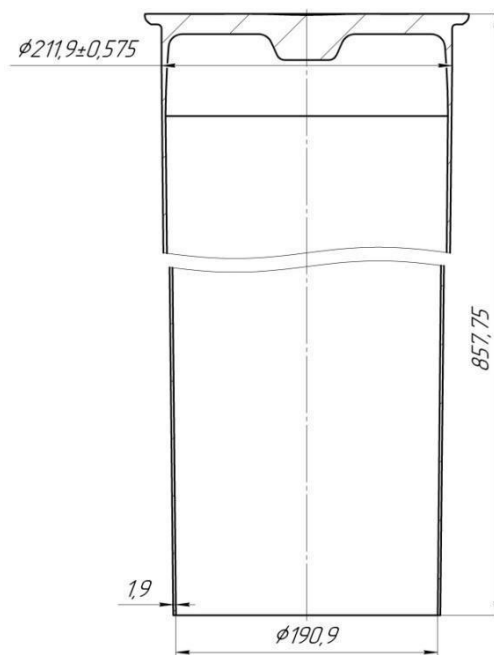


Рисунок 6.10 Кінцевий напівфабрикат після обтиску

6.4 Висновки

1. З використанням методу скінченних елементів і пружно-пластичної моделі металу проведено комп'ютерне моделювання холодного обтиску напівфабрикату, який отриманий після осаджування фланцю, з розмірами стінки по висоті, що були виготовлені після третьої операції витягування з потоншенням. При цьому були враховані деформації у стінці напівфабрикату після цієї операції та деформації після осаджування.

2. Визначено залежність зусилля обтиску від переміщення пуансона та розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях здеформованого

напівфабрикату з інструментом. Максимальна величина зусилля обтиску складає біля 0,5 МН. Для реалізації обтиску потрібне гідравлічне або кривошипне обладнання з великою відкритою висотою (не менше 1800 мм) і робочим ходом біля 840 мм. При цьому матриця не потребує бандажування.

3. Виявлено розподіли компонент напруженого стану у zdeформованому напівфабрикаті при максимальному зусиллі обтиску та розподіл кінцевих компонент деформованого стану у стінці, який дозволяє по розподілу інтенсивності деформацій прогнозувати величину напруження текучості металу по висоті стінки.

4. З урахуванням пружної деформації визначено кінцеві форму і розміри виробу зі стінкою великої довжини.

РОЗДІЛ 7

РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ

7.1 Розробка та проектування штампового оснащення для гарячого осаджування.

Конструкція штампу

Креслення загального вигляду штампа для осаджування та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.1, рис.Ж.2 та рис.Ж.3.

Штамп для осаджування складається з верхньої та нижньої частини. Пуансон 4 кріпиться до верхньої плити 1 за допомогою пуансонотримача 3. Між пуансонотримачем 3 і верхньою плитою 4 встановлена підкладна плита 5. Центрування пуансонотримача 3 на верхній плиті 4 здійснюється за допомогою восьми центрувальних втулок 7. Пуансонотримач 3 прикріплений до верхньої плити 1 за допомогою гвинтів 19. Для направлення пуансона 4 відносно нижньої плити передбачені чотири направляючі втулки 2. Конічна втулка 6 встановлена в пуансонотримачі 3 і центрує в ньому пуансон 4 для видавлювання.

На нижній плиті 8 розміщується матриця 10 в бандажі 11 з фланцем, на який встановлюється притискна пластина 12, яка центрує бандажовану матрицю і через яку матриця кріпиться до нижньої плити 8 гвинтами 18. Направляючі колонки 9 встановлені в нижній плиті 8 і утримуються притискною пластиною 12, в якій є отвори для колонок, колонки, в свою чергу, центрують притискну пластину 12 на нижній плиті 8. В центрі матриці 10 встановлений виштовхувач 17, в який вкручений шток виштовхувача 15, направлення штока в штампі здійснюється по направляючій втулці 14. Для центрування нижньої плити штампу в пресі на ній встановлено центруюче кільце 16, прикріплене до нижньої плити 8 чотирма гвинтами 17.

Принцип роботи штампу

На початку нагріту заготовку укладають в матрицю 10 на виштовхувач 17. Далі верхня плита 1 починає опускатися разом з пуансоном 4 осаджуючи заготовку. При осаджуванні на заготовці знизу починає формуватися виступ на дні та конус на циліндричній частині для центрування на наступній операції,

діаметр циліндричної частини формується по внутрішній стінці матриці. В кінці осаджування верхня плита 1 з пуансоном 4 починає підійматися, напівфабрикат 16 залишається в матриці 10. Нижній гідроциліндр через шток 15 підіймає виштовхувач 17, видаляючи напівфабрикат 16 з матриці 10.

7.2. Розробка та проектування штампового оснащення для гарячого зворотного видавлювання.

Креслення загального вигляду штампа та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.4, рис.Ж.5 та рис.Ж.6.

Верхня частина штампа складається з плити 4, до якої прикріплений пуансонотримач 6. Між пуансонотримачем 6 і верхньою плитою 2 розміщена підкладна плита 31. В середині пуансонотримача розміщений пуансон 5. Для центрування пуансона на плиті застосовуються центрувальні втулки 4. Конічна втулка 7 всередині пуансонотримача 7 забезпечує центрування пуансона 5. Направлення верхньої плити відносно нижньої здійснюють чотири пари направляючих втулок 3 та колонок 10. Направляючі втулки запресовані до верхньої плити 2. Крізь пуансонотримач проходять гвинти 35, які прикріплюють його і пуансон до верхньої плити.

При роботі штампу передбачається охолодження пуансона системою водяної магістралі. Через верхній контур вода потрапляє до пуансона, через нижній вода відводиться від пуансона. Підвід здійснюється через хрестовий з'єднувач трубок водяної магістралі 23. Проміжні трубки водяної магістралі 24 з'єднуються Т- подібними з'єднувачами 29. Вони нанизані на трубки-перехідники 22. З іншої сторони трубки-перехідники 22 затискаються в цангою 20, вставлену в конічний штуцер 19, і затиснуті гайкою 21. Штуцер вкручується в трубку-подовжувач 18, яка вкручена в пуансон 5. Для забезпечення циркуляції води всередині пуансона 5, вода потрапляє у втулку 16 і по трубці 17 потрапляє в отвір пуансона. Після заповнення всіх отворів в пуансоні вода виходить через нижню трубку-подовжувач 18 і потрапляє в водяну магістраль трубок 24 і виходить через

нижній хрестовий з'єднувач. Вода рівномірно розподіляється по всьому пуансону в восьми отворах, які зверху закриті конічними пробками 15.

Нижня водяна магістраль для охолодження матриці подібна до верхньої. Підвід здійснюється через верхній хрестовий з'єднувач трубок водяної магістралі 23. Проміжні трубки водяної магістралі 30 з'єднуються Т-подібними з'єднувачами 29, які нанизані на трубки-перехідники 22. З іншої сторони трубки-перехідники 22 затискаються цангами 20, які вставлені в конічні штуцери 19 і затягнуті гайками 21. Штуцер вкручується в трубку-подовжувач 18, яка вкручена в матрицю 1. Для забезпечення циркуляції води всередині матриці, вода потрапляє в втулку 26 і по трубці 27 потрапляє в вісім отворів матриці. Після заповнення отворів в матриці вода виходить через нижню трубку-подовжувач 28 і потрапляє в водяну магістраль трубок 30 і виходить через нижній хрестовий з'єднувач 23. Вода рівномірно розподіляється по всім восьми отворах матриці, які зверху закриті конічними пробками 25.

Нижня плита складається з матриці 1, яка знаходиться в бандажі. На бандажі передбачений фланець для закріплення матриці на нижній плиті 8 притисочною плитою 9 за допомогою гвинтів 34. Направляючі колонки 10 встановлені в нижній плиті 8 проходять через притисочну пластину 9 і центрують притисочну пластину на нижній плиті. Всередині матриці встановлений виштовхувач 11, який знаходиться на нижній плиті 8. В виштовхувач 11 вкручений шток виштовхувача 12, який рухається по направляючій втулці 13. Для центрування нижньої частини штампу в пресі, знизу нижньої плити 8 прикріплено гвинтами 33 центруюче кільце 14.

Принцип роботи штамп

Нагріта заготовка після осаджування укладається в матрицю 1 на виштовхувач 11. Під час руху донизу верхньої плити 2 пуансон 5 вдавлюється в заготовку і метал видавлюється в зазор між пуансоном 5 та матрицею 1. В кінці видавлювання пуансон 5 разом з верхньою плитою 2 підіймається вгору, напівфабрикат 32 залишається в матриці 1. При підйомі виштовхувача 11 напівфабрикат 32 видаляється з матриці 1.

7.3. Розробка та проектування штампового оснащення для витягування з потоншенням

Штамп витяжний, перший перехід

Креслення загального вигляду штамп та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.7, рис.Ж.8 та рис.Ж.9.

Верхня частину штампів складається з верхньої плити 3, до якої прикріплений за допомогою пуансонотримача 8 пуансон 7, який впирається в підкладну плиту 6. Конусна втулка 5 здійснює центрування пуансона 7 в пуансонотримачі 8, а центрування пуансонотримача 8 на верхній плиті 3 здійснюється за допомогою восьми центрувальних втулок 10. Пуансонотримач 8 кріпиться до верхньої плити 3 за допомогою восьми гвинтів 30. Чотири колонки 4 допомагають направляти пуансон 7 відносно нижньої частини штампів. Колонки 4, через їх велику довжину, додатково закріплені тримачами колонок 9 з чотирма гвинтами 28 на кожну.

Нижня частина штампів складається з трьох плит. На першій нижній плиті 11 розташовується бандажована матриця 1, яка закріплена за допомогою притискного кільця 14 і вісьмома гвинтами 29. Зверху в бандажі встановлена направляюча втулка 13. На плиті також встановлені чотири направляючі втулки 12 для колонок 4.

Друга бандажована матриця 2 встановлюється в заточку на другій нижній плиті 15. Матриця прижимається притискним кільцем 19 та вісьмома гвинтами 29. На плиті також є чотири короткі направляючі втулки 16. Для додаткової жорсткості штампів, між першою нижньою плитою 11 та середньою нижньою плитою 15 встановлена втулка упорна центральна 17.

На третій нижній плиті 20 по центру встановлена упорна центрувальна втулка 21. На ній розміщується пружинний знімач. Пружинний знімач складається з корпусу 24, в якому розміщені чотири кулачки-знімачі 25. Кулачки рухаються в пазах корпусу 24 та по гвинтам 31, які вкручені в корпус знімача 24. Для притискання кулачків на гвинтах є шайби 33 і пружини 27.

Вся нижня частина штампу стягнута вісьмома шпильками 23 з гайками 29 і шайбами 28. Шпильки проходять через всі плити нижньої частини та крізь дистанційні втулки. Між плитами 11 та 15 розташовані дистанційні втулки 18, між плитами 15 та 20 розташовані дистанційні втулки 22.

Принцип роботи штампу

Заготовка закладається в направляючу втулку 13 та при ході пуансона 7 донизу притискається зверху. Колонки 4 при цьому заходять у втулки 12 ще до початку витягування з потоншенням. Під час руху верхньої плити 3 пуансон 7 починає переміщуватися і проштовхувати заготовку через матрицю 1. При проходженні через матрицю 1 стінка заготовки потоншується між матрицею 2 і пуансоном 7. Далі крізь матрицю заготовка проходить через отвір в плиті 11 і упорну центральну втулку 17. Після чого попадає в матрицю 2, при проходженні через яку стінка заготовки ще більше потоншується. Витягнута заготовка проходить через кулачки знімача 25, які розсуваються, пропускаючи напівфабрикат 26. Після того як напівфабрикат пройшов через отвір, під дією пружини 27 кулачки знімача зсуваються назад. При русі верхньої плити 3 з пуансоном 7 вгору кулачки знімача 25 впираються в торець напівфабрикату 26, знімаючи його з пуансона 8.

Штамп для витягування з потоншенням, другий перехід

Креслення загального вигляду штампа та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.10 та рис.Ж.11.

Штамп для витягування з потоншенням напівфабрикату 18 складається з верхньої та нижньої частин.

Пуансон 1 кріпиться до верхньої плити за допомогою пуансонотримача 4. Пуансонотримач встановлюється в заточку верхньої плити 9 і закріплюється гвинтами 17. Всередині пуансонотримача встановлене упорне кільце 7 в яке встановлюється пуансон 1 своєю конічною частиною. Упорне кільце утримується всередині пуансонотримача 4 за допомогою гайки 8, при закручуванні якої упорна втулка 7 находити на пуансон 1, закріплюючи його. Сферична основа витяжного

пуансона 1 впирається в сферичну заглибину п'яти 6, яка в свою чергу вперта в підп'ятник 5. Це дає змогу розподілити зусилля від пуансона на більшу площу та дати змогу пуансону самоцентруватися. Підп'ятник 5 центрується в пуансонотримачі 4 і впирається в верхню плиту 9 при затисканні гайкою 8.

На нижній плиті 12 штампу в заточці розташовується бандажована матриця, яка складається з бандажу 3 та матриці 2. Для утримання бандажованої матриці використовується притискне кільце 10, яке закріплене шістьма гвинтами 16. Для направлення заготовки при витягуванні зверху в заточці бандажу встановлено направляюче кільце 11. Для знімання заготовки з пуансона після витягування знизу нижньої плити в рівень з її поверхнею встановлені чотири пружинні знімачі, які закріплені гвинтами 15. Знімачі складаються з корпусу 13, повзунка знімача 14 та пружини 17.

Робота штампу для витягування з потоншенням

Попередньо витягнута заготовка після першого переходу поміщається до штампу для витягування з потоншенням в направляюче кільце 11 та під час ходу притискається пуансоном 1 зсередини. Під час витягування верхня плита 9 опускається разом з пуансоном 1 та проштовхує заготовку крізь матрицю 2, потоншуючи її стінку між матрицею 2 та пуансоном 1. Після виходу з матриці 2 напівфабрикат 18 проходить через отвір в нижній плиті 12, пружинні знімачі розходяться, пропускаючи його, і напівфабрикат 18 виходить в отвір в плиті пресу. Після того як напівфабрикат 18 повністю пройшов нижче рівня кулачків знімачів 14, які під дією пружини 17 притискаються до пуансона 1 і при ході пуансона 1 вгору зачіплюються за торець стінки напівфабрикату 18 і знімають його з пуансона 1.

Штамп для витягування з потоншенням, третій перехід

Креслення загального вигляду штампа та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.12 та рис.Ж.13.

Штамп для витягування з потоншенням напівфабрикату 18 складається з верхньої та нижньої частин.

Пуансон 1 кріпиться до верхньої плити за допомогою пуансонотримача 4. Пуансонотримач встановлюється в заточку в верхній плиті 9 і закріплюється гвинтами 17. Всередині пуансонотримача встановлене упорне кільце 7, в яке встановлюється пуансон 1 своєю конічною частиною. Упорне кільце утримується всередині пуансонотримача 4 за допомогою гайки 8, при закручуванні якої упорна втулка 7 знаходить на пуансон 1, закріплюючи його. Сферична основа витяжного пуансона 1 впирається в сферичну заглибину п'яти 6, яка в свою чергу вперта в підп'ятник 5. Це дає змогу розподілити зусилля від пуансона на більшу площу та можливість пуансону самоцентруватися. Підп'ятник 5 центрується в пуансонотримачі 4 і впирається в верхню плиту 9 при затисканні гайкою 8.

На нижній плиті 12 штампа в заточці розташовується бандажована матриця, яка складається з бандажу 3 та матриці 2. Для утримання бандажованої матриці використовується притискне кільце 10, яке закріплене шістьма гвинтами 16. Для направлення заготовки при витягуванні зверху в заточці бандажу встановлено направляюче кільце 11. Для знімання заготовки з пуансона після витягування знизу нижньої плити в рівень з її поверхнею встановлені чотири пружинні знімачі, які закріплені гвинтами 15. Знімачі складаються з корпусу 13, повзунка знімача 14 та пружини 17.

Робота штампу для витягування з потоншенням

Попередньо витягнута заготовка після другого переходу поміщається до штампу для витягування з потоншенням в направляюче кільце 11 та під час ходу притискається пуансоном 1 зсередини. Під час витягування верхня плита 9 опускається разом з пуансоном 1 та проштовхує заготовку крізь матрицю 2, потоншуючи її стінку між матрицею 2 та пуансоном 1. Після виходу з матриці 2 напівфабрикат 18 проходить через отвір в нижній плиті 12, пружинні знімачі розходяться, пропускаючи його, і напівфабрикат 18 виходить в отвір в плиті пресу. Після того як напівфабрикат 18 повністю пройшов нижче рівня кулачків знімачів 14, які під дією пружини 17 притискаються до пуансона 1 і при ході пуансона 1 вгору зачіплюються за торець стінки напівфабрикату 18 і знімають його з пуансона 1.

7.4. Розробка та проектування штампового оснащення для вирівнювання донної частини

Креслення загального вигляду штампа та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.14 та рис.Ж.15.

Штамп для вирівнювання дна складається з двох частин. Верхня частина штампу має верхню плиту 5, на якій встановлений пуансон 8 на підкладній плиті 7, яка впирається в верхню плиту. Пуансон закріплений шістьма гвинтами 13. Центрування пуансона на плиті здійснюється направляючими втулками, які одночасно проходять через отвори в підкладній плиті 7 і верхній плиті 5.

Нижня частина штампу складається з нижньої плити 7, на якій у виточці встановлена матриця для обтиску 3, прикріплена притискним кільцем 2. Притискне кільце 2 кріпиться шістьма гвинтами 13, які вкручуються в нижню плиту 7. Для виштовхування готового напівфабрикату 4 в штампі в нижній плиті вставлено виштовхувач 1. Направлення та підтримка виштовхувача 1 здійснюється по направляючій втулці 5, яка встановлена під матрицею 3 у виточці в рівень з поверхнею плити 7, і закріплена чотирма гвинтами 11.

Принцип роботи штампу

Напівфабрикат після першого витягування з потоншенням закладається до матриці 4. Центрування здійснюється по внутрішній циліндричній частині матриці 4 і зовнішній поверхні стінки напівфабрикату. Верхня плита 6 з пуансоном 9 опускається, притискаючи дно напівфабрикату і заштовхуючи його в матрицю 3. Завдяки конічному профілю матриці стінка напівфабрикату центрується під час вирівнювання дна, прилягаючи до поверхні виштовхувача. Процес закінчується при проходженні 36.4 мм. Пуансон 9 після вирівнювання дна підіймається вгору так, щоб готовий напівфабрикат можна було витягнути зі штампу. Після чого виштовхувач 1 підіймається завдяки нижньому гідроциліндру преса, видаляючи напівфабрикат 5 з матриці 4. Заготовка може вийматися вручну або краном.

7.5. Розробка та проектування штампового оснащення для осадження фланця

Креслення загального вигляду штампа та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.16 та рис.Ж.17.

Штамп для осадження фланця складається з 2 частин. Верхня частина штампу має верхню плиту 1, до якої прикріплений пуансон 4, закріплений шістьма гвинтами 11.

Нижня частина штампу складається з нижньої плити 2, на якій у виточці встановлена оправка 6. На нижній плиті зверху встановлена підставка для матриці 3, яка закріплена тримачем 7. Тримач 7 кріпиться шістьма гвинтами 13, які вкручені в нижню плиту 2. Матриця 5 встановлена на підставці для матриці 6 та зцентрована по виточці. До підставки матриця прикріплена шістьма гвинтами 12. Для видалення готового напівфабрикату 9 в штампі передбачений виштовхувач 8. На матриці зверху запресовані два дистанційні грибки 10

Принцип роботи штампу

Напівфабрикат після третього переходу витягування з потоншенням закладається до матриці 5 дульцем донизу. Центрування здійснюється по внутрішній циліндричній частині матриці 5 і зовнішній поверхні стінки напівфабрикату. Після чого верхня плита 1 з пуансоном 4 опускається і впирається в виступ на дні напівфабрикату, при переміщенні пуансона вниз виступ трохи осаджується і відгинається вбік. Осаджування закінчується при досягненні пуансоном дистанційних грибків 10. Далі верхня плита 1 підіймається так, щоб готовий напівфабрикат міг бути витягнутий зі штампу. Для видалення напівфабрикату виштовхувач 8 підіймається за допомогою нижнього гідроциліндра преса, впираючись в дно напівфабрикату 9 зсередини і виштовхуючи його з матриці 5 до повного видалення. Заготовка виймається вручну або краном за допомогою обмотаного хомути навколо деталі.

7.6. Розробка та проектування штампового оснащення для обтиску

Креслення загального вигляду штамп та специфікація до креслення приведені на рис.Ж.18 та рис.Ж.19.

Штамп для обтиску складається з 2 частин. Верхня частина штамп має верхню плиту 6, на якій у виточці встановлений пуансон 8, закріплений шістьма гвинтами 9.

Нижня частина штамп складається з нижньої плити 7, на якій у виточці встановлена матриця для обтиску 3, прикріплена притискним кільцем 2. Притискне кільце 2 кріпиться шістьма гвинтами 13, які вкручуються в нижню плиту 7. Для виштовхування готового напівфабрикату 4 в нижній плиті штамп вставлено виштовхувач 1. Направлення та підтримка виштовхувача 1 здійснюється по направляючій втулці 5, яка встановлена під матрицею 3 у виточці в рівень з поверхнею плити 7, і закріплена чотирма гвинтами 11.

Принцип роботи штамп

Напівфабрикат після осаджування фланця закладається в матрицю 3 дульцем донизу. Центрування здійснюється по внутрішній циліндричній частині матриці 3 і зовнішній поверхні стінки напівфабрикату. Після чого верхня плита 6 з пуансоном 8 опускається і впирається в дно напівфабрикату, заштовхуючи його в матрицю 3. Завдяки конічному профілю матриці, стінка напівфабрикату під час обтиску набуває форми конічної форми та трохи потовщується. Обтиск закінчується при досягненні фланцем напівфабрикату верхнього торця матриці 3. Далі верхня плита 6 підіймається так, щоб готовий напівфабрикат міг бути витягнутий з штамп. В цей час виштовхувач 1 підіймається за допомогою нижнього гідроциліндра преса, впираючись в дно напівфабрикату 4 зсередини і виштовхуючи його з матриці 3 до повного видалення. Заготовка виймається вручну або краном.

7.7. Висновки

1. На основі результатів комп'ютерного моделювання переходів штампування з отриманням виробу великої довжини зі змінною товщиною стінки

по висоті розроблено та спроектовано конструкції штампового оснащення для кожного переходу штампування.

2. Розроблено та спроектовано загальний вигляд штампу для процесу гарячого осаджування циліндричної заготовки з отриманням напівфабрикату з круговим виступом на торці донної частини під подальше формоутворення фланцю.

3. Розроблено та спроектовано загальний вигляд штампу для процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату з виступом на торці донної частини зі сторони порожнини під подальші операції витягування з потоншенням.

4. Для трьох операцій холодного витягування з потоншенням розроблено та спроектовано загальні вигляди штампів. При цьому, для першої операції штамп містить дві послідовно розташовані матриці, а отриманий напівфабрикат має викривлення донної частини. Для вирівнювання цієї частини розроблено конструкцію штампу для гарячого формоутворення з отриманням напівфабрикату для третьої операції витягування з потоншенням.

5. Розроблено та спроектовано загальний вигляд штампу для процесу напівгарячого осаджування виступу на торці донної частини з отриманням напівфабрикату з циліндричним фланцем на зовнішній поверхні.

6. Розроблено та спроектовано загальний вигляд штампу для процесу холодного обтиску з отриманням виробу великої довжини і стінкою змінної товщини по висоті.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі поставлена та вирішена актуальна науково-практична задача, яка полягає в розробленні інноваційної технології і конструкцій штампового оснащення для виготовлення пластичним формоутворенням із латуні порожнистих виробів великої довжини зі стінкою змінної товщини по висоті. Технологія дозволяє підвищити продуктивність виготовлення за рахунок зменшення кількості переходів штампування та знизити витрати металу завдяки підвищенню точності форми і розмірів виробів.

1. Проведено аналіз літературних джерел по існуючих технологіях пластичного формоутворення виробів зі змінною товщиною стінки. Технології включають в себе операції гарячого осаджування і подальшого зворотного видавлювання порожнистих напівфабрикатів, витягування з потоншенням та кінцеву операцію обтиску.

Для зменшення зусилля зворотного видавлювання для отримання порожнистих напівфабрикатів заготовок використовують видавлювання в рухомій матриці. Практично відсутня інформація по використанню такого видавлювання для отримання із латуні порожнистих напівфабрикатів великого діаметру.

Для збільшення продуктивності витягування з потоншенням застосовують витягування через декілька послідовно розташованих матриць та інструмент спеціального профілю, який дозволяє створювати додаткове тягнуче зусилля за стінку заготовки, розвантажити донну частину та зменшити кількість переходів витягування. В існуючих джерелах немає даних по здійсненню витягування із латуні пуансоном спеціального профілю порожнистих напівфабрикатів великого діаметру зі значною довжиною.

При виробництві гільз для отримання кінчної форми застосовують операцію обтиску. Зменшення зусилля обтиску та збільшення коефіцієнту обтиску досягається завдяки використанню деформуючого інструменту спеціального профілю. В існуючих джерелах також немає даних по здійсненню

обтиску із латуні в матриці спеціального профілю порожнистих напівфабрикатів великого діаметру зі значною довжиною.

На основі аналізу літературних джерел поставлені задачі досліджень в дисертаційній роботі.

2. Проведено аналіз параметрів, які впливають на процеси пластичного формоутворення. Наведено методику аналізу вісесиметричного пластичного формоутворення з використанням методу спільного розв'язку наближених рівнянь рівноваги та викладені основні залежності методу скінчених елементів. Запропонована методика проведення експериментальних досліджень для отримання виробу необхідної форми із заданими механічними властивостями. Наведено результати моделювання методом скінчених елементів процесу гарячого формоутворення виробу з потрібним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією. Представлені результати експериментальних досліджень, які підтвердили дані комп'ютерного моделювання.

3. З використанням методу скінчених елементів було створено математичні моделі та проведено моделювання гарячого осаджування та видавлювання. Встановлено швидкості деформування для забезпечення температурного інтервалу штампування, температурний розподіл, питомі зусилля та зусилля деформування, напружено деформований стан, форма та розміри кінцевих напівфабрикатів.

4. Із застосуванням методу скінчених елементів було створено математичні моделі та проведено моделювання переходів холодного витягування з потоншенням, які складаються з трьох операцій. Для скорочення кількості операцій витягування використано пуансон спеціального профілю, деформуюча поверхня якого складається із виступів і впадин.

На першій операції витягування відбувається деформування через дві послідовно розташовані конусні матриці. Встановлено особливості формозміни металу, яка приводить до викривлення донної частини. Визначено силові режими, питомі зусилля на інструменті та напружено деформований стан металу.

Виявлено форму та розміри напівфабрикату. Після першої операції витягування запропоновано виконати калібрування донної частини.

Аналогічні дані отримано для другої і третьої операції витягування, які здійснюються в одній матриці. На третій операції витягування визначено форму та розміри напівфабрикату із деформованим станом, який забезпечує потрібну межу текучості здеформованого металу після виконання подальшого переходу обтиску.

5. З використанням методу балансу потужностей і методу спільного вирішення наближених диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності* вперше проведений аналіз витягування з потоншенням з прикладанням тягнучого зусилля за стінку заготовки, що виникає при застосуванні пуансону спеціального профілю. Отримано аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля деформування з урахуванням дії сил тертя та зміцнення металу при холодному формоутворенні.

6. З використанням методу скінченних елементів проведено розрахунковий аналіз осаджування фланцю на боковій поверхні напівфабрикату в умовах напівгарячої деформації з місцевим розігрівом цієї частини. Встановлено залежність зусилля осаджування від переміщення пуансону, питомі зусилля на інструменті, напружено-деформований стан в осередку деформації у донній частині. При цьому створено потрібну макроструктуру металу в місці переходу фланцю у донну частину.

7. З використанням методу скінченних елементів і пружно-пластичної моделі металу проведено комп'ютерне моделювання холодного обтиску в матриці спеціального профілю. Моделювання виконано для напівфабрикату, що отриманий після осаджування фланцю, із розмірами стінки і деформованим станом металу після третьої операції витягування з потоншенням.

Визначено залежність зусилля обтиску від переміщення пуансону, напружено деформований стан металу. З урахування пружної деформації виявлено кінцеву форму та розміри виробу.

8. На основі результатів комп'ютерного моделювання переходів штампування розроблено та спроектовано конструкції штампового оснащення для реалізації кожного переходу.

9. Результати роботи використані на виробництві в корпорації «ТАСКО» м. Київ та застосовуються у навчальному процесі на кафедрі технології виробництва літальних апаратів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Van der Aa, H. C. E., van der Aa, M. A. H., Schreurs, P. J. G., Baaijens, F. P. T., & van Veenen, W. J. (2000). An experimental and numerical study of the wall ironing process of polymer coated sheet metal. *Mechanics of Materials*, 32(7), 423–443. doi:10.1016/s0167-6636(00)00013-2
2. Ragab, M. S., & Orban, H. Z. (2000). Effect of ironing on the residual stresses in deep drawn cups. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1-3), 54–61. doi:10.1016/s0924-0136(99)00360-x
3. Danckert, J. (2001). Ironing of thin walled cans. *CIRP Annals*, 50(1), 165–168. doi:10.1016/s0007-8506(07)62096-4
4. Wang, Z., Dohda, K., & Jeong, Y. (2001). FEM simulation of surface smoothing in the ironing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 705–709. doi:10.1016/s0924-0136(01)00615-x
5. Moshksar, M. M., & Kalvarzi, A. H. (2001). IRONING OF ALUMINUM CUPS. *Materials and Manufacturing Processes*, 16(4), 461–470. doi:10.1081/amp-100108520
6. Kampuš, Z., & Nardin, B. (2002). Improving workability in ironing. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 64–68. doi:10.1016/s0924-0136(02)00783-5
7. Courbon, J. (2003). Damage evolution in a compressive forming process: ironing of beverage cans. *Scripta Materialia*, 48(11), 1519–1524. doi:10.1016/s1359-6462(03)00131-3
8. Fereshteh-Saniee, F., & Montazeran, M. H. (2003). A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 555–561. doi:10.1016/s0924-0136(03)00793-3
9. Colgan, M., & Monaghan, J. (2003). Deep drawing process: analysis and experiment. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3), 35–41. doi:10.1016/s0924-0136(02)00253-4
10. Behrens, B.-A., Pösse, O., Milch, M., & Helms, G. (2007). Optimization of ironing processes by means of DOE and FEA. *Production Engineering*, 1(1), 3–8. doi:10.1007/s11740-007-0023-y

11. Crina AXINTE, Monica IORDACHE, Determination of residual stresses distribution within the formed part annals of the ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008
12. Karabegović*, E. Husak** Mathematical modeling of deep drawing force with double reduction of wall thickness ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2008. Nr.2(70)
13. Rubio, E. M., Camacho, A. M., Marcos, M., & Sebastián, M. A. (2008). Analysis of the Energy Vanished by Friction in Tube Drawing Processes with a Fixed Conical Inner Plug by the Upper Bound Method. Materials and Manufacturing Processes, 23(7), 690–697. doi:10.1080/10426910802317060
14. Gheorghe Brabie, Nicolae Nanu, Mioara E.Radu (2009) The influence of the punch shape on the residual stresses distribution and springback in the case of conical drawn parts. the annals of “dunărea de jos” university of galați fascicle v, technologies in machine building, ISSN 1221- 4566, 2009
15. Е.Ю. Поликарпов, Технологические режимы операции вытяжки с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов Известия Тульского государственного университета. Технические науки.2009
16. А. М. Попов, Г. А. Данилин Влияние условий штамповки на величину разностенности при вытяжке с утонением через две матрицы. Металлообработка. 2009
17. Dragan Adamovic, Vesna Mandic An experimental modelling and numerical fe analysis of steel-strip ironing process. Tehnički vjesnik, Vol. 17 No. 4, 2010.
18. В.И. Платонов, Е.Ю. Поликарпов, С.С. Яковлев Осесимметричная вытяжка с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010.
19. Н.Д Тутышкин, Ха Хонг Куанг Конечно-элементное моделирование процесса вытяжки с утонением стенки с учетом деформационной повреждаемости полуфабриката. 2010
20. К.С. Ремнев, Фам Дык Тхиен Вытяжка с утонением стенки анизотропного упрочняющегося материала. 2011

21. Г. А. Данилин, Е. С. Воронина, А. М. Попов Рациональное построение процесса комбинированной вытяжки при изготовлении полых деталей. Металлообработка 2011
22. Ха Хонг Куанг Моделирование процесса вытяжки с утонением цилиндрических осесимметричных деталей. Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2011. Вып. 1. С. 145-155
23. Ха Хонг Куанг Методики определения коэффициентов повреждаемости материалов в процессе вытяжки с утонением. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2
24. Ю.Г. Нечепуренко, Ожидаемые механические свойства цилиндрических деталей на первой операции комбинированной вытяжки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2
25. С.С. Яковлев, Фам Дык Тхиен, К.С. Ремнев Математическая модель последующей операции комбинированной вытяжки анизотропного упрочняющегося материала. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2
26. С.С. Яковлев, Фам Дык Тхиен, К.С. Ремнев Математическая модель первой операции комбинированной вытяжки анизотропного материала в конической матрице. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2
27. Ю.Г. Нечепуренко Ожидаемые механические свойства цилиндрических деталей на первой операции комбинированной вытяжки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2. стр. 323-327.
28. I. Karabegović, E. Hadžalić Mathematic modelling and the deep drawing force simulation with the wall thickness thinning experiment application 2012
29. С.С. Яковлев, А.Н. Исаева, О.В. Пилипенко Силовые режимы вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 5
30. С.С. Яковлев, В.И. Платонов, А.В. Черняев Математическая модель вытяжки с утонением анизотропных материалов в клиновом канале в режиме кратковременной ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 9

31. А.Н. Исаева, С.С. Яковлев Подход к анализу процесса деформирования полых осесимметричных толстостенных заготовок из анизотропных материалов в коническом канале. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 6 стр. 45-50.
32. С.С. Яковлев, Фам Дык Тхиен, Ю.Г. Нечепуренко, В.А. Коротков Интенсификация технологических процессов изготовления полых цилиндрических деталей. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 8 стр. 79-85
33. В.И. Платонов, С.С. Яковлев, М.В. Ларина Влияние технологических параметров на предельные возможности вытяжки с утонением анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 9. стр. 40-47
34. В.И. Платонов, С.С. Яковлев, А.В. Черняев Предельные возможности вытяжки с утонением стенки анизотропного материала в режиме ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 2. стр. 171-179
35. С.С. Яковлев, Фам Дык Тхиен, В.И. Платонов, Ю.Г. Нечепуренко Экспериментальные исследования первой операции комбинированной вытяжки Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 1, стр. 217-225
36. Г. М. Журавлев, Чан Дык Хоан Расчет повреждаемости на вытяжных операциях Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 2 стр. 227-235.
37. Патент 2010 СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ГИЛЬЗ ПАТРОНОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ
38. Gau, J.-T., Teegala, S., Huang, K.-M., Hsiao, T.-J., & Lin, B.-T. (2013). Using micro deep drawing with ironing stages to form stainless steel 304 micro cups. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(2), 298–305. doi:10.1016/j.jmapro.2013.01.009
39. Palengat, M., Chagnon, G., Favier, D., Louche, H., Linardon, C., & Plaideau, C. (2013). Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: Experiments and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 70, 69–78. doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.02.003
40. Алиева Л.И., Мартынов С.В. Исследование влияния разностенности штампуемых способом вытяжки с утонением деталей на неравномерность

распределения твердости свойств в поперечных сечениях. Известия МГТУ «МАМИ» № 2(16), 2013, т. 2 стр. 13-17

41. М.В. Грязев, С.С. Яковлев, В.Ю. Травин Силовые режимы вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2 стр. 3-11

42. В.Ю. Травин, М.В. Грязев, С.С. Яковлев Предельные возможности вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2 стр. 21-26

43. В.Ю. Травин, А.Н. Исаева Оценка неоднородности деформации и механических свойств в стенке детали при вытяжке с утонением толстостенных осесимметричных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 9. Ч. 2 стр. 393-397

44. В.Ю. Травин Математическая модель вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных деталей из анизотропного материала. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 5 стр. 40-49

45. В.Ю. Травин, С.С. Яковлев, А.Н. Исаева Новый технологический процесс изготовления толстостенных осесимметричных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2 стр. 161-168.

46. В.Ю. Травин Влияние анизотропии механических свойств на технологические параметры операции вытяжки с утонением толстостенных осесимметричных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 11 стр. 378-383

47. В.Ю. Травин, А.Н. Исаева Повреждаемость материала в стенке детали при вытяжке с утонением толстостенных осесимметричных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 10 стр. 334-340

48. О.Н. Митин, В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева Технологии изготовления цилиндрических заготовок с внутренними рифлениями. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 10 стр. 327-334

49. А.К. Евдокимов, О.С. Воронцова Вытяжка с утонением через две матрицы с учетом противонапряжения. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2 стр. 65-70

50. С.С. Яковлев, М.В. Грязев, В.Ю. Травин Выявление экспериментальных особенностей протекания последующих операций комбинированной вытяжки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2 стр. 44-49
51. В.Ю. Травин, С.С. Яковлев, Фам Дык Тхиен силовые режимы комбинированной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов в конических матрицах. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 1. стр. 142-135
52. В.Ю. Травин, М.В. Грязев, Фам Дык Тхиен Последующие операции комбинированной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 4. стр. 3-15
53. М.В. Грязев, В.Ю. Травин, Фам Дык Тхиен Влияние технологических параметров на силовые режимы комбинированной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов на радиальных матрицах. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 3.
54. В.Ю. Травин, С.С. Яковлев, А.Н. Исаева Технологические режимы операции вытяжки с утонением стенки осесимметричных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 8 стр. 389-400.
55. В.Ю. Травин, Фам Дык Тхиен Условия устойчивого протекания первой операции комбинированной вытяжки анизотропного материала через радиальную матрицу. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 3. стр. 506-513
56. В.Ю. Травин, Фам Дык Тхиен Предельные возможности комбинированной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов в конических матрицах. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 1. стр. 68-74
57. С.Ю. Звонов, И.П. Попов Исследование особенностей изготовления осесимметричных конических деталей с заданной толщиной стенки. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 15, №6(3), 2013 стр. 685-691
58. Anggono, A. D., & Siswanto, W. A. (2013). Simulation of Ironing Process for Earring Reduction in Sheet Metal Forming. Applied Mechanics and Materials, 465-466, 91–95. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.465-466.91

59. El Sherbiny, M., Zein, H., Abd-Rabou, M., & El shazly, M. (2014). Thinning and residual stresses of sheet metal in the deep drawing process. *Materials & Design*, 55, 869–879. doi:10.1016/j.matdes.2013.10.055
60. Zein, H., El Sherbiny, M., Abd-Rabou, M., & El shazly, M. (2014). Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. *Materials & Design*, 53, 797–808. doi:10.1016/j.matdes.2013.07.078
61. Н.П. Агеев, Е.В. Затеруха Исследование неравномерности распределения степени деформации и механических свойств по сечению полых деталей, штампуемых способом вытяжки с утонением. *Металлообработка №3(81)/2014 стр. 36-42.*
62. С.С. Яковлев, Фам Дык Тхиен, В.И. Платонов, Ю.Г. Нечепуренко Экспериментальные исследования первой операции комбинированной вытяжки. *Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 1 стр. 217-225*
63. С.С. Яковлев, К.Х. Нгуен, О.Н. Митин Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при обжиге толстостенных трубных заготовок. *Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 7 стр. 10-15*
64. А.Н. Исаева, М.В. Грязев, В.Ю. Травин Кинематика течения материала при вытяжке с утонением стенки толстостенных осесимметричных деталей из анизотропного материала. *Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 2 стр. 152-157.*
65. В.Ю. Травин Поврежденность деформируемого материала на операциях вытяжки с утонением стенки. *Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 7. стр. 15-19*
66. С.С. Яковлев, В.Ю. Травин, А.А. Пасынков, В.И. Платонов Предельные возможности последующих операций изотермической комбинированной вытяжки анизотропных материалов в режиме ползучести. *Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 1 стр. 91-97*
67. С.С. Яковлев, А.А. Пасынков, А.А. Перепелкин, В.А. Булычев Предельные возможности деформирования первой операции комбинированной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов через радиальную матрицу в режиме ползучести. *Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 5. стр. 49-56*

68. Яковлев С.С., Пасынков А.А., Платонов В.И. Предельные возможности первой операции изотермической комбинированной вытяжки анизотропного материала в конической матрице. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 3. стр. 149-156
69. Shirazi, A., Abrinia, K., & Faraji, G. (2014). Hydroironing: A Novel Ironing Method with a Higher Thickness Reduction. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(1), 99–103. doi:10.1080/10426914.2014.962659
70. Khodsetan, M., Faraji, G., & Abrinia, K. (2015). A Novel Ironing Process with Extra High Thickness Reduction: Constrained Ironing. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(11), 1324–1328. doi:10.1080/10426914.2015.1037898
71. Artur Rękas, Tomasz Latos, Łukasz Brodawka, Maciej Kociołek, Michał Siedlik, Robert Budzyn, Andrzej Furman (2015) Numerical analysis of multistep ironing of thin-wall aluminium drawpiece.
72. П. М. Винник, К. М. Иванов, Г. А. Данилин, Е. Ю. Ремшев, Т. В. Винник Прогнозирование механических свойств детали, полученной вытяжкой с утонением. *Металлообработка* № 4 (88)/2015.
73. D. A. Chemezov Changing the wall thickness of the hollow detail during a shallow drawing of the plate stock. *ISPC Applied technologies*, Scranton, USA p.34-37
74. Ali Mukhtar, M. N., Batan, I. M. L., Pramujati, B., & Pramono, A. S. (2016). Simulation of Ironing Process for Bullet Case to Get Minimum Forming Force with Variation of Die Angle and Reduction Wall Thickness. *Applied Mechanics and Materials*, 836, 197–202. doi:10.4028
75. Khodsetan, M., Faraji, G., Abrinia, K. et al. A Numerical and Experimental Study of Constrained Ironing Process as a Novel High Thickness Reduction Ironing Method. *Trans Indian Inst Met* 69, 1843–1849 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0843-6/>
76. N. Sabangban, N. Mahayotsanun, S. Sucharitpwatskul & S. Mahabunphachai (2016) Wear prediction of die coatings in strip ironing by finite element simulation, *Transactions of the IMF*, 94:4, 199-203, DOI: 10.1080/00202967.2016.1180813
77. Abe, Y., Mori, K., Hatashita, F., Shiba, T., Daodon, W., & Osakada, K. (2016). Improvement of seizure resistance in ironing of stainless steel cup with cermet die having

fine lubricant pockets. *Journal of Materials Processing Technology*, 234, 195–207. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.03.017

78. Faizin, A., Wahjudi, A., Batan, I. M. L., & Pramono, A. S. (2016). A Review Paper on Product Surface Defect Detection of Ironing Process. *Applied Mechanics and Materials*, 836, 147–152. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.836.14710.4028/

79. Parida, A. K., Soren, S., Jha, R. N., & Sadhukhan, S. (2016). 12 mm Thick Circular Blanks of Al-killed AISI 1020 Steel -Applied for Cylindrical Cup Manufacturing by Multistage Deep Drawing with Simultaneous Ironing. *Materials Research*, 19(5), 965–976. doi:10.1590/1980-5373-mr-2016-0003

80. Djordjević, M., Aleksandrović, S., Lazić, V., Arsić, D., Nikolić, R. R., & Hadzima, B. (2016). Investigation of the Lubrication Influence on Single-phase and Multi-phase Ironing Processes. *Procedia Engineering*, 149, 40–47. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.636

81. С.С. Яковлев (мл.), В.А. Коротков Моделирование интенсивной пластической деформации при вытяжке с утонением. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2016. Вып. 5. стр.31-37

82. А.Н. Исаева, В.А. Коротков Отработка технологических режимов вытяжки толстостенных осесимметричных заготовок. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2016. Вып. 7. Ч. 2. стр.3-9.

83. Д.А. Чемезов Процесс вытяжки с утонением стенки полуфабриката. международный научный журнал «ИННОВАЦИОННАЯ НАУКА» №7-8/2016 ISSN 2410-6070. стр. 96-99

84. Чемезов Д.А. Степень поверхностного упрочнения пустотелой детали после вытяжки с утонением боковой стенки полуфабриката *Актуальные вопросы современной науки. Научный журнал* № 4(12) Октябрь 2016. стр. 15-18

85. Parida, A. K., Soren, S., Jha, R. N., & Krishnamurthy, N. (2017). Multistage Deep Drawing with Ironing of Al-killed AISI 1040 Graded Medium Carbon Steel: a Parametric Study. *Materials Research*, 20(4), 1111–1120. doi:10.1590/1980-5373-mr-2016-0586

86. П.М. Винник Расчет напряженно-деформированного состояния, траекторий течения и степени деформации в межматричном пространстве при вытяжке с утонением через две матрицы разностенной заготовки. *Металлообработка* №4(100)/2017 стр. 46-53.
87. С.С. Яковлев, В.А. Коротков Определение влияния рабочего профиля матрицы, создающего переменный зазор при вытяжке с утонением на увеличение сдвиговых деформаций. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 3. стр. 70-76
88. С.С. Яковлев Определение силовых параметров при вытяжке с утонением и интенсивной пластической деформацией. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 11. Ч. 1. стр. 212-218
89. С.С. Яковлев Влияние формы рабочего профиля матрицы на интенсивность пластической деформации при вытяжке с утонением. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 4 стр. 31-37.
90. Ю.Г. Нечепуренко, П.В. Романов, Г.А. Нуждин, И.И. Матасов Перспективные технологические процессы изготовления тонкостенных цилиндрических изделий. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 6 стр. 25-33
91. Ю.Г. Нечепуренко, С.Н. Ларин, В.И. Платонов, А.Н. Исаева Оценка изменения механических свойств материала, изначально обладающего анизотропией в процессе вытяжки. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 4 стр. 54-61
92. Faizin, A., Wahjudi, A., Batan, I. M. L., & Pramono, A. S. (2018). Ironing force modeling analysis on aluminum cup using CATIA V5. doi:10.1063/1.5046270
93. Patil, R., Marrapu, B., Mandadapu, N., Jakkula, K., & Shetty, A. (2018). Developing a progressive draw with ironing tool for manufacturing a solenoid casing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1063, 012176. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012176>
94. Lee, C., & Hong, S. (2018). Curvature area prediction for the deep drawing-ironing process of a cylindrical cup using finite element method and regression analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(12), 5913–5918. doi:10.1007/s12206-018-1142-4

95. С.С. Яковлев (мл) Определение силы при вытяжке с локальным утонением и использованием матрицы с наклонными выступами. Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10 стр. 201-205.
96. С.С. Яковлев (мл) Сравнение силовых и деформированных параметров вытяжек с утонением и локальным утонением стенки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10 стр. 197-200.
97. М.А. Бабурин, В.Д. Баскаков, Н.В. Герасимов, О.В. Зарубина, В.А. Тарасов. Математическая модель расчета предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок переменной толщины. Известия высших учебных заведений. Машиностроение №4 (697) 2018
98. П.М. Винник, Е.Ю. Ремшев, Е.В. Затеруха, Д.С. Филин Расчет напряженно-деформированного состояния заготовки при вытяжке с утонением стенки через матрицу с малым углом конусности. ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2019. № 4 стр.71-86.
99. П. М. Винник, Т. В. Винник, А. И. Олехвер, Е. Ю. Ремшев Расчет влияния упрочнения материала на напряжения и формируемые механические свойства при последовательных вытяжках с утонением стенки. Металлообработка № 1(109)/2019 стр. 30-34.
100. Yan, Z., Fang, M., Lian, Z., Zhang, Z., Zhu, J., Zhang, G., & Wang, Y. (2019). Research on AZ80 + 0.4%Ce (wt %) Ultra-Thin-Walled Tubes of Magnesium Alloys: The Forming Process, Microstructure Evolution and Mechanical Properties. Metals, 9(5), 563. doi:10.3390/met9050563.
101. С.Н. Ларин, А.А. Пасынков, С.С. Яковлев Оценка напряженно-деформированного состояния заготовки при вытяжке через сложнопрофильную матрицу. Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 10 стр. 466-470.
102. Himzo Đukić & Mirna Nožić Hardness prediction model for drawing with wall thickness reduction. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, volume 128). doi:10.1007/978-3-030-46817-0
103. Movahedian, S., Khamedi, R., Moradi, R., & Niknafs, H. (2020). Experimental and numerical analyses of carbon steel sheet metal forming process using strain rate

dependent friction model. Materials Today: Proceedings.
doi:10.1016/j.matpr.2020.07.544

104. А.И. Сергеев, А.В. Щеголев, А.И. Сердюк, М.В. Иванюк, А.В. Кузьмин Автоматизация расчета инструмента заключительной вытяжки с утонением цельнотянутых цилиндрических изделий. Программные продукты и системы / Software & Systems 3 (33) 2020. стр. 510-515.

105. Gunyoung Park ,Rockkyu Park ,Hyoseo Kwak andChul Kim, Design of a Combined Redrawing-Ironing Process to Manufacture a CNG Pressure Vessel Liner <https://doi.org/10.3390/app11188295>

106. Akhmad Faizin, I Made Londen Batan, Agus Sigit Pramono Determination of the Effect of Thickness Reduction Ratio, Die Angle, and Coefficient of Friction on Residual Stresses in Ironing Process: An Analysis Using Computer Simulation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-37745/1 (113) 2021 p.70-78.

107. С.Н. Ларин, А.Н. Исаева, П.В. Романов Оценка деформированного состояния заготовки при вытяжке с утонением стенки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 3 стр. 19-26.

108. Савчик И.А., Чаботар И.С., Чертович Г.А. Любимов В.И. Анализ технологических возможностей изготовления полых изделий различными способами вытяжки. Белорусский национальный технический университет.

109. АК Евдокимов, НК Камайкин, ВА Евдокимов Способ получения гильз патронов стрелкового оружия.

110. Коновалов В. А. Формоизменение трубных заготовок при обжиге в конической матрице с контейнером. Омский научный вестник 06/1999. стр.35-37.

111. Е.Н. Сосенушкин, Е.И. Третьякова Статический критерий устойчивости трубных анизотропных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 2 стр. 169-176.

112. А. В. Черняев Силовые режимы обжима тонкостенных цилиндрических оболочек из анизотропного материала жестким инструментом в режиме ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 2 стр. 163-169.

113. А. В. Черняев Предельные возможности формоизменения при обжиге тонкостенных цилиндрических оболочек из анизотропного материала жестким

инструментом в режиме ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 2 стр. 158-163.

114. Р.И. Непершин Обжим тонкостенной трубы криволинейной матрицей Проблемы машиностроения и надежности машин, 2009

115. Д.В. Крылов, А.В. Черняев Математическое моделирование операций обжима и раздачи цилиндрических оболочек из анизотропного материала в режиме ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. Вып. 3 стр. 120-130.

116. Р.И. Непершин Идеальный профиль матрицы для обжима толстостенной трубы. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2010

117. Р.И. Непершин Идеальные процессы обжима и раздачи толстостенных трубных заготовок. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка 2010

118. К.С. Ременев, С.С. Яковлев Технологические параметры операций обжима и раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 2 стр. 513-526.

119. Кривошеин В.А. Теоретический расчет силы при обжиме в профилированной матрице. НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ №9 2011. стр.2-8

120. Кривошеин В.А. Анализ операции и расчет силы при обжиме в матрице с кольцевыми канавками. Металлообработка №4(64)/2011 стр. 29-32.

121. Кривошеин В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками. Известия высших учебных заведений 2011 стр. 49-53.

122. ЮИ Гуменюк, НВ Спасенко, ВА Яшкин, НВ Степанов Способ получения гильз патронов стрелкового оружия. 2012

123. Влияние параметров инструмента на формоизменение трубной заготовки с относительно толстой стенкой при холодном обжиме конической матрицей. Омский научный вестник №2 (110) 2012. стр. 86-89.

124. О.Н. Митин Математическая модель обжима трубной заготовки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 4 стр. 78-88

125. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Хачатрян Д.В., Киндеров В.Ю. Теоретические и технологические аспекты обжима трубных заготовок. Известия МГТУ «МАМИ» № 2(16), 2013, т. 2. стр. 139-145
126. А.А. Сулейман, И.Н. Шубин Влияние коэффициента трения на формоизменение трубной заготовки при совмещенной операции обжима и раздачи. Известия высших учебных заведений 2013 № 6. стр. 53-59.
127. О.Н. Митин Экспериментальные исследования операций обжима и раздачи трубных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2 стр. 195-199.
128. В.Ю. Травин, С.С. Яковлев, А.Н. Исаева Технологические режимы операции вытяжки с утонением стенки осесимметричных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 8 стр. 389-400.
129. Шишкин А. А. Об обжиме особотонкостенных трубных заготовок. Наука и образование №3 2013. стр.157-168.
130. Сулейман А. А., Шубин И. Н. Напряженно-деформированное состояние в совмещенной операции раздачи и обжима при изготовлении переходников. Наука и образование №3 2013. стр.21-40.
131. Матафонов С.С. Поперечная устойчивость разностенных заготовок при обжиме в ступенчатых конических матрицах. Известия МГТУ «МАМИ» № 2(16), 2013, т. 2 стр.145-149.
132. В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Г.А. Нуждин, Б.С. Яковлев Математические модели операций вытяжки, обжима, отбортовки и раздачи анизотропного вязкопластичного материала. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 1. стр. 29-38.
133. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Хачатрян Д.В., Киндеров В.Ю. Теоретические и технологические аспекты обжима трубных заготовок. Известия МГТУ «МАМИ» № 2(16), 2013, т. 2.
134. В.А. Коновалов Д.В. Обуховский А.М. Проскурин Определение напряжения текучести стали 20 после холодного обжима толстостенных труб конической матрицей. Омский научный вестник №2 (120) 2013. стр. 82-85.

135. К.С. Ремнев, С.С. Яковлев Условие потери устойчивости в виде гофров при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала. Известия высших учебных заведений. машиностроение. №8 [653] 2014. стр. 20-27.
136. С.С. Яковлев, К.Х Нгуен Исследование силовых режимов процесса обжима цилиндрических заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 4. стр. 63-69.
137. К.Х. Нгуен, О.Н. Митин Закономерности влияния технологических параметров на неоднородность распределения напряжений по толщине детали при обжиге с утонением. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 1 стр. 98-107.
138. К.Х. Нгуен, О.Н. Митин Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при обжиге с утонением толстостенных трубных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 1 стр. 163-169.
139. В.А. Коновалов, К.Д. Савельев, Е.Д. Васильев, Н.С. Александрова Особенности формоизменения краевой зоны цилиндрического участка полых образцов с относительно толстой стенкой, обжатых в конической матрице. Омский научный вестник №2 (130) 2014. стр. 68-72.
140. А.Г. Шляпугин Особенности моделирования процесса обжима-раздачи трубной заготовки в DEFORM-2D. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 16, №4, 2014. стр. 240-244.
141. К.Х. Нгуен, О.Н. Митин, Г.А. Нуждин Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 1 стр. 40-48.
142. П.В. Верещагин, Д.В. Беспалов Способ определения формы и размеров заготовок для производства гильз с минимальным количеством вытяжных операций. 2015
143. Оценка параметров формоизменения толстостенных трубных образцов, обжатых коническими матрицами при отсутствии радиальной деформации внутренней поверхности необжимаемой части заготовки. Омский научный вестник №2 (140) 2015. стр. 55-57.

144. М.В. Грязев, С.Н. Ларин, А.А. Пасынков Подход к оценке напряженно-деформированного состояния и мощностных параметров обжима трубной заготовки в матрице конической формы. Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 5 стр. 3-8.
145. М.В. Грязев, С.Н. Ларин, А.В. Черняев Предельные возможности формообразования при обжиме трубной заготовки в матрице конической формы. Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 7 ч.1 стр. 3-9.
146. И.И. Матасов, А.С. Огнев Силовые режимы и предельные возможности операции обжима цилиндрических оболочек из анизотропных материалов в режиме ползучести. Будущее машиностроения России, 2016.
147. В. А. Коновалов А. В. Гаков С. И. Заяц. Сравнительный анализ технологических возможностей схем обжима толстостенных трубных заготовок в конических матрицах. Омский научный вестник №3 (147) 2016. стр. 23-27.
148. Zvonov Sergey , Shlyapugin Aleksey Assessing the Metal Consumption for Manufacturing a Conical Part by Hollow Billet Crimp-Expansion and Sheet Blanks Drawing Crimping. Applied Mechanics and Materials Vol. 756 2016 p. стр. 150-155.
149. П.А. Рыжов, С.А. Евсюков Анализ краевого расширения при обжиме трубчатых заготовок. Известия высших учебных заведений. Машиностроение №5 [686] 2017.
150. П.А. Рыжов, С.А. Евсюков Построение моделей регрессии для описания краевого расширения при обжиме трубчатых заготовок. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 4-1 (324) 2017. стр.64-71
151. В.А. Коновалов, С.И. Белов Исследование устойчивости трубных заготовок с относительно толстой стенкой, обжимаемых матрицами с углом конуса 50°. Омский научный вестник №1 (151) 2017. стр. 9-12.
152. С.С. Стругов, В.А. Иванов, А.В. Смирных, М.Д. Таркаленко Причины и виды брака в зависимости от формирования напряженно-деформируемого состояния и оценка вероятности разрушения заготовки по критерию Кокрофта – Лэтэма в процессе холодной объемной штамповки комбинированным методом

обжима-раздачи. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2018. Т. 18, № 3. С. 59–66 DOI: 10.14529/met180307.

153. П.В. Романов, В.И. Платонов Исследование напряженно-деформированного состояния при обжиге полой цилиндрической оболочки. 2019

154. Andrey A. Udalov, Aleksander V. Udalov Sergey V. Parshin Influence of Deformation Conditions on the Power Regimes of the Process of Cold Crimping of a Pipe Billet in a Conical Die Materials Science Forum Vol. 946 стр.812-817 doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.946.812

155. В.А. Коновалов Ю.А. Чугунова Оценка факторов ограничения технологических возможностей обжима коническими матрицам и заготовок из толстостенных труб. Омский научный вестник №3 (165) 2019. стр. 9-12. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-11-15.

156. S.N. Larin, M.V. Larina, G.A. Nuzhdin Analysis of the stress state of cylindrical workpieces during pipe end crimping with wall thinning. MSTU 2021 Journal of Physics: Conference Series 1901 (2021) 012092 стр.1-6 doi:10.1088/1742-6596/1901/1/012092

157. С.Н. Ларин, В.И. Платонов, Г.А. Нуждин Влияние угла конусности матрицы на силу обжима стальной трубной заготовки с утонением стенки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 2 стр.482-486 DOI: 10.24412/2071-6168-2021-2-482-486

158. С.Н. Ларин, В.И. Платонов, П.В. Романов Оценка влияния величины утонения стенки на процесс обжима трубной заготовки. Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 3 стр.3-6 DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-3-6

159. ГОСТ 2060-90

160. http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1039

161. http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1316

162. Унксов Е. П. Теория пластических деформаций металлов/ Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова - М.: Машиностроение, 1983. -598 с.

163. Сторожев М.В. Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, пераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977, - 423 с.

164. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С. Зусилля деформування, напружено-деформований стан і температурний розподіл у zdeформованій заготовці при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих виробів із латуні. Вісник НТУ «ХП», Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудування та металургії. Харків, 2018, № 23(1299) с. 28...33(фахове видання)
165. Калюжний В.Л., Артеменко С.С., Ярмоленко О.С. Силкові режими, напружено-деформований стан металу та температурний розподіл при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих вісесиметричних виробів з латуні. Наукові нотатки Міжвузівський збірник. Луцький національний технічний університет. Вип. 66, 2019, с. 151...157 (фахове видання)
166. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С. Інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною товщиною стінки. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics And advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, №1 (85). С. 111...117.(фахове видання)
167. Калюжний В.Л., Ярмоленко О.С. Применение деформирующего инструмента специального профиля для интенсификации процесса вытяжки в радиальных матрицах. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics And advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, №1 (88). С. 66...74.(фахове видання)

Характеристика матеріалів

Химический состав в % материала Л70 ГОСТ 15527 - 2004										
Fe	P	Cu	Pb	Zn	Sb	Bi	Примесей			
до 0.07	до 0.005	69 - 71	до 0.05	28.67 - 30.8	до 0.002	до 0.002	всего 0.2			
Литейно-технологические свойства материала Л70 .										
Температура плавления :					950 °С					
Температура горячей обработки :					700 - 850 °С					
Температура отжига :					550 - 650 °С					
Механические свойства при T=20°С материала Л70 .										
Сортамент	Размер	Напр.	σ_B	σ_T	δ_5	ψ	KCU	Термообр.		
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-		
Лист мягк., ГОСТ 2208-2007			270-360		40					
Лист тверд., ГОСТ 2208-2007			430		10					
Твердость Л70 . Лист мягк. ГОСТ 2208-2007							HB 10 ⁻¹ = 70 МПа			
Твердость Л70 . Лист тверд. ГОСТ 2208-2007							HB 10 ⁻¹ = 125 МПа			
Физические свойства материала Л70 .										
T	E 10 ⁻⁵	α 10 ⁶	λ	ρ	C		R 10 ⁵			
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)		Ом·м			
20	1.15		121.4	8500			69			
100		18.9			376.8					
Зарубежные аналоги материала Л70 Внимание! Указаны как точные, так и ближайшие аналоги.										
США	Германия	Япония	Франция	Англия	Евросоюз	Италия	Швеция	Польша	Австрия	Inter
-	DIN,WNr	JIS	AFNOR	BS	EN	UNI	SS	PN	ONORM	ISO
C26000	2.0265 CuZn30	C2600	CuZn30 U-Z30	CZ106	CuZn30 CW505L	P-CuZn30 P-OT70	CuZn30	CuZn30	CuZn30	CuZn30

Рисунок А.1 – Характеристики матеріалу Латуні Л70

Composition		Cu	Fe	Pb	Zn	Al	Ni	Sn
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
		71-73	0.05 max	0.05 max	rem	0.02 max	0.3 max	0.1 max
Physical properties		Melting point	Density	c_p	Electrical cond.	Thermal cond.	Young's modulus	α
		[°C]	[g/cm ³]	@ 20°C [kJ/kgK]	[%IACS]	[W/mK]	[GPa]	@ 20°C [10 ⁻⁶ /K]
		954	8.56	0.378	≥29	123	110	20
Mechanical properties of grade CuZn28 (CW504L)								
Rm - Tensile strength (MPa) (R310)					310			
Rm - Tensile strength (MPa) (R370)					370			
R _{p0.2} 0.2% proof strength (MPa) (R310)					120			
R _{p0.2} 0.2% proof strength (MPa) (R370)					320			
Brinell hardness (HB): (H085)					85 - 115			
Brinell hardness (HB): (H115)					115 - 145			

Рисунок А.2 – Характеристики матеріалу CuZn28

Результати розрахунків по гарячому осаджуванню

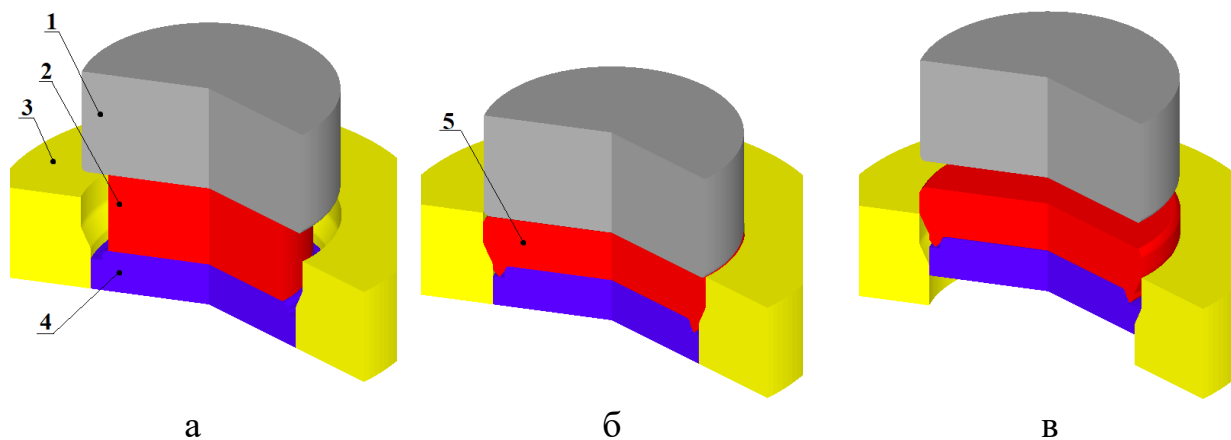


Рисунок Б.1 – Розрахункові схеми в розрізі гарячого осаджування: а - на початку осаджування, б - в кінці осаджування, в - виштовхування напівфабрикату

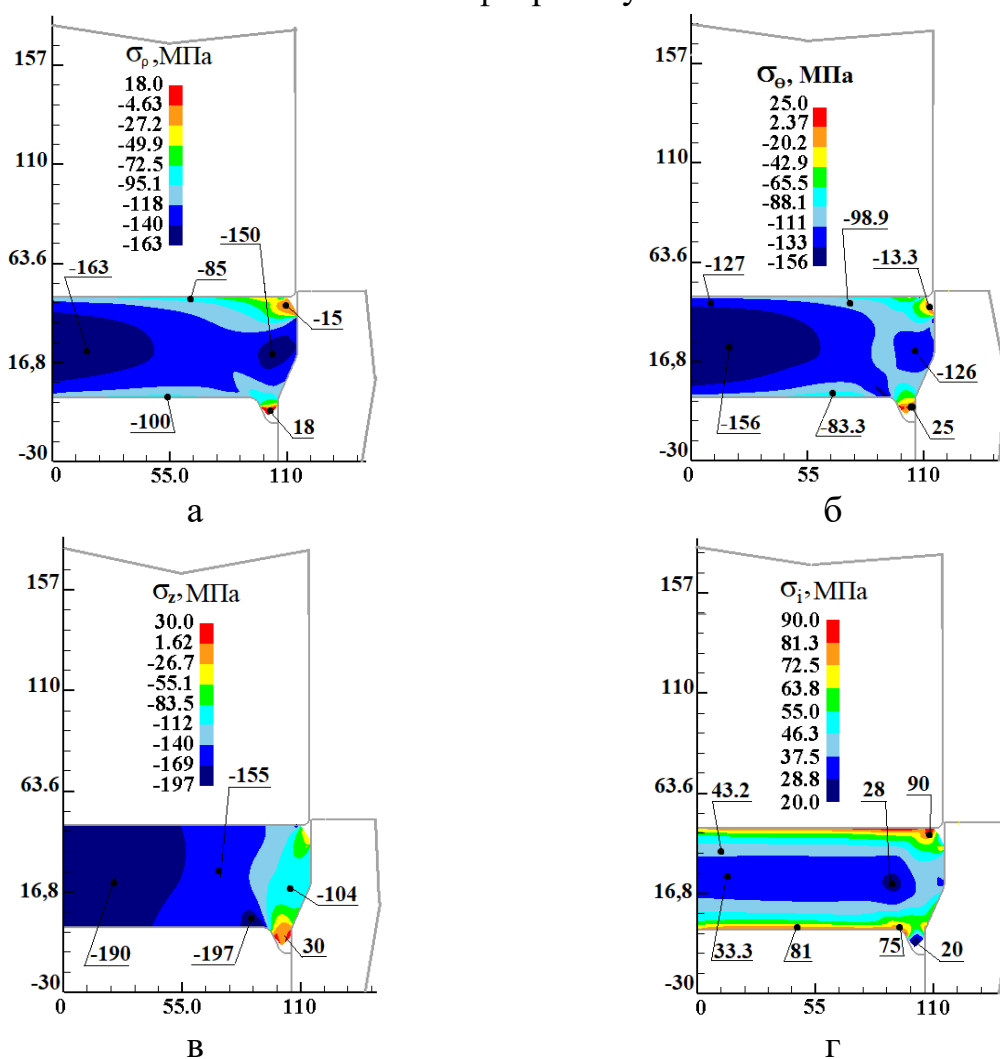


Рисунок Б.2 – Розподіли напружень та інтенсивності напружень по об'єму zdeформованого напівфабрикату: а - розподіл σ_r , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_z , г - розподіл σ_i

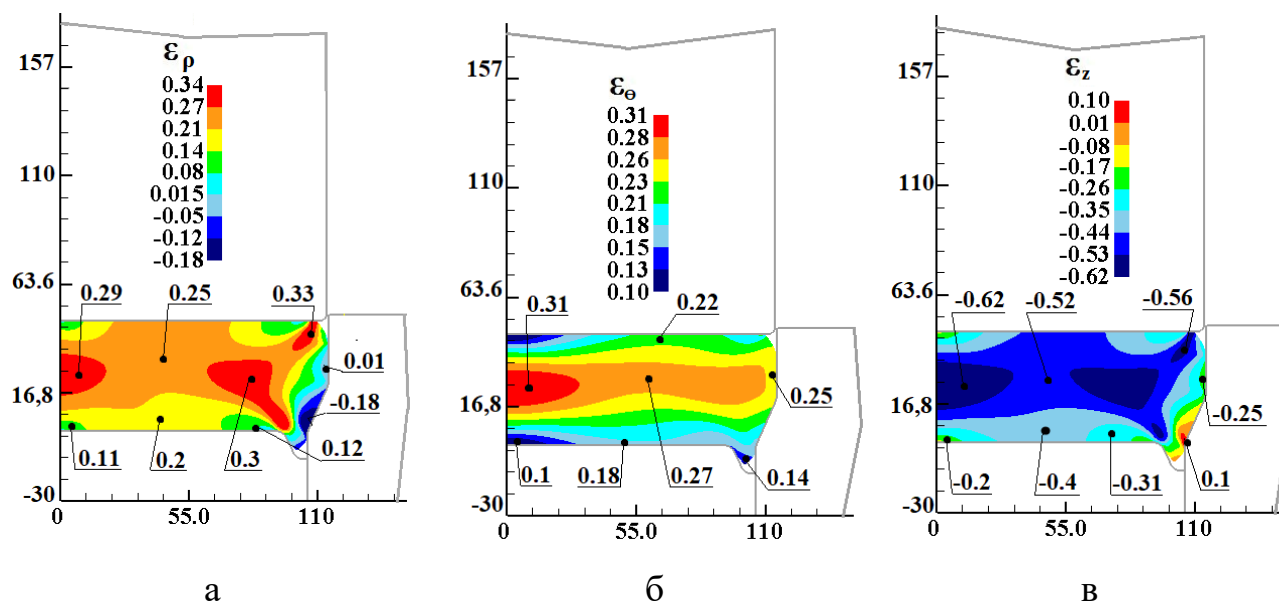


Рисунок Б.3 – Розподіли деформацій та інтенсивності деформацій по об'єму zdeформованого напівфабрикату: а - розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в – розподіл ϵ_z

Результати розрахунків гарячого зворотного видавлювання

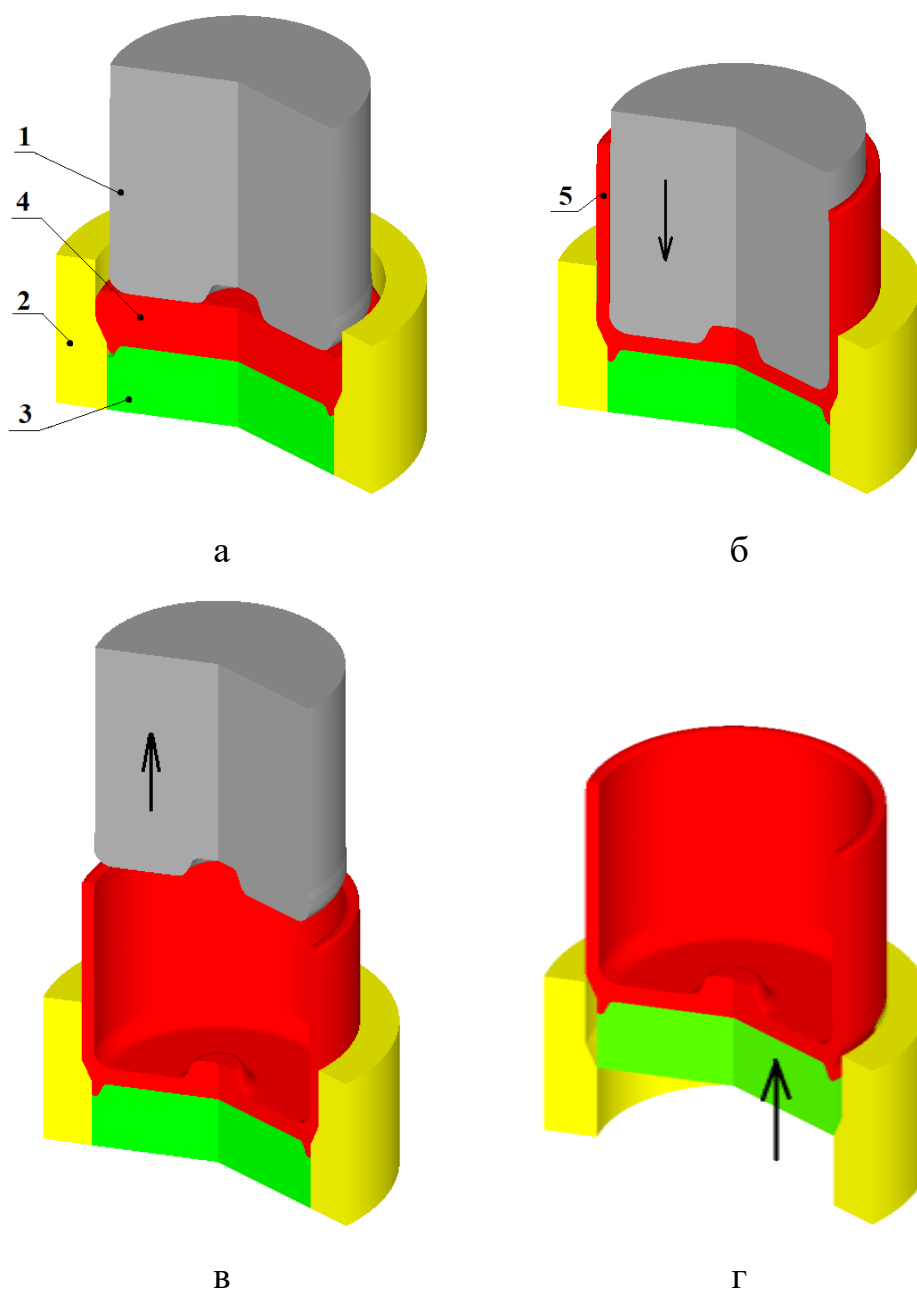
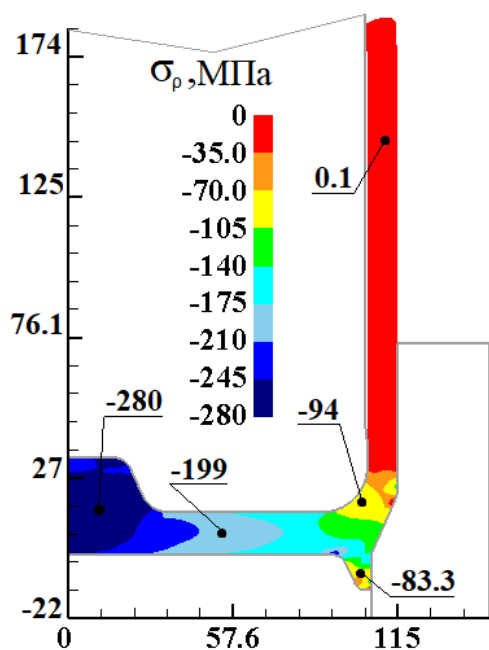
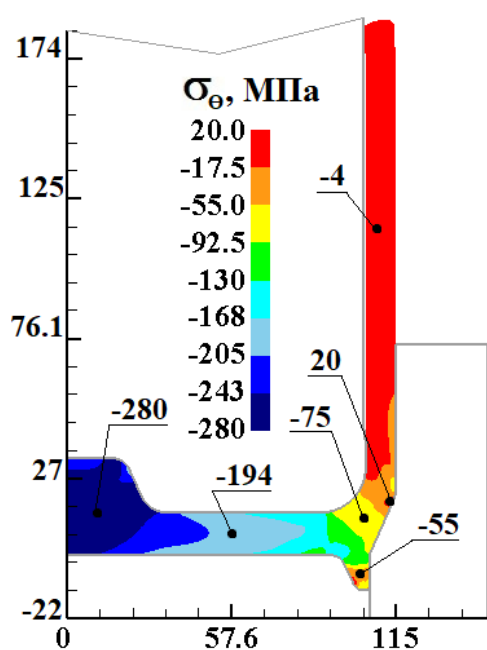


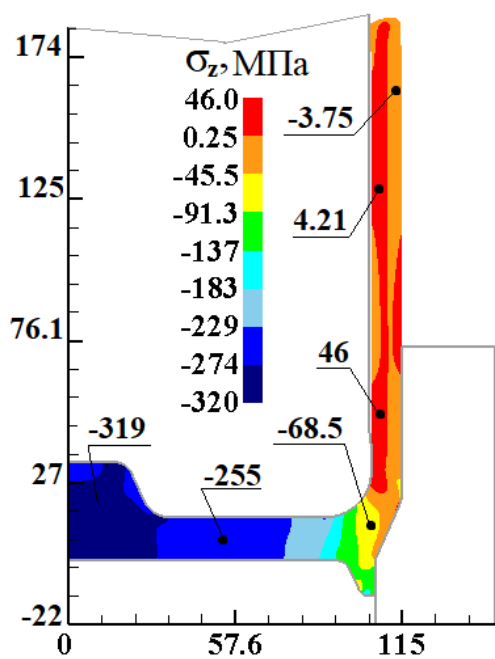
Рисунок В.1 – Розрахункові схеми в розрізі гарячого зворотного видавлювання: а - початкове положення, б - в кінці видавлювання, в - піднімання пуансона, г- виштовхування напівфабрикату



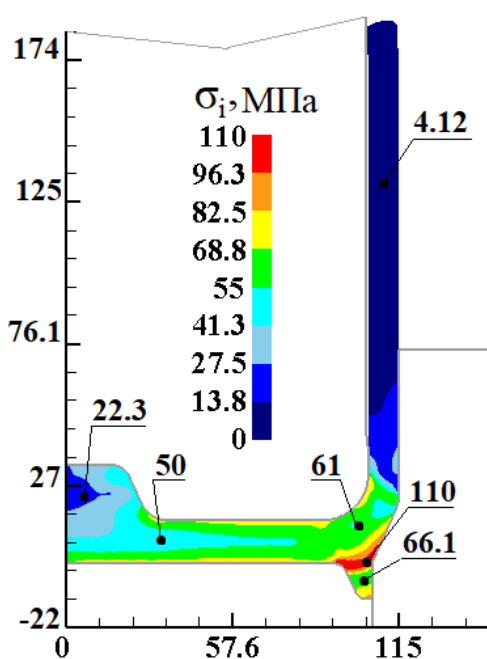
а



б



в



г

Рисунок. В.2 – Розподіли напружень та інтенсивності напружень: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в – розподіл σ_z , г - розподіл σ_i

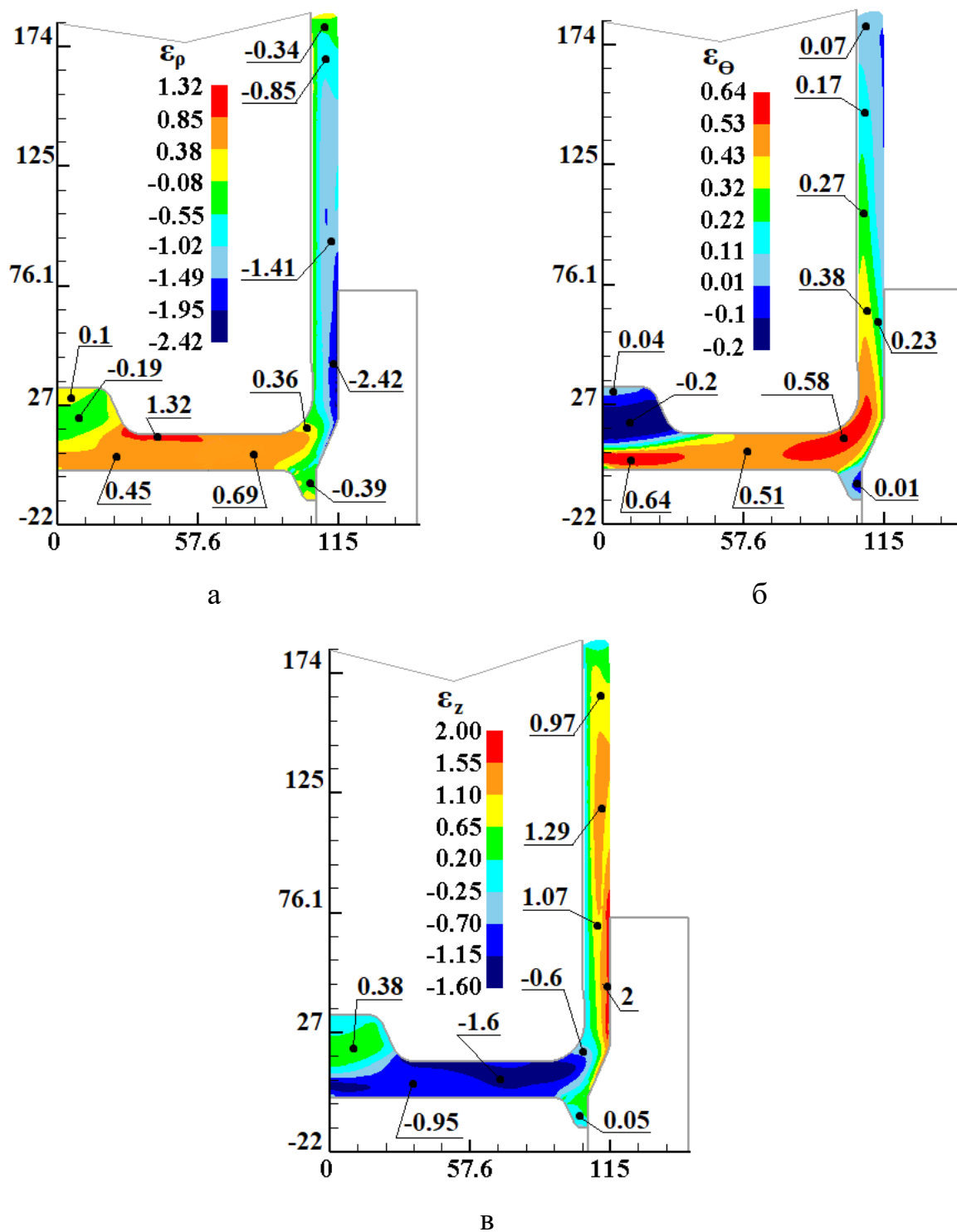


Рисунок. В.3 – Розподіли деформацій по об'єму здеформованого напівфабрикату: а - розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в - розподіл ϵ_z

Результати розрахунків по витягуванню з потоншенням

Перше витягування з потоншенням

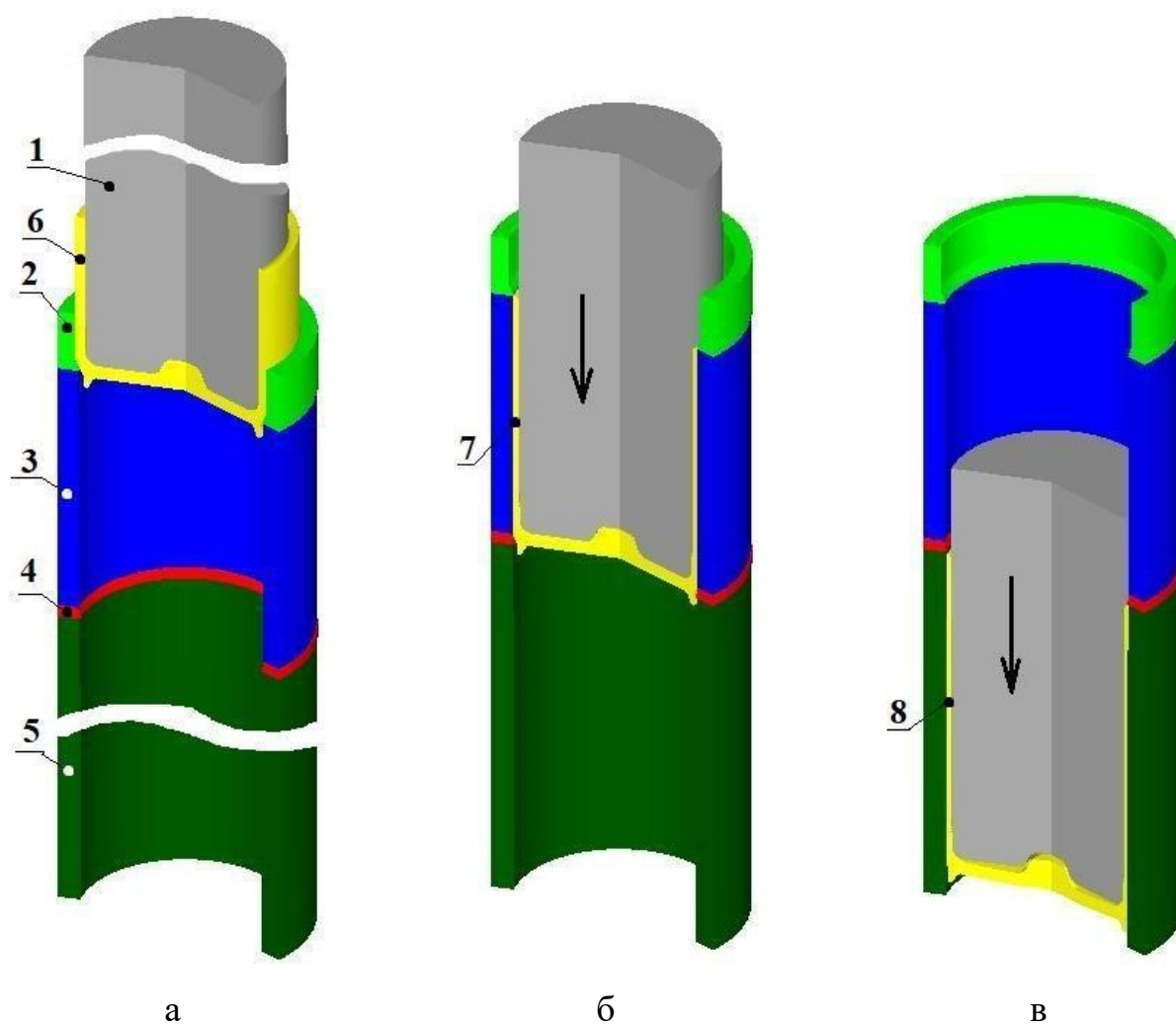


Рисунок Г.1 – Розрахункові схеми витягування з потоншенням:

а - на початку, б - після першої матриці, в - в кінці

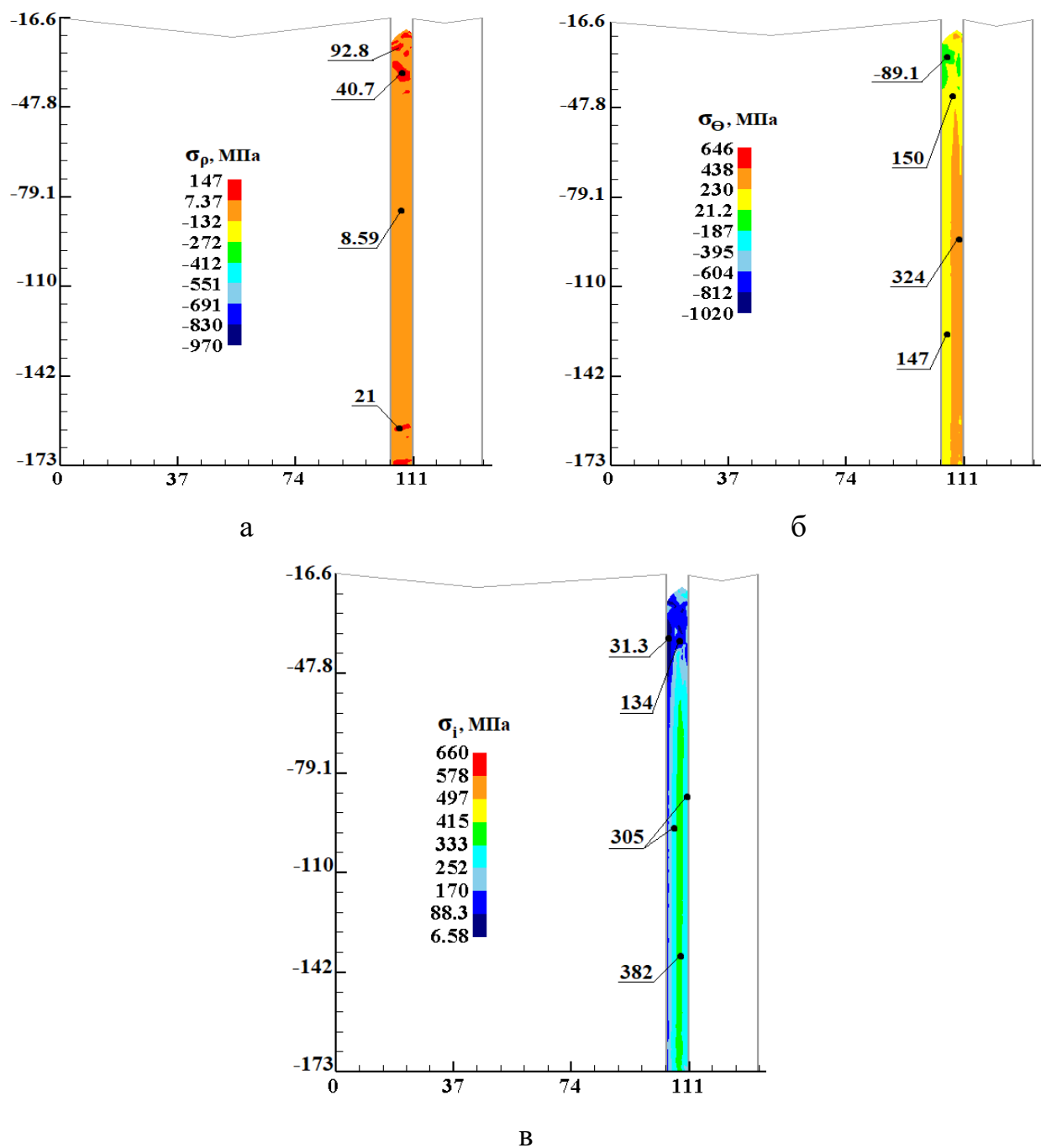


Рисунок Г.2 – Розподіли напружень та інтенсивності напруження зверху напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_i

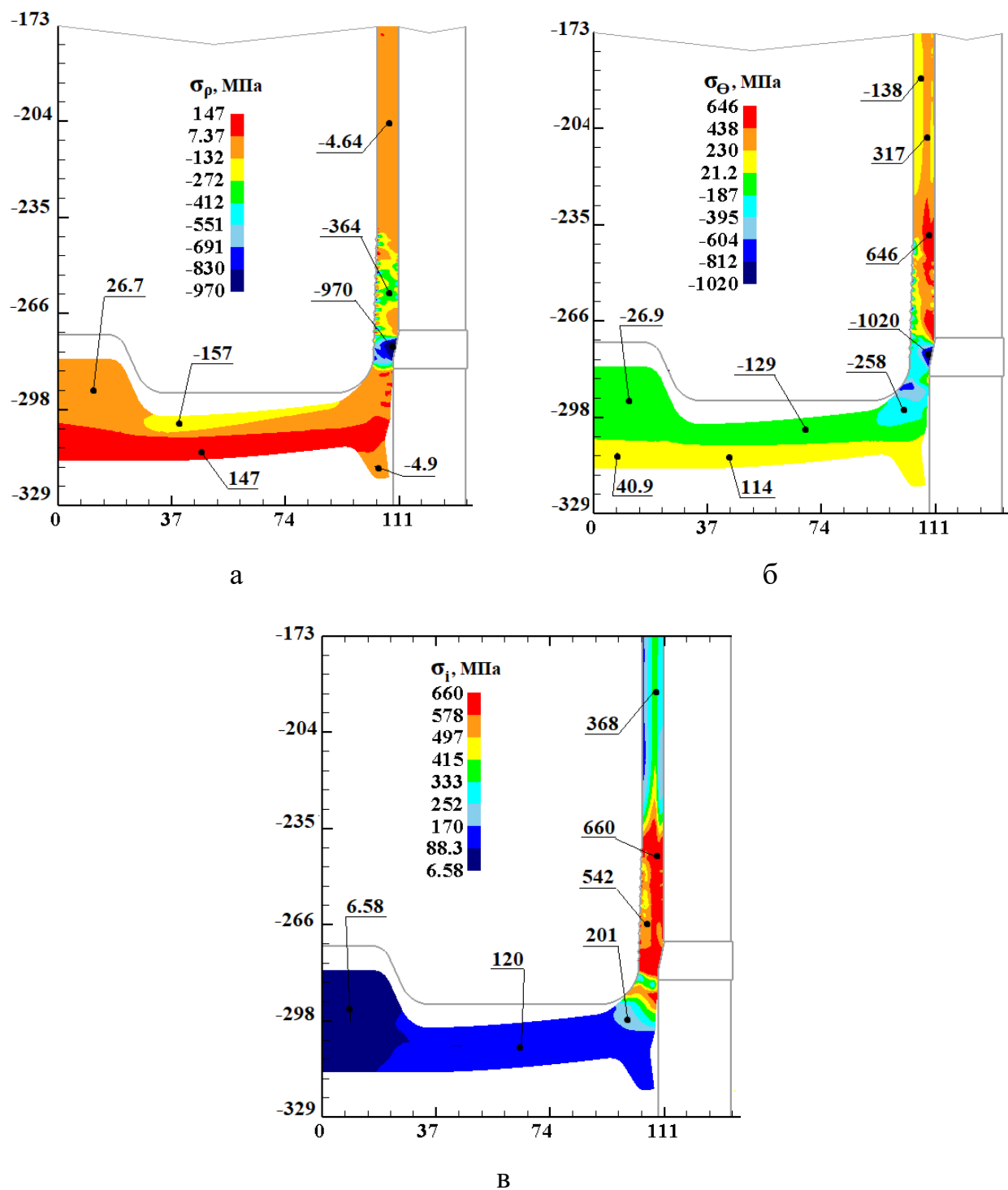


Рисунок. Г.3 – Розподіли напружень та інтенсивності напруження внизу напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_i

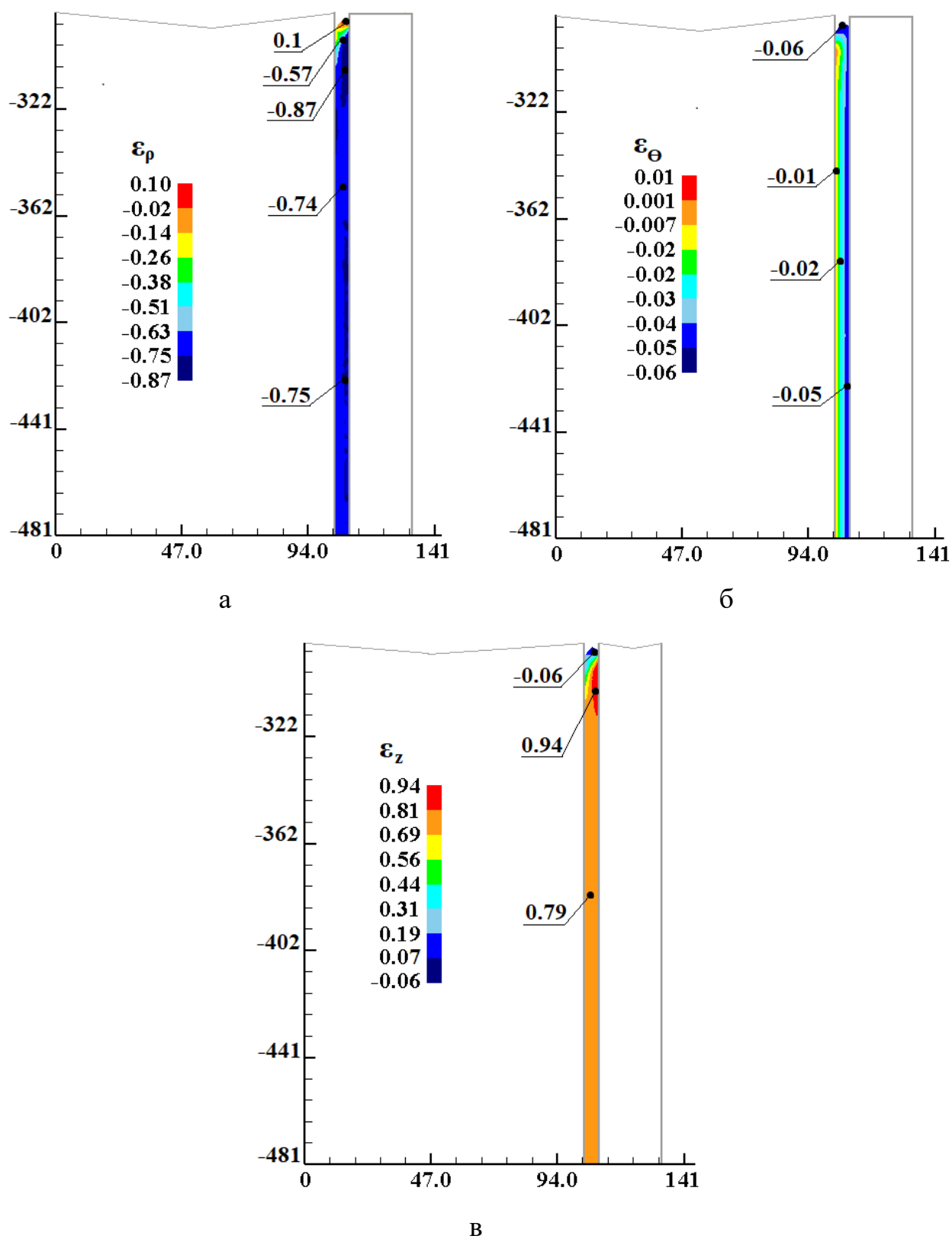


Рисунок. Г.4 – Розподіли деформацій по об'єму верхньої частини стінки здеформованого напівфабрикату: а - розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в – розподіл ε_z

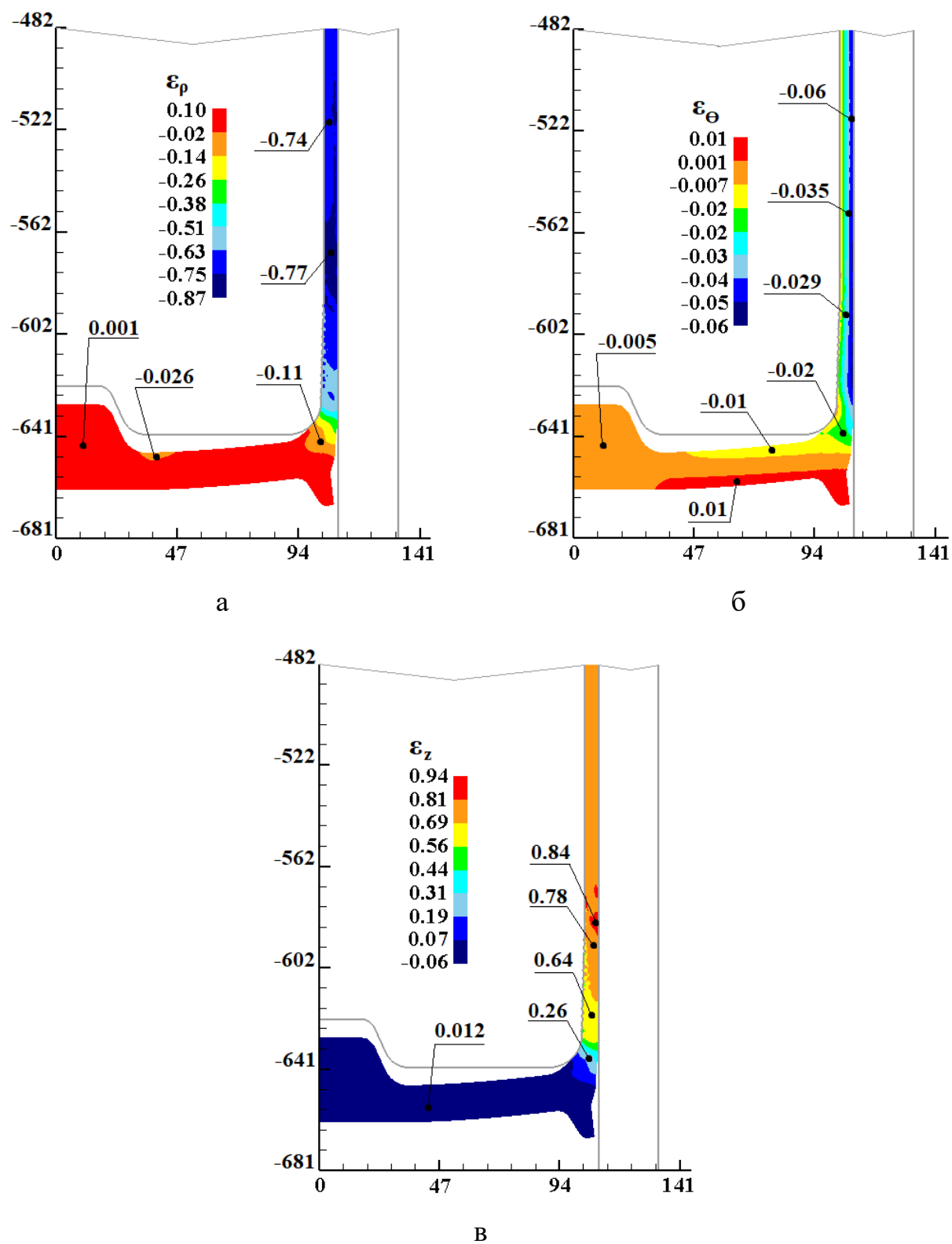


Рисунок. Г.5 Розподіли деформацій по об'єму нижньої частини здеформованого напівфабрикату: а – розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в - розподіл ϵ_z

Вирівнювання дна після першого витягування з потоншенням

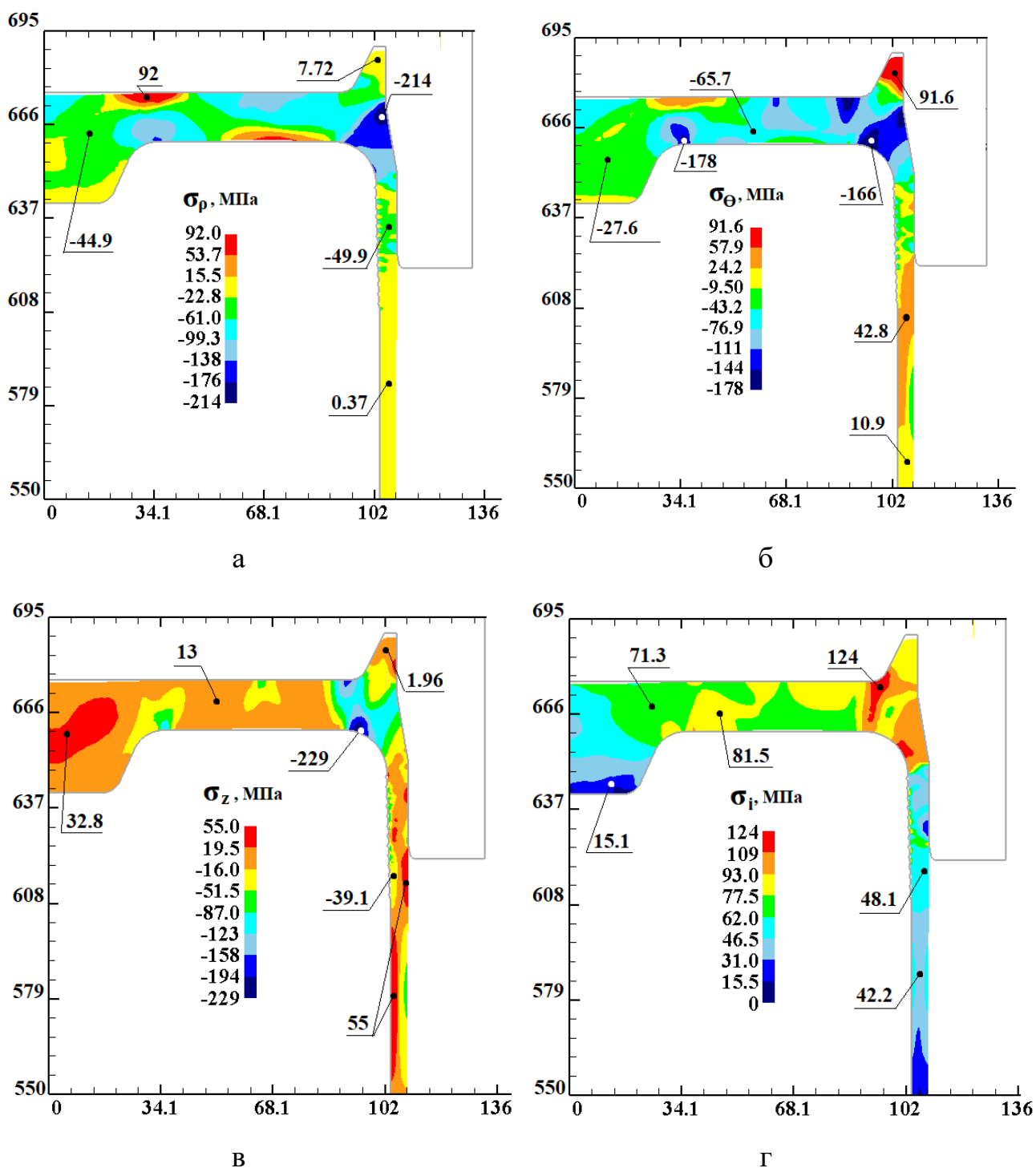


Рисунок Г.6 Розподіли напружень по об'єму zdeформованого напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в – розподіл σ_z , г - розподіл σ_i

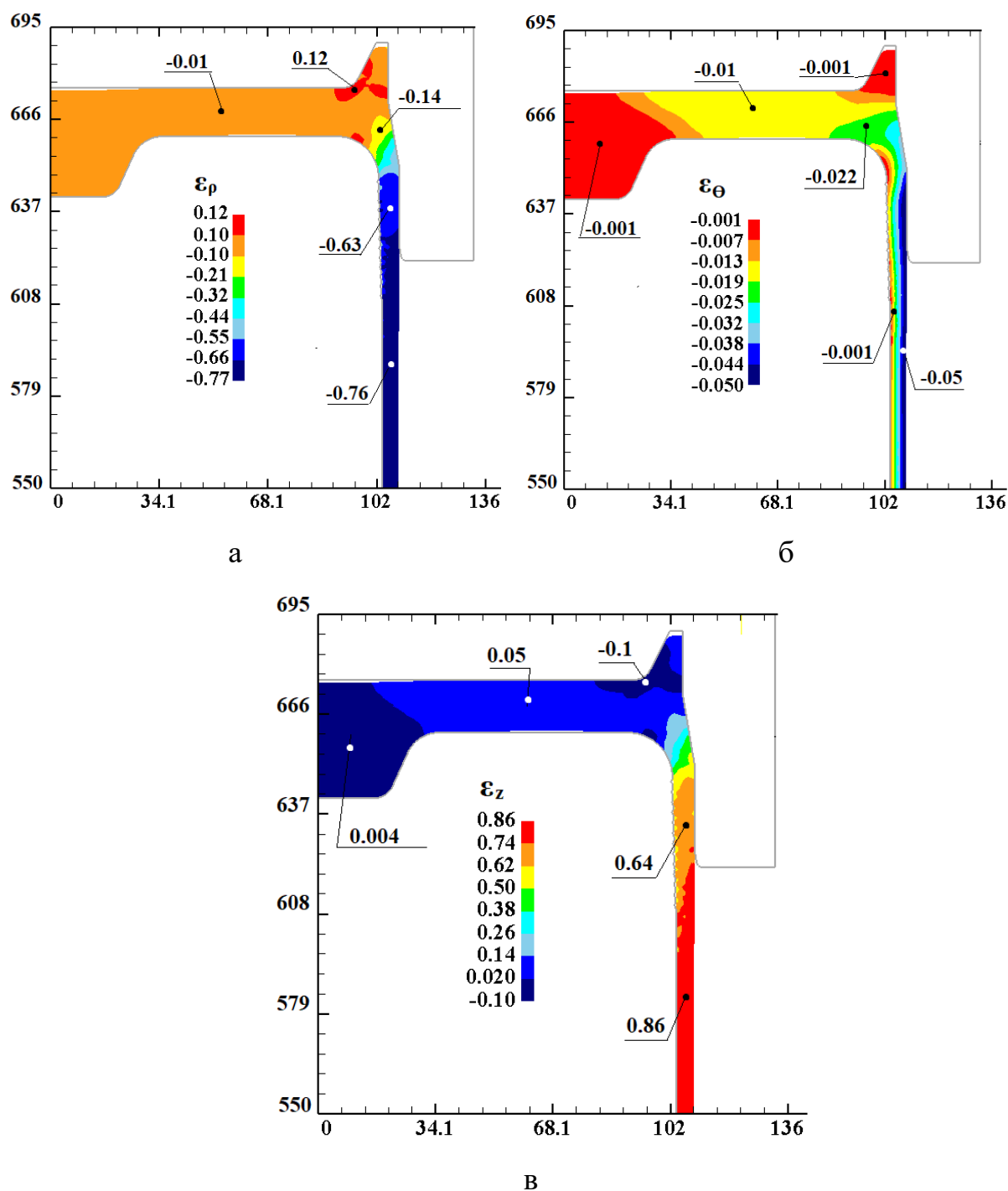


Рисунок Г.7 Розподіли деформацій та інтенсивності деформацій по об'єму здеформованої заготовки: а - розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в – розподіл ϵ_z

Друге витягування з потоншенням

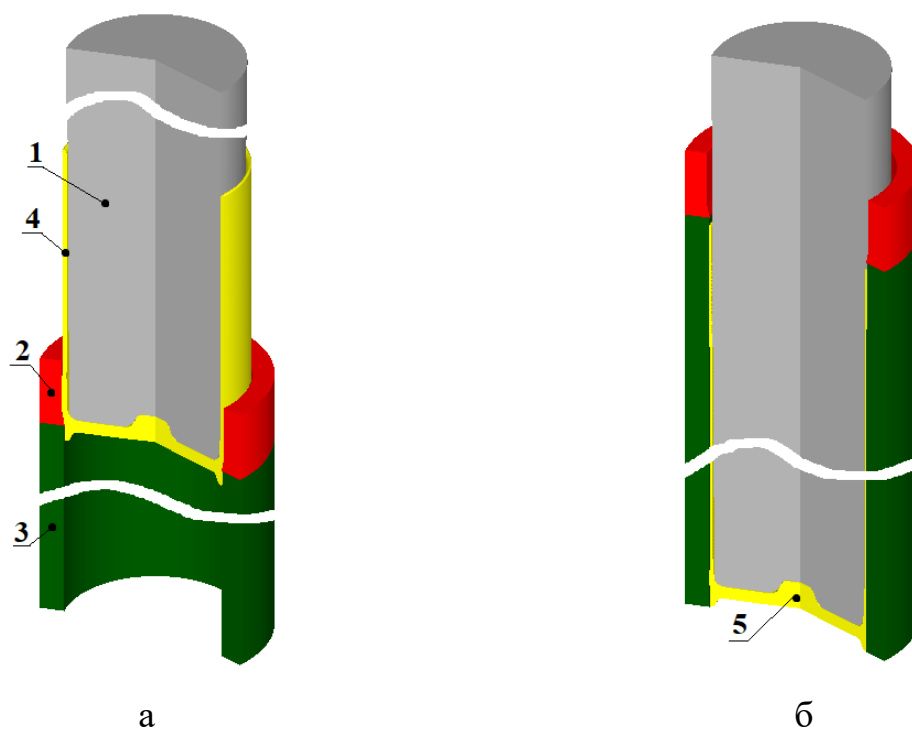
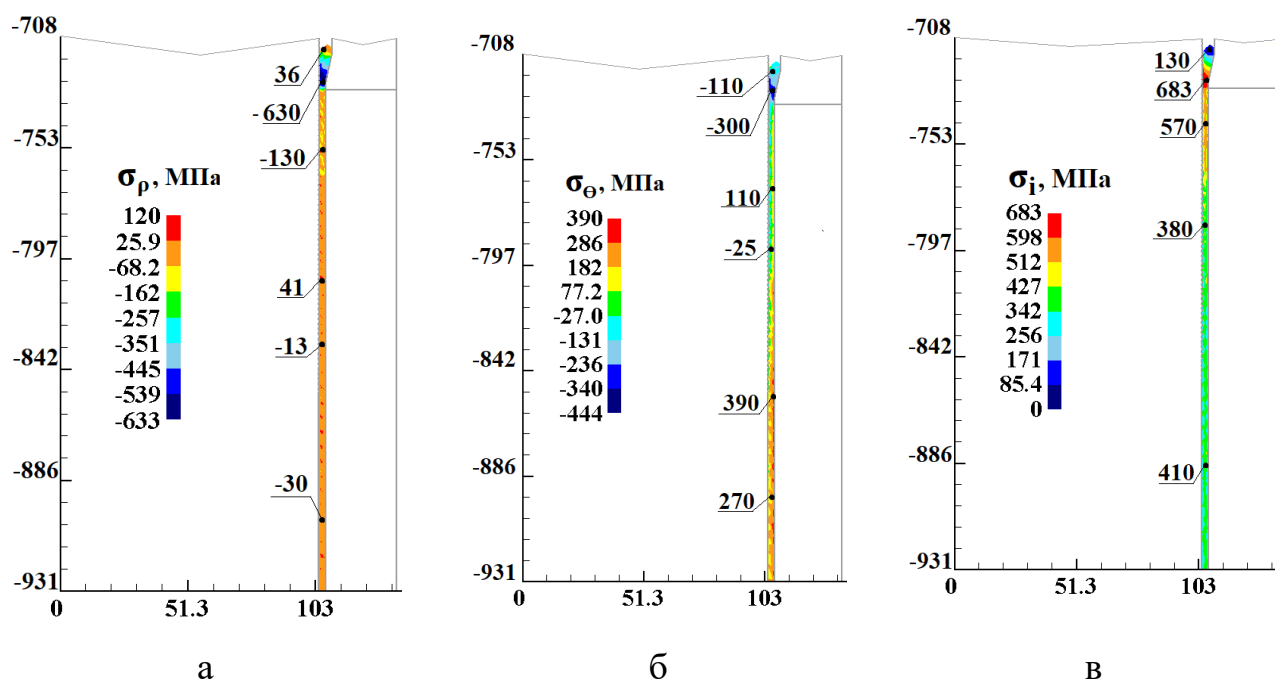


Рисунок Г.8 Розрахункові схеми в розрізі другого витягування з потоншенням:

а – початкове положення, б – в кінці витягування

Напружений стан при другому витягуванні з потоншенням верхня частина

Рисунок Г.9 Розподіли напружень та інтенсивності напружень у верхній частині напівфабрикату: а – розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , г - розподіл σ_i

Напружений стан при другому витягуванні з потоншенням середня частина

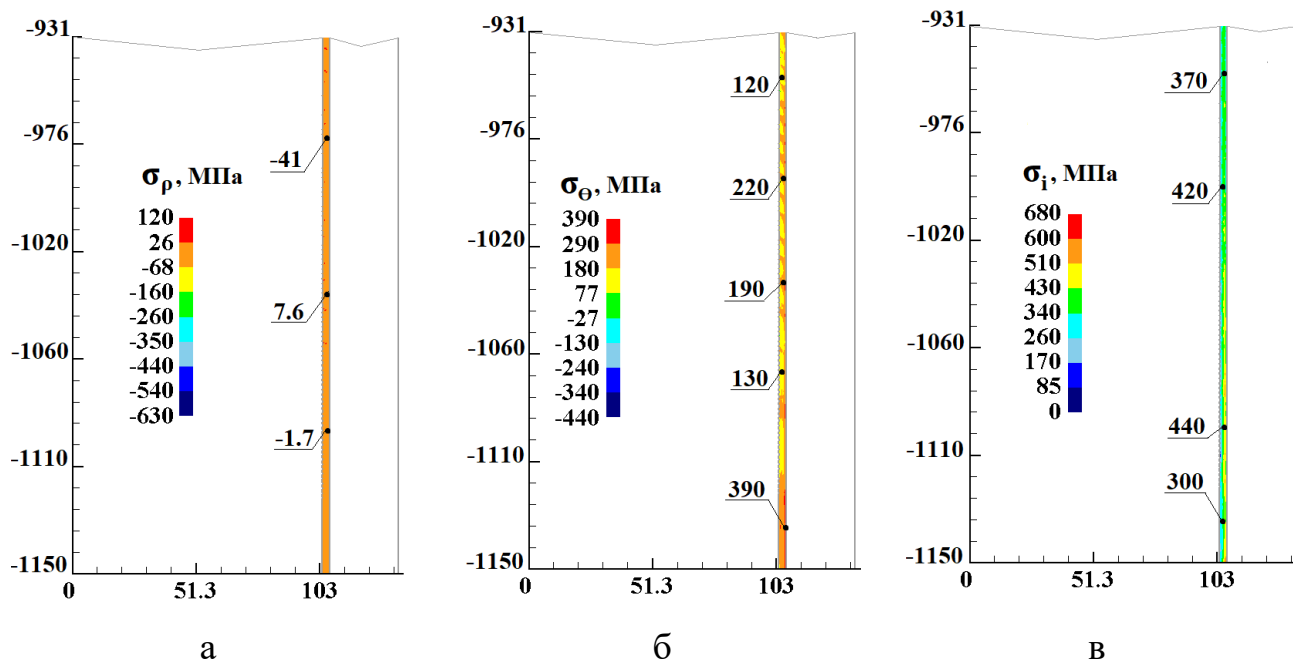


Рисунок Г.10 Розподіли напружень та інтенсивності напруження посередині напівфабрикату: а – розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_i

Напружений стан при другому витягуванні з потоншенням нижня частина

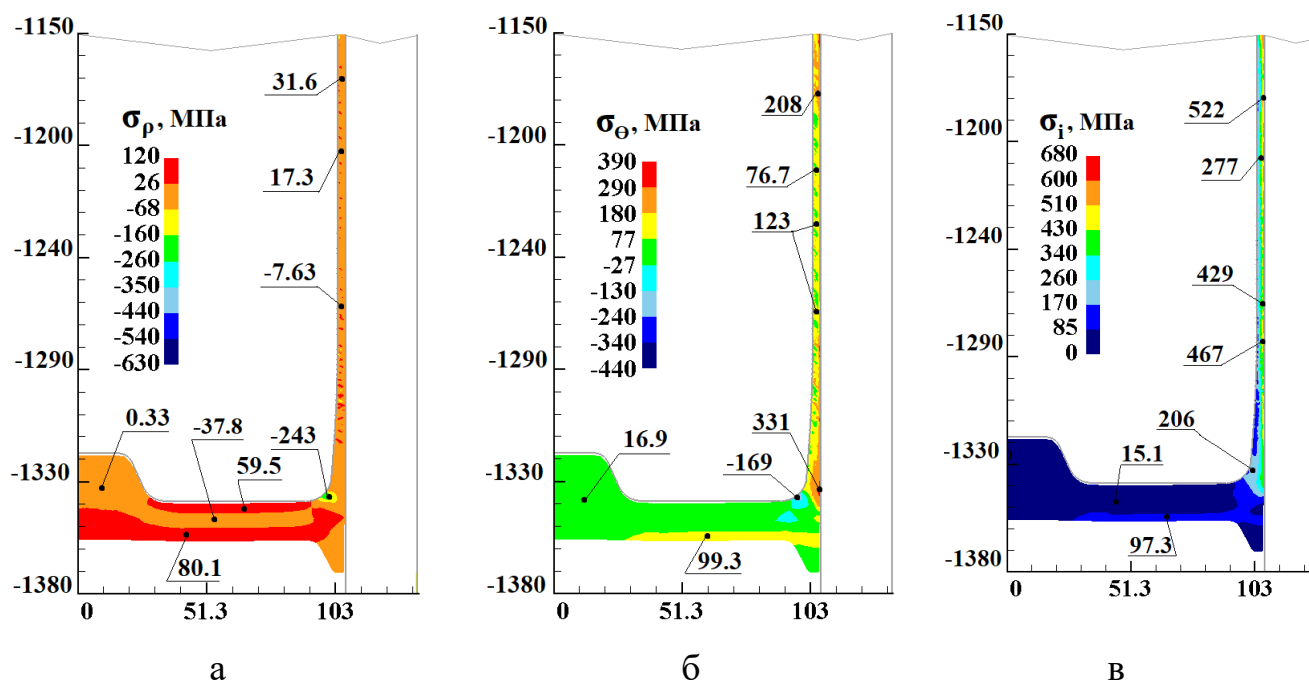


Рисунок Г.11 Розподіли напружень та інтенсивності напружень в нижній частині напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_i

Деформований стан при другому витягуванні з потоншенням верхня частина

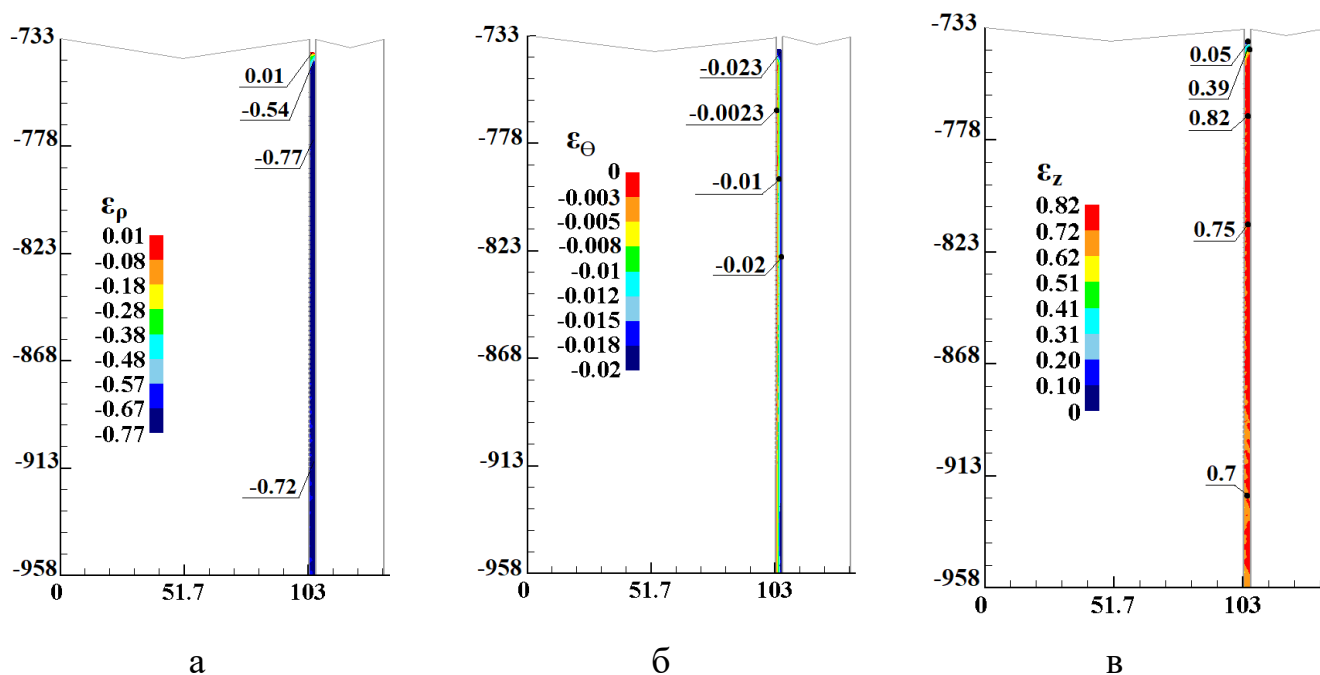


Рисунок Г.12 Розподіли деформацій по об'єму zdeформованого зверху напівфабрикату: а - розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в - розподіл ε_z

Деформований стан при другому витягуванні з потоншенням середня частина

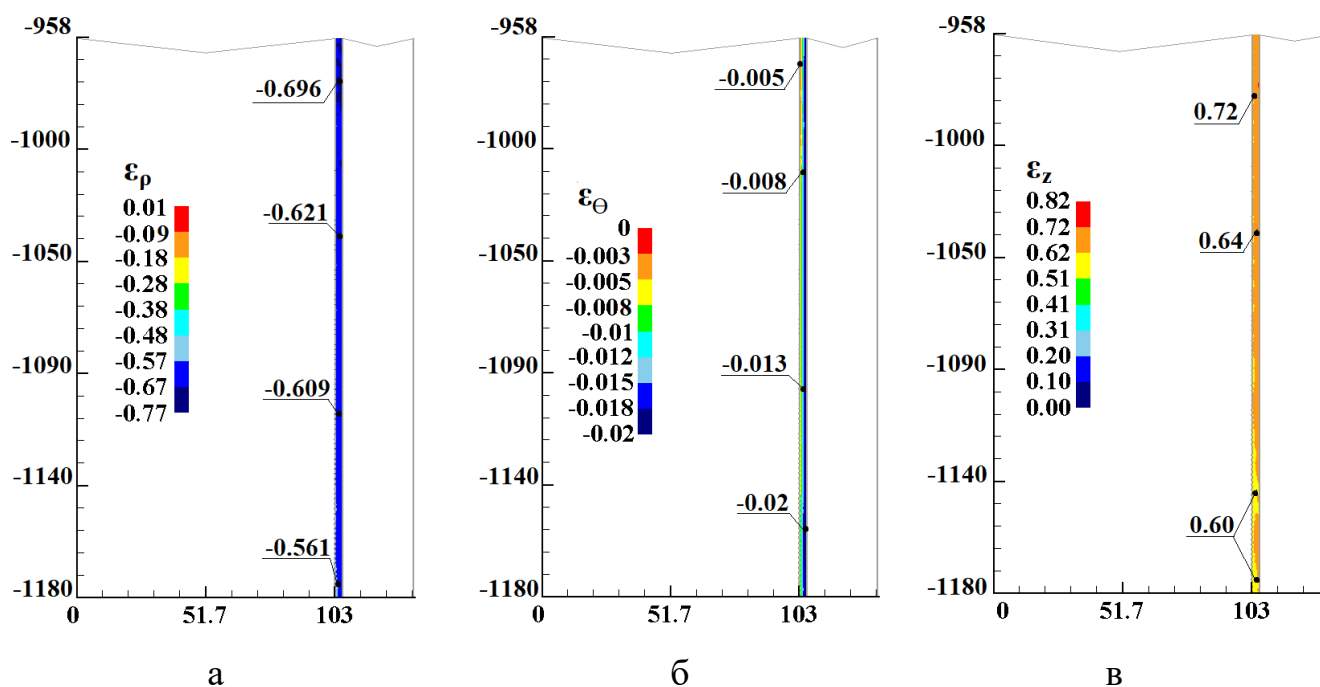


Рисунок Г.13 Розподіли деформацій по об'єму zdeформованого в середній частині напівфабрикату: а - розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в - розподіл ε_z

Деформований стан при другому витягуванні з потоншенням нижня частина

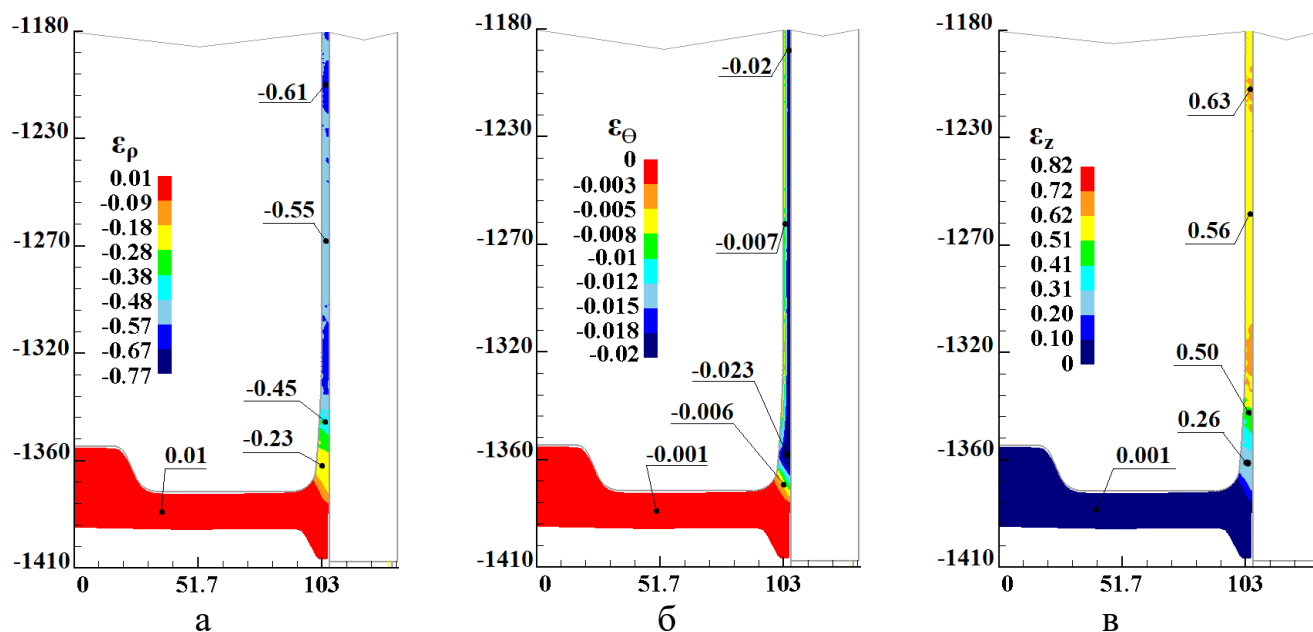


Рисунок Г.14 Розподіли деформацій по об'єму zdeформованого в нижній частині напівфабрикату: а – розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в – розподіл ε_z

Третє витягування з потоншенням

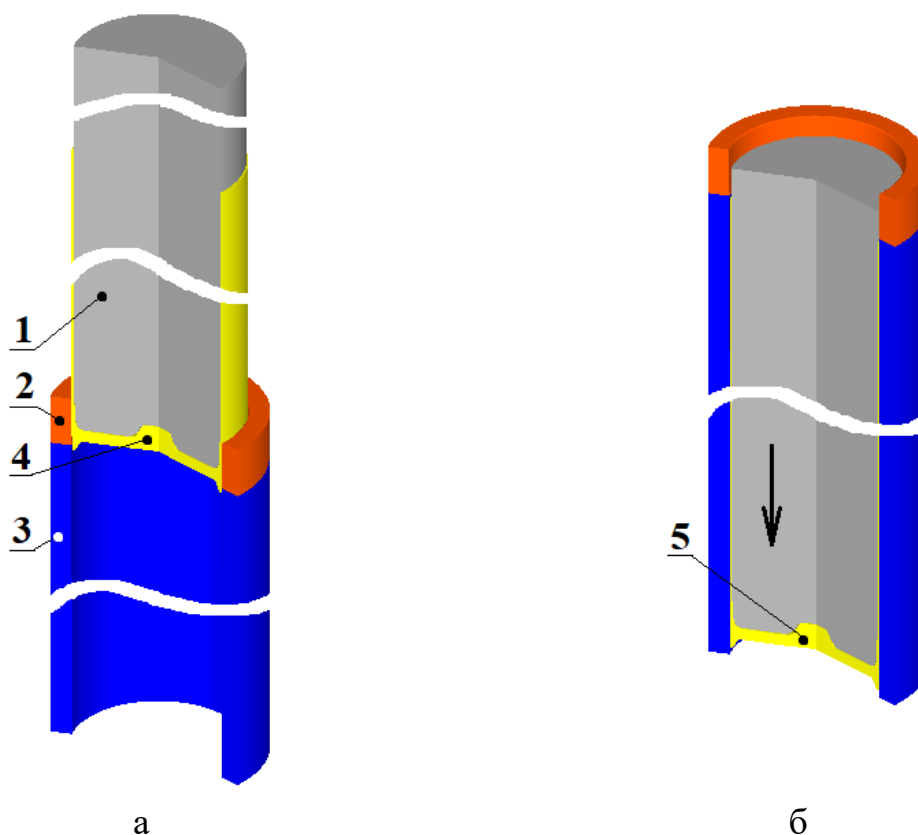


Рисунок Г.15 Розрахункові схеми в розрізі витягування з потоншенням: а – початкове положення, б – в кінці витягування

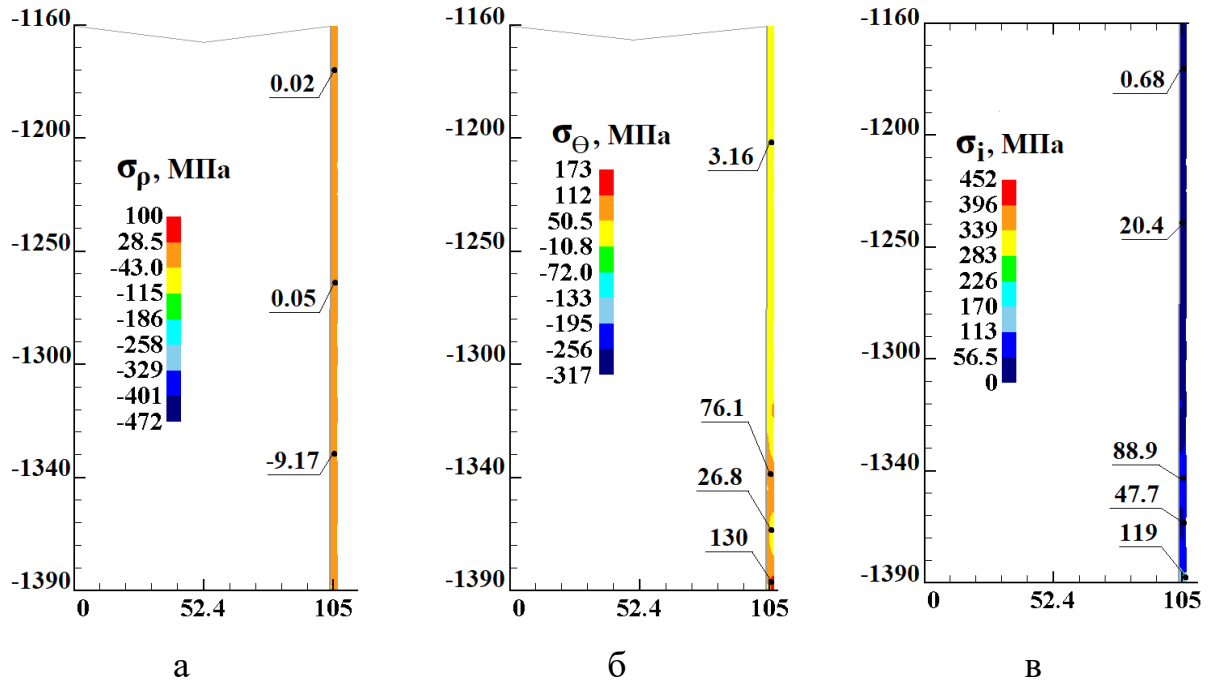


Рисунок Г.16 Розподіли напружень та інтенсивності напружень у верхній частині напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_i

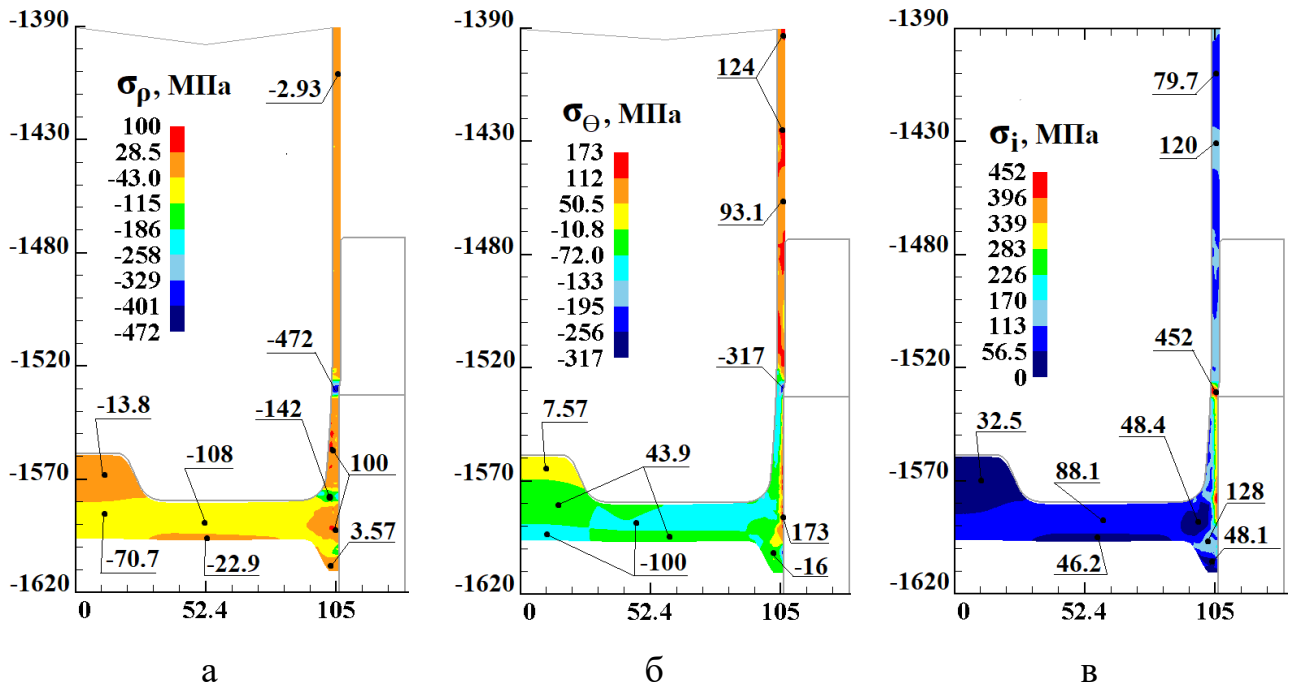


Рисунок Г.17 Розподіли напружень та інтенсивності напруження в нижній частині напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б - розподіл σ_θ , в - розподіл σ_i

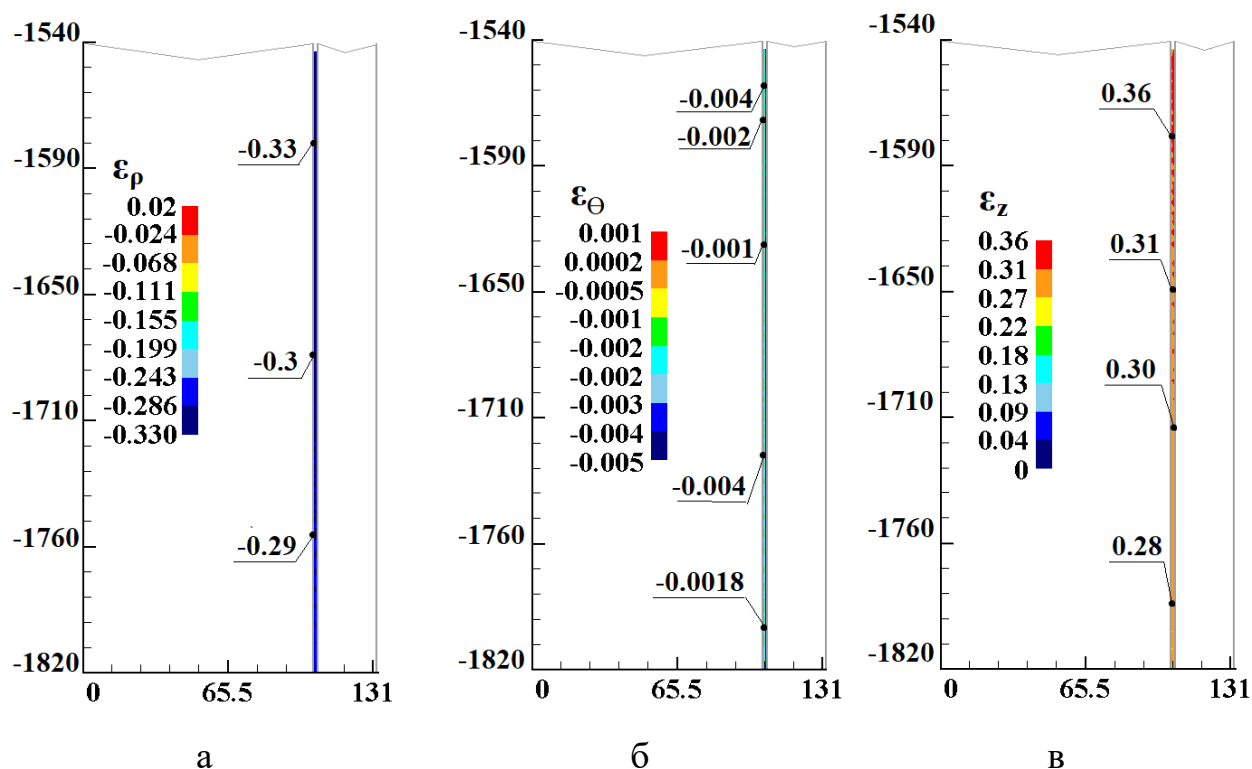


Рисунок Г.18 Розподіли деформацій по об'єму zdeформованого зверху напівфабрикату: а – розподіл ε_ρ , б – розподіл ε_θ , в – розподіл ε_z

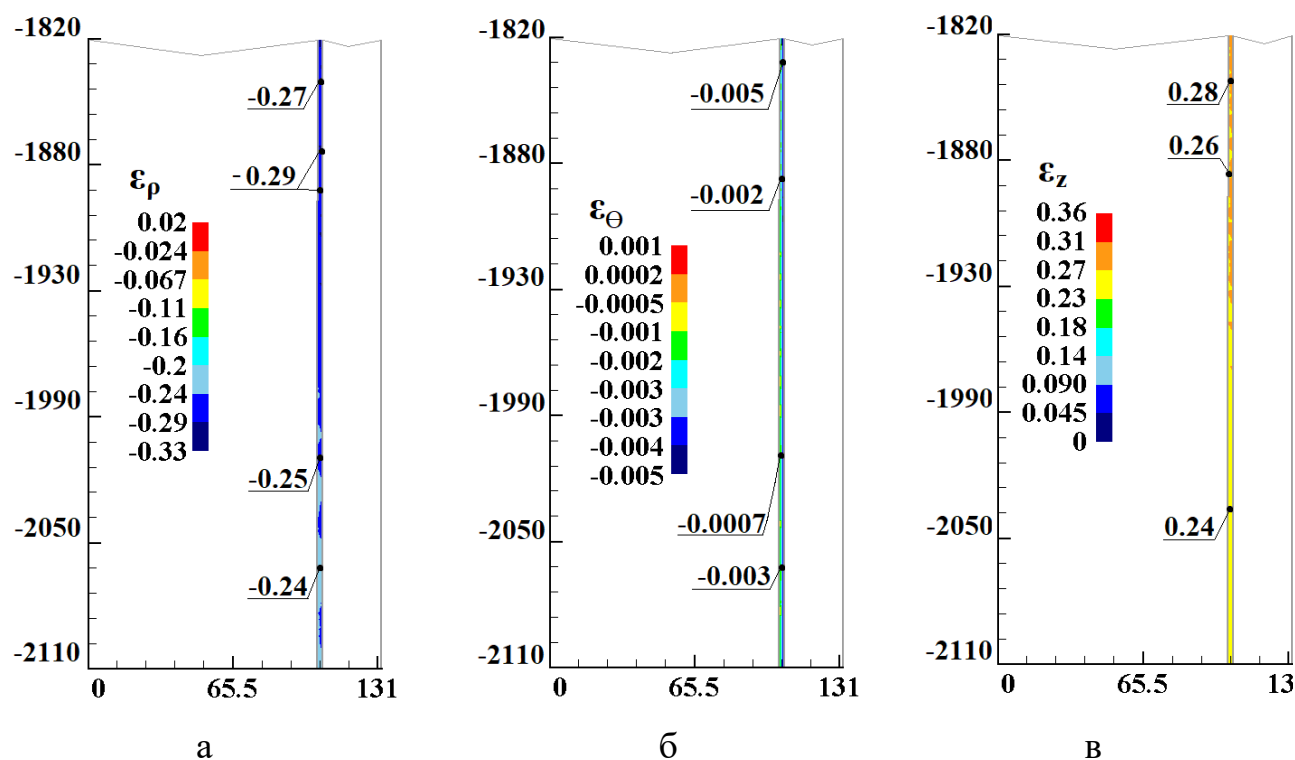


Рисунок Г.19 – Розподіли деформацій по об'єму zdeформованого в середній частині напівфабрикату: а - розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в – розподіл ε_z

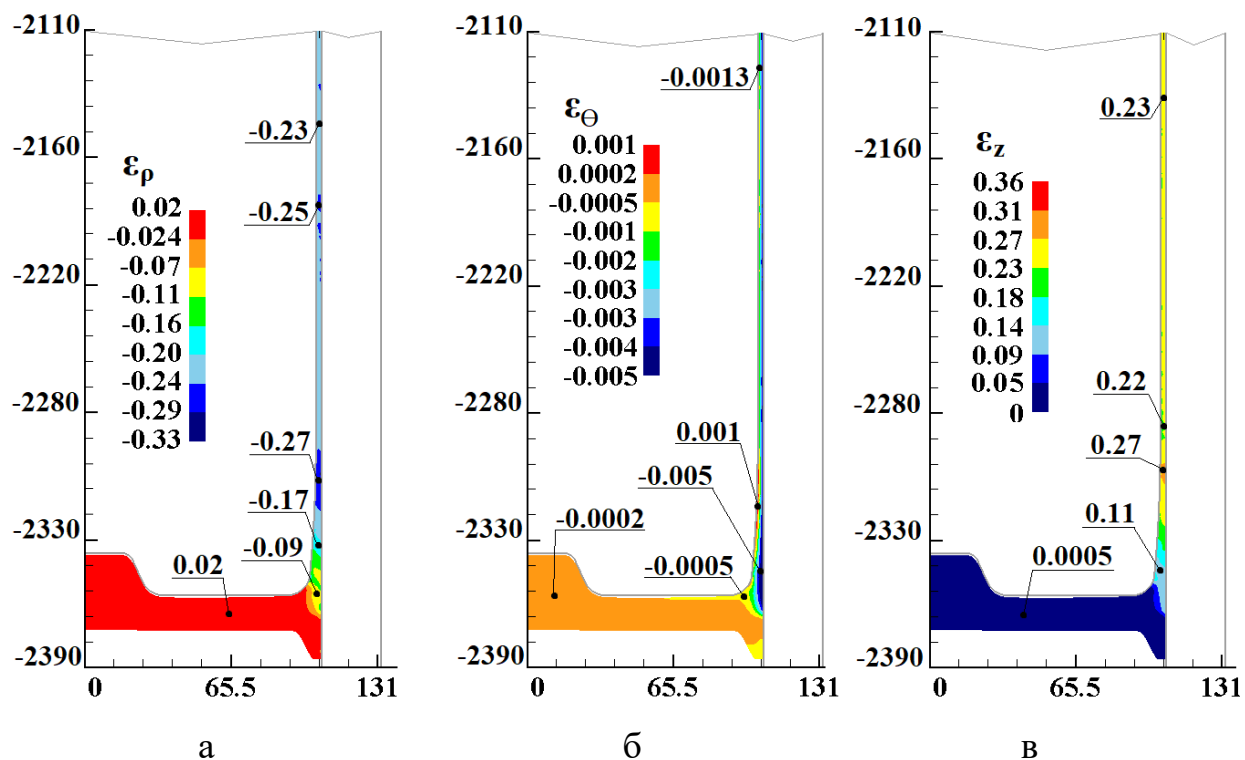
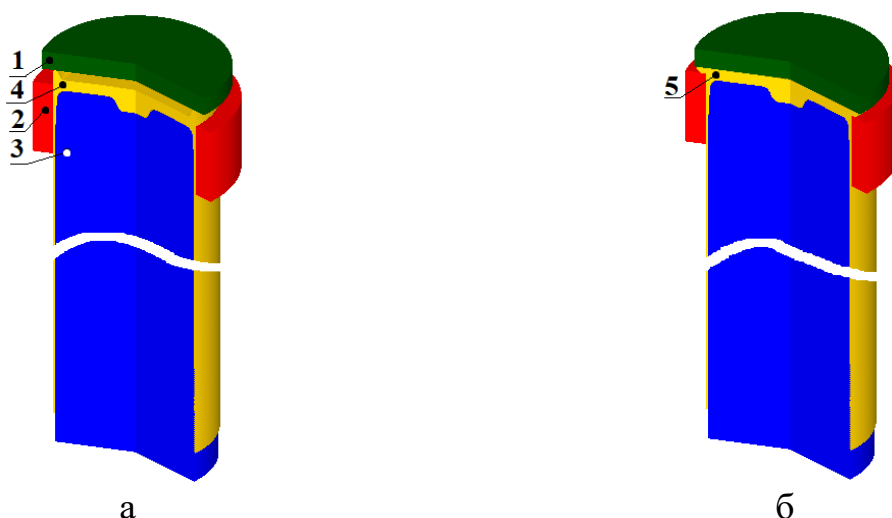


Рисунок Г.20 Розподіли деформацій по об'єму zdeформованого в нижній частині напівфабрикату: а - розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в – розподіл ϵ_z

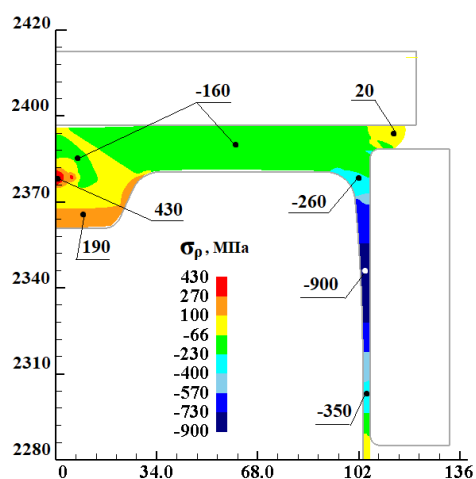
Результати розрахунків по осаджуванню фланця



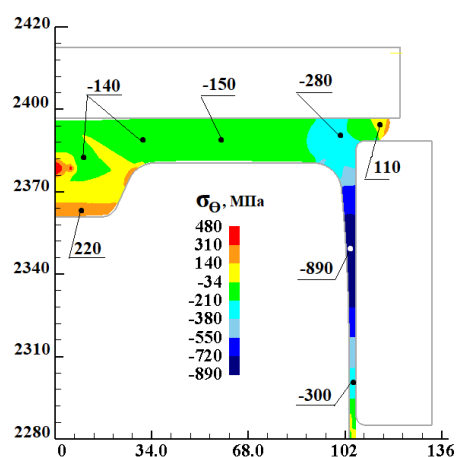
а

б

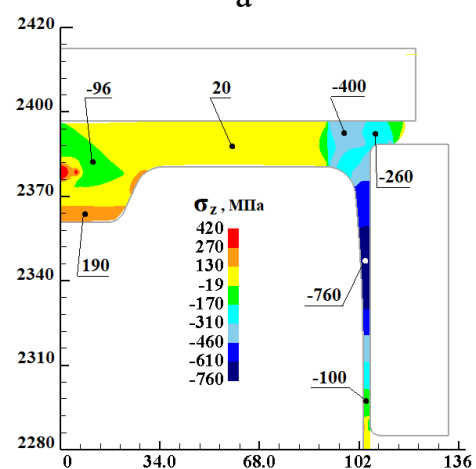
Рисунок Д.1 Розрахункові схеми осаджування фланця: а – на початку, б – в кінці



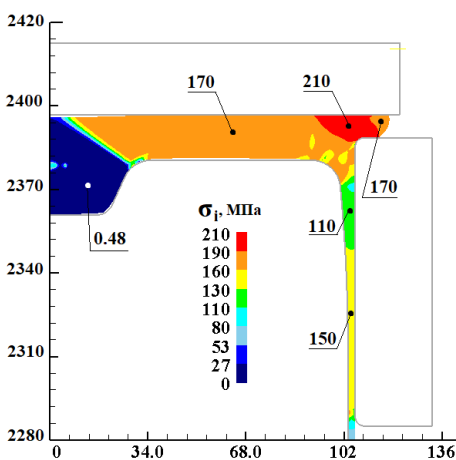
а



б



в



г

Рисунок Д.2 Розподіли напружень та інтенсивності напруження зверху напівфабрикату: а - розподіл σ_r , б - розподіл σ_θ , в – розподіл σ_z , г - розподіл σ_i

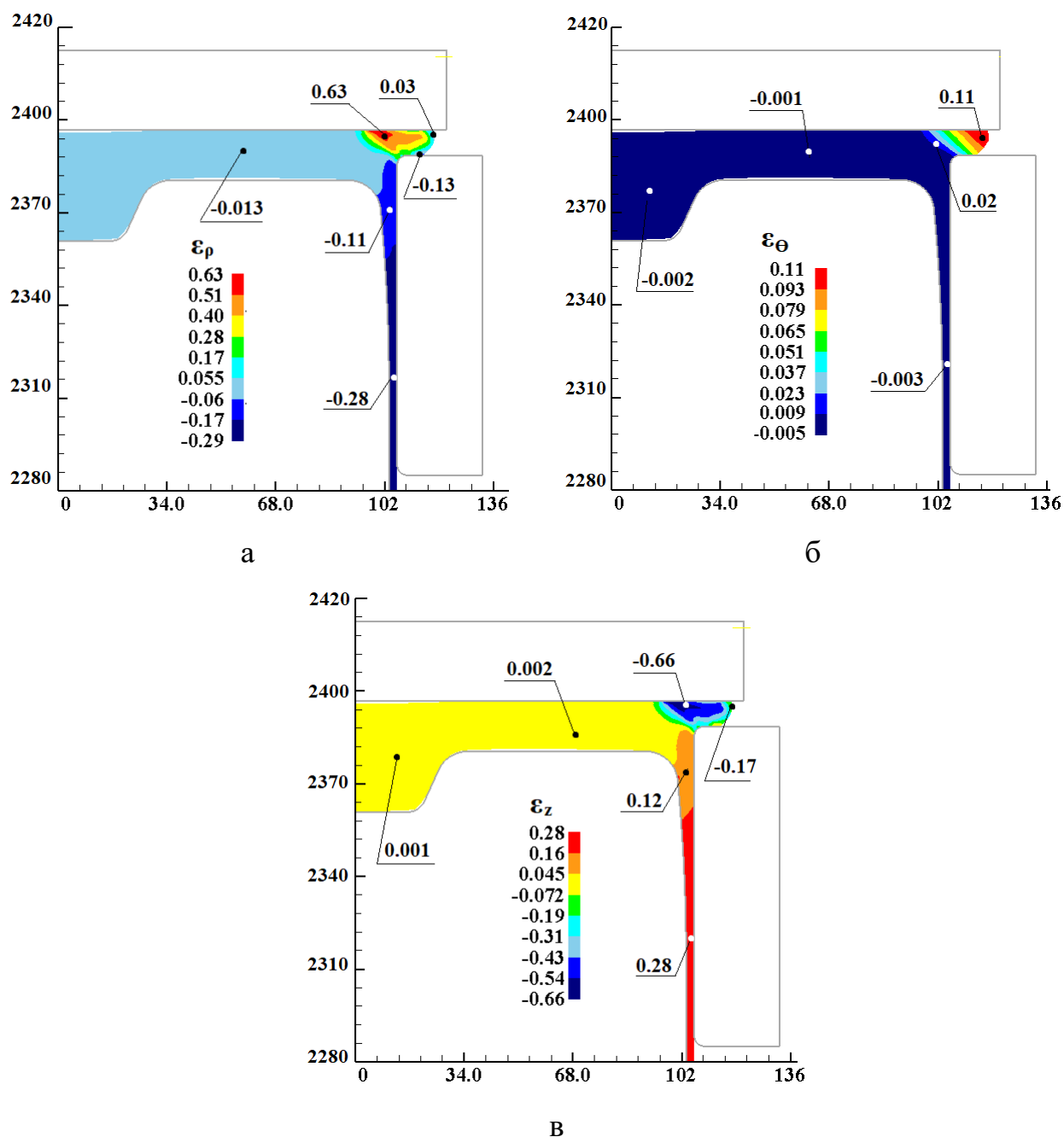


Рисунок Д.3 Розподіли деформацій по об'єму здеформованого знизу напівфабрикату: а – розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в – розподіл ϵ_z

Результати розрахунків по обтиску

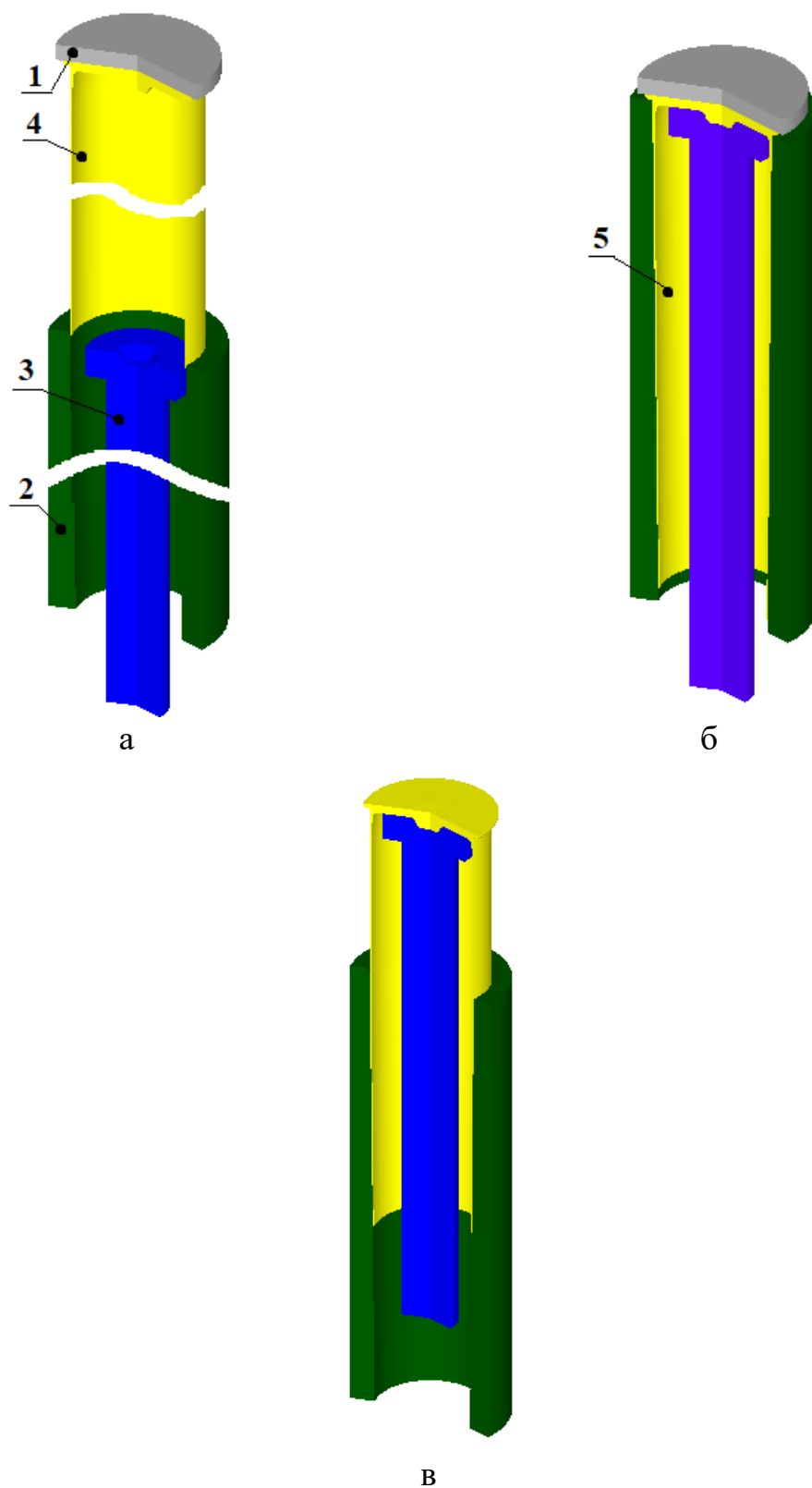


Рисунок Е.1 Розрахункові схеми обтиску тонкостінного напівфабрикату: а – на початку, б – в кінці, в – виштовхування напівфабрикату

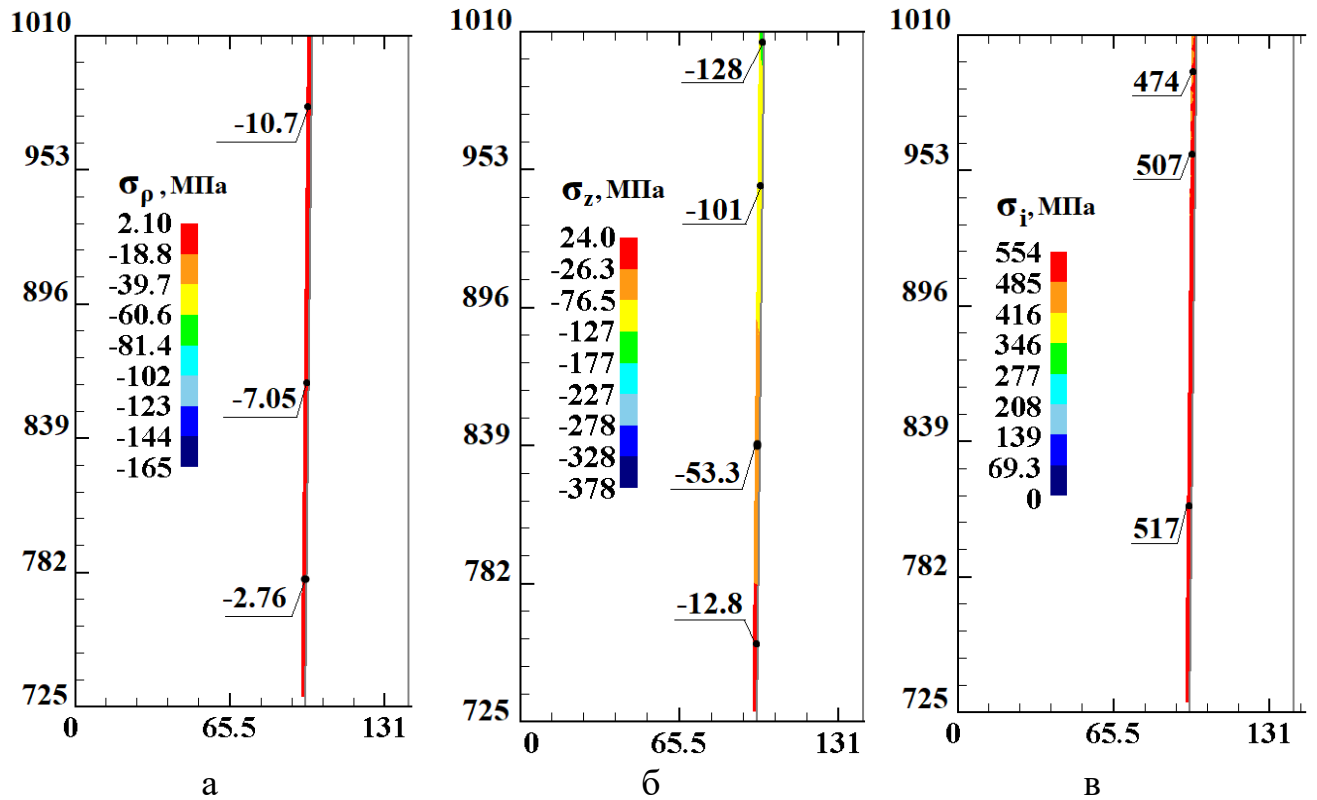


Рисунок Е.2 Розподіли напружень та інтенсивності напруження зверху напівфабрикату: а – розподіл σ_ρ , б – розподіл σ_z , в - розподіл σ_i

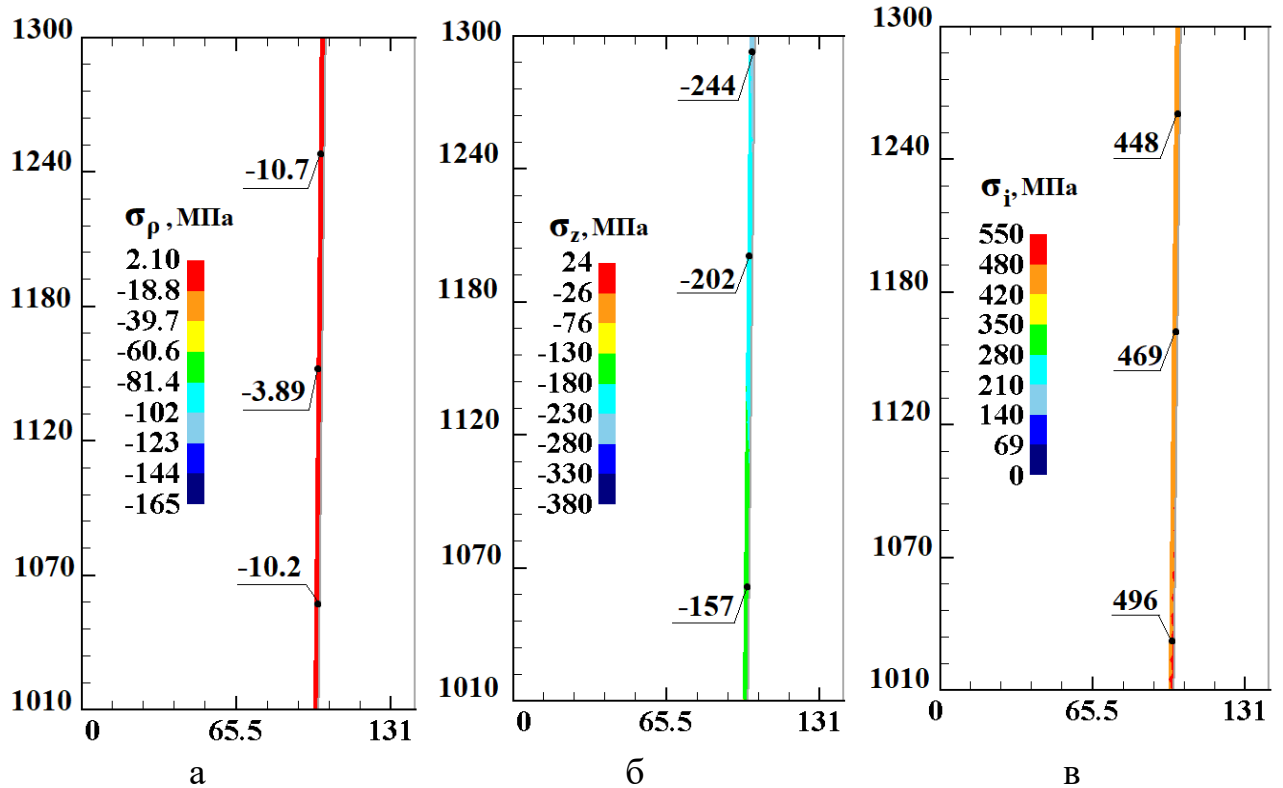


Рисунок Е.3 Розподіли напружень та інтенсивності напруження в середній частині напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б – розподіл σ_z , в - розподіл σ_i

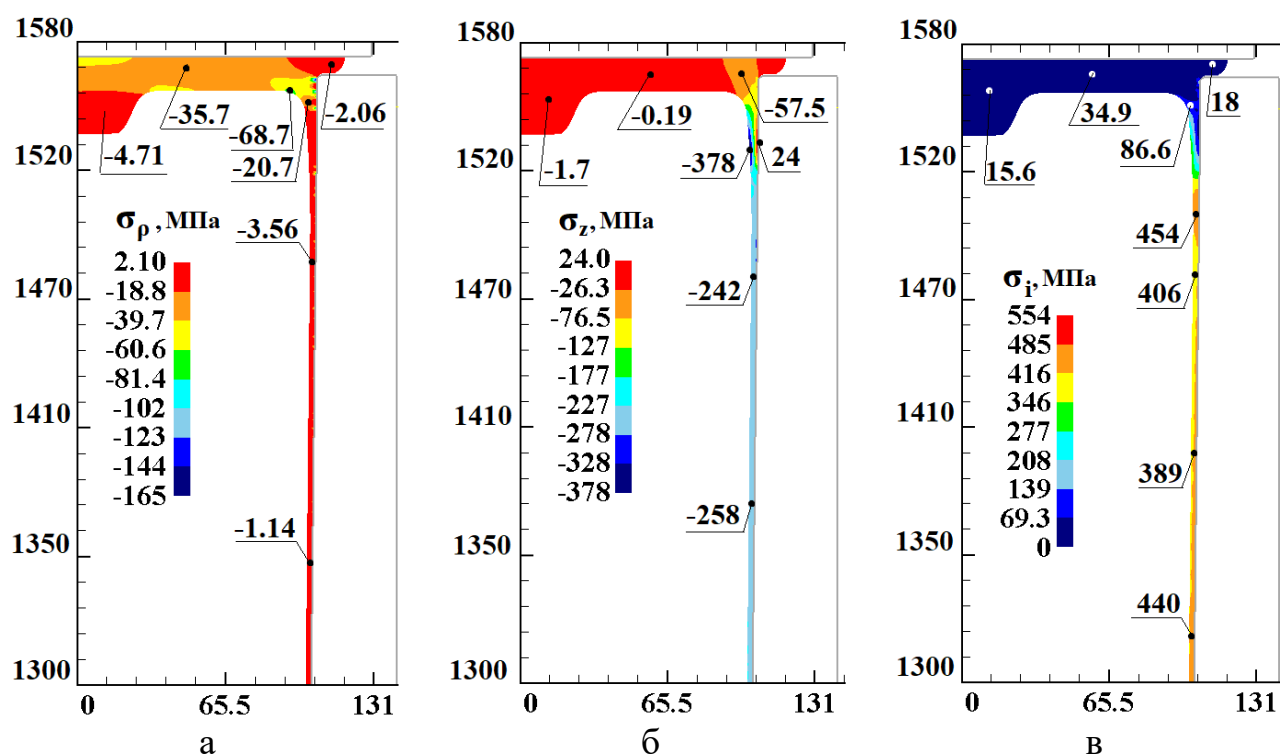


Рисунок Е.4 Розподіли напружень та інтенсивності напруження в нижній частині напівфабрикату: а - розподіл σ_ρ , б – розподіл σ_z , в - розподіл σ_i

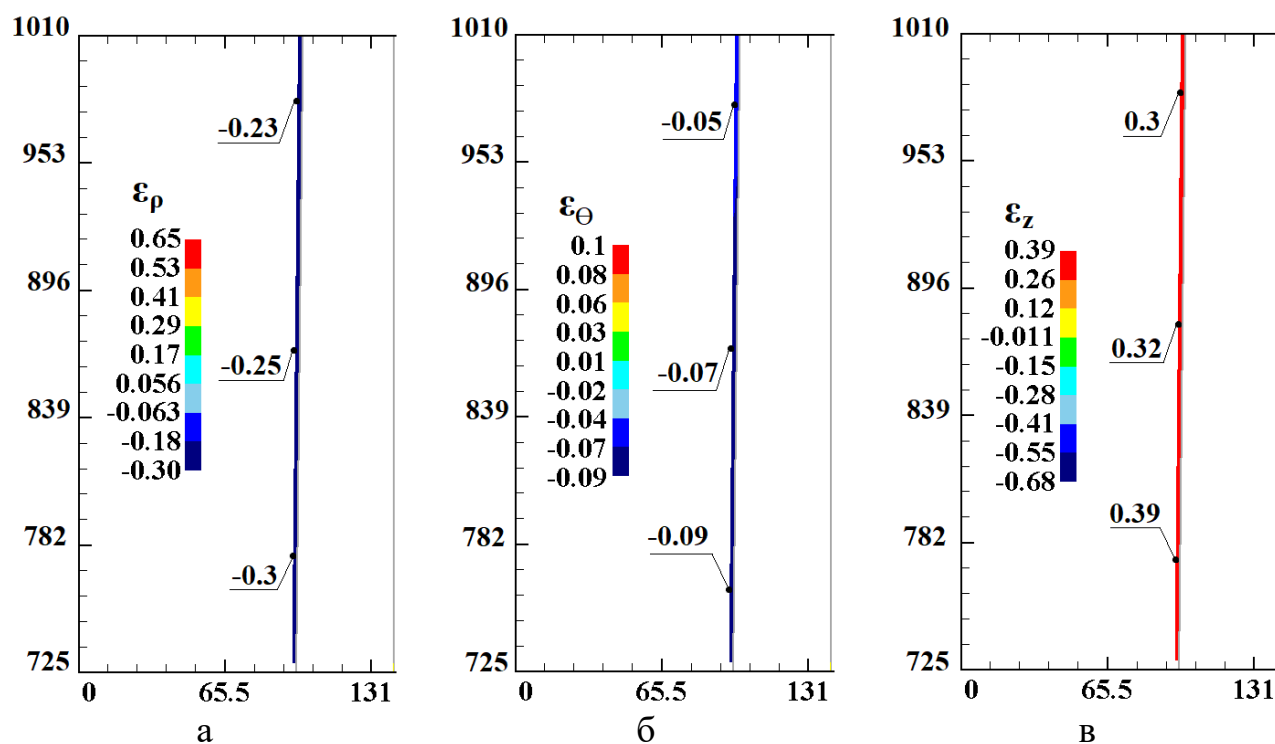


Рисунок. Е.5 Розподіли деформацій та інтенсивності деформацій по об'єму zdeформованого зверху напівфабрикату: а - розподіл ϵ_ρ , б - розподіл ϵ_θ , в - розподіл ϵ_z

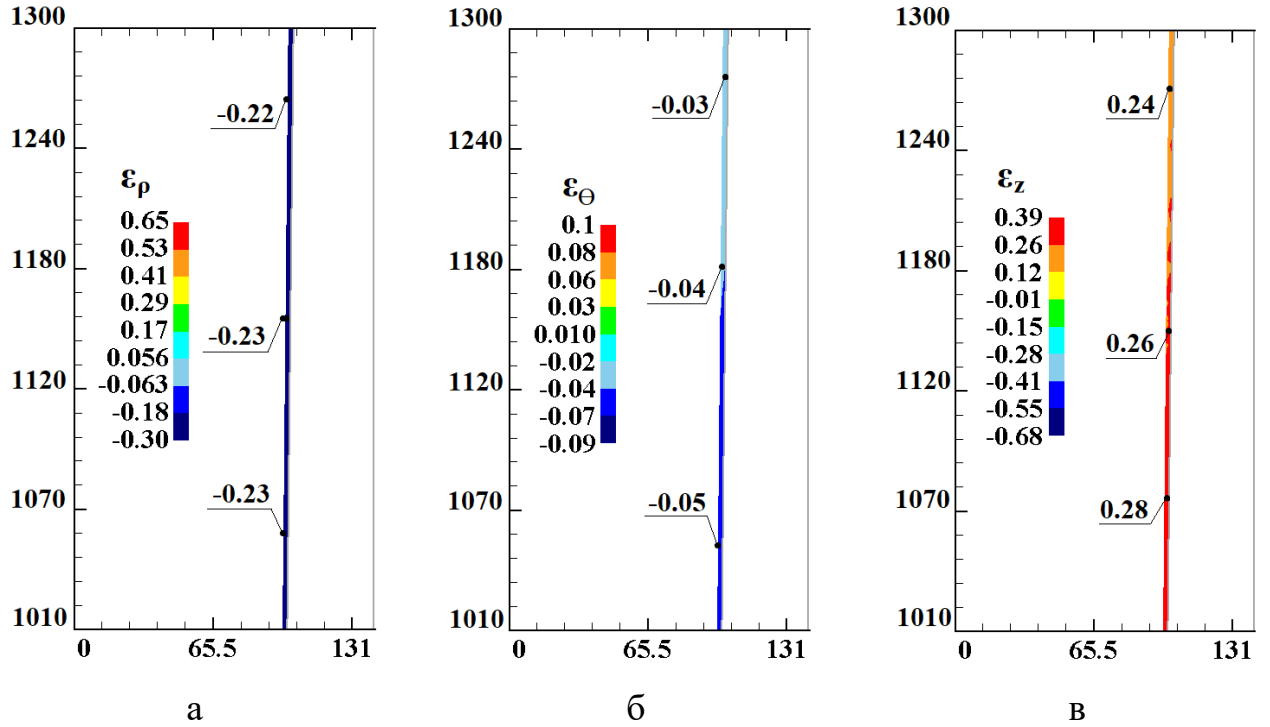


Рисунок. Е.6 Розподіли деформацій по об'єму здеформованого посередині напівфабрикату: а – розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в – розподіл ε_z

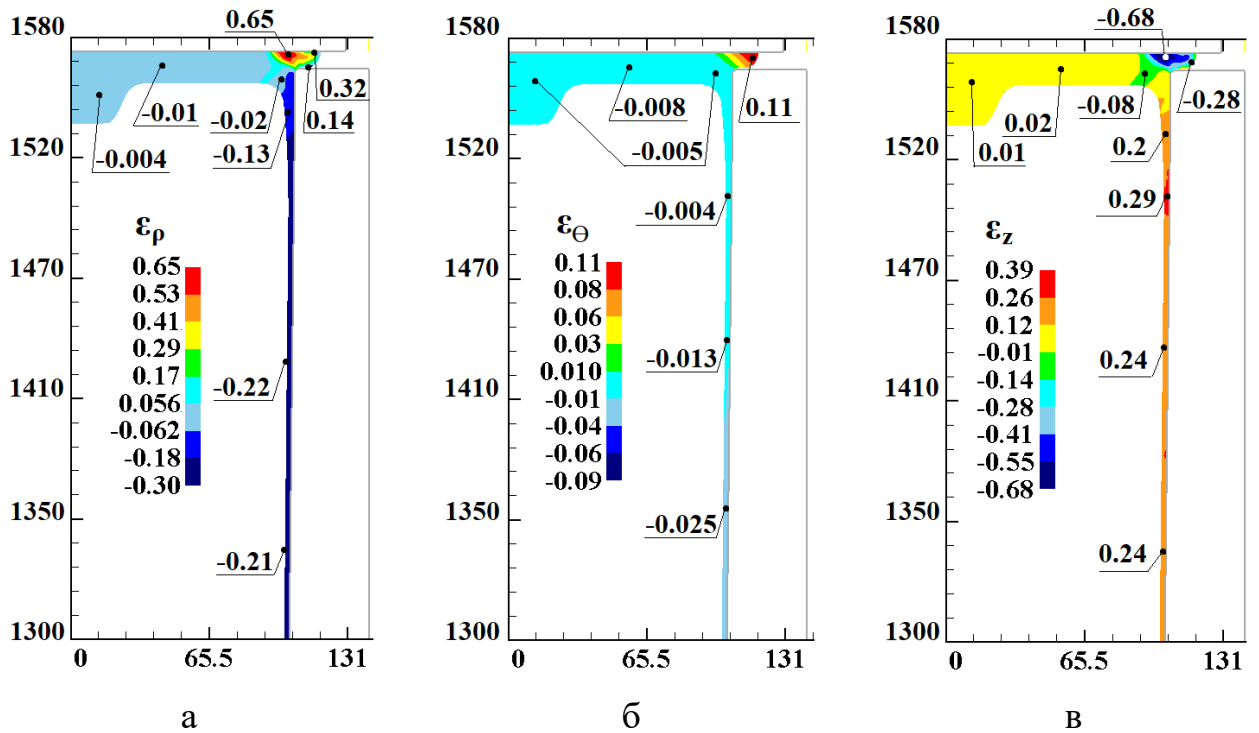


Рисунок. Е.7 Розподіли деформацій по об'єму здеформованого внизу напівфабрикату: а – розподіл ε_ρ , б - розподіл ε_θ , в – розподіл ε_z

Заготовка
(1 : 2)

1 h12, H12, ±IT12/2
2 Матеріал: Латунь /170 ГОСТ 15527-70

Операційний ескіз
(1 : 2)

1 h12, H12, ±IT12/2

Б-Б

Лист №	Всього	Дата	Версія	Деталь	Масштаб	Лист	Всего	Печатать
1	1	17.04.97	1	Штамповка для горячей обработки	1:2	1	1	1

1 *Закрита висота H=5414мм
2 Штмпл встановити на прес Т.1000 4С зусиллям 9,8 МН
3 Задавання заготовки вручну
4 Додати штамп виштовкувача підняти для підключення до нижнього циліндра преса

Рисунок Ж.1. Штамп для гарячого осаджування

Перф. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание					
Спроб. №		A1				<u>Документация</u>							
						<u>Складальне креслення</u>							
						<u>Детали</u>							
					1	Плита верхня	1						
					2	Втулка направляюча	4						
					3	Пуансонотримач	8						
					4	Пуансон	1						
					5	Підкладна плита	1						
					6	Конічна направляюча	1						
					7	Втулка центрувальна	1						
					8	Плита нижня	4						
					9	Колонка	1						
					10	Матриця	1						
					11	Бандаж	1						
					12	Притискна пластина	1						
					Підп. і дата					13	Виштовхувач	8	
										14	Втулка направляюча	8	
15	Шток виштовхувача	32											
16	Центруюче кільце	1											
17	Заготовка	1											
Взам. інф. №													
Підп. і дата													
Інф. № подл.					Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					Разраб.	Ярмоленко							
					Пров.								
					Н.контр.								
					Утв.								
Штамп для горячего осаджування						Лит.	Лист	Листов					
							1	2					

Копировал

Формат A4

Рисунок Ж.2 Специфікація штамп для гарячого осаджування

[illegible]

Рисунок Ж.3 Специфікація штамп для гарячого осаджування

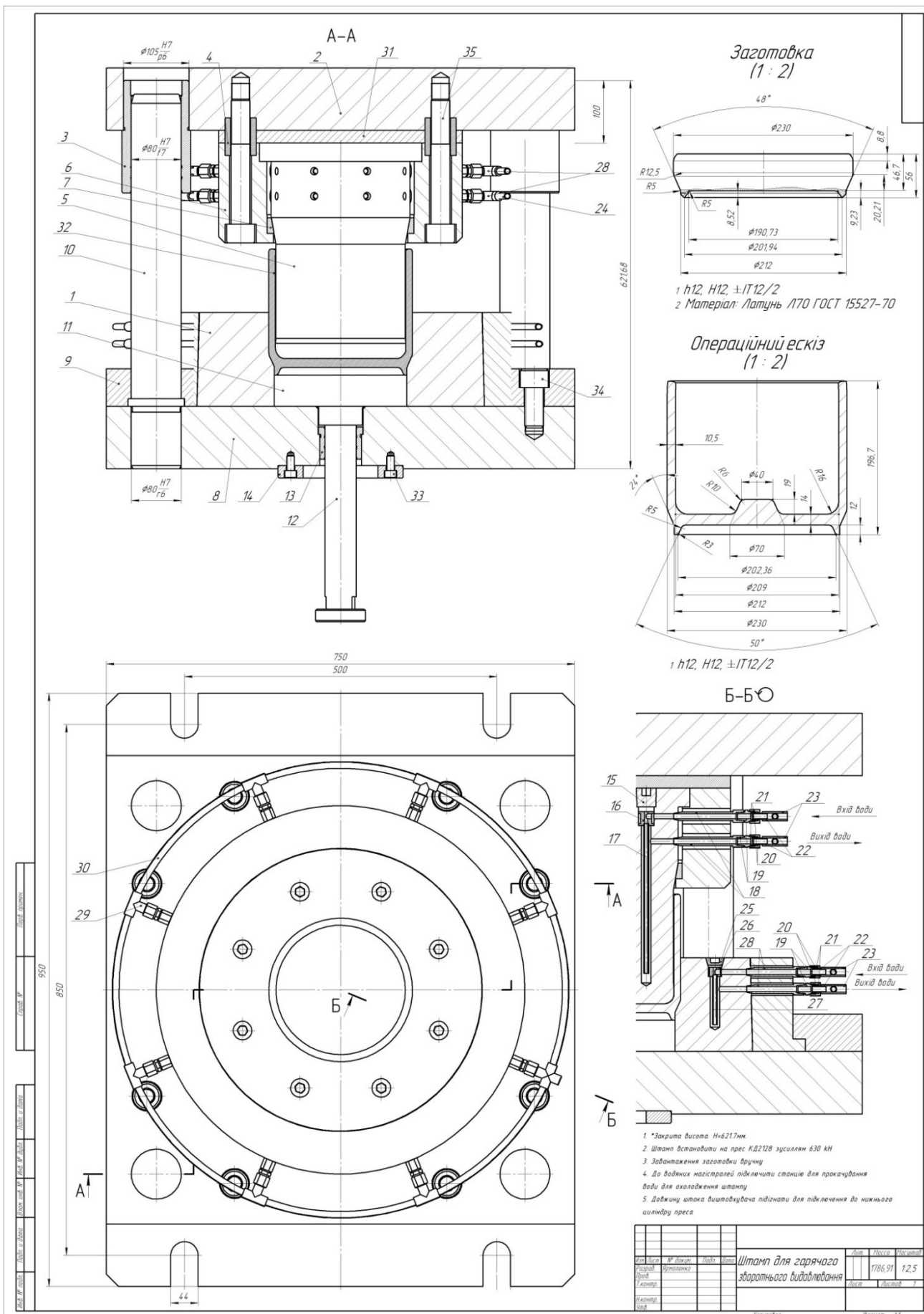


Рисунок Ж.4 Штамп для горячего зворотного видавлювання

Перв. примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
Справ. №	A1				Документация			
					Складальне креслення			
					Сборочные единицы			
			1		Матриця бандажована	1		
					Детали			
			2		Плита верхня	1		
			3		Втулка направляюча	4		
			4		Втулка центруюча	8		
			5		Пуансон	1		
			6		Пуансоноутримач	1		
			7		Конічна направляюча	1		
			8		Плита нижня	1		
			9		Притискна плита	1		
			10		Колонка	4		
Підп. і дата			11		Виштовхувач	1		
			12		Шток виштовхувача	1		
			13		Втулка направляюча	1		
			14		Центруюче кільце	1		
			15		Пробка конічна	8		
			16		Втулка	8		
			17		Трубка	8		
			18		Трубка подовжувач	16		
			19		Штуцер конічний	32		
	Взам. инв. №							
Підп. і дата								
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Штамп для гарячого зворотного видавлювання		
	Разраб.	Ярошенко						
	Пров.							
	Н.контр.							
	Утв.							
Лит.	Лист	Листов						

Копіював
Формат A4

Рисунок Ж.5 Штмп для гарячого зворотного видавлювання специфікація (лист 1)

[illegible]

Рисунок Ж.6 Штмп для гарячого зворотного видавлювання специфікація (лист 2)

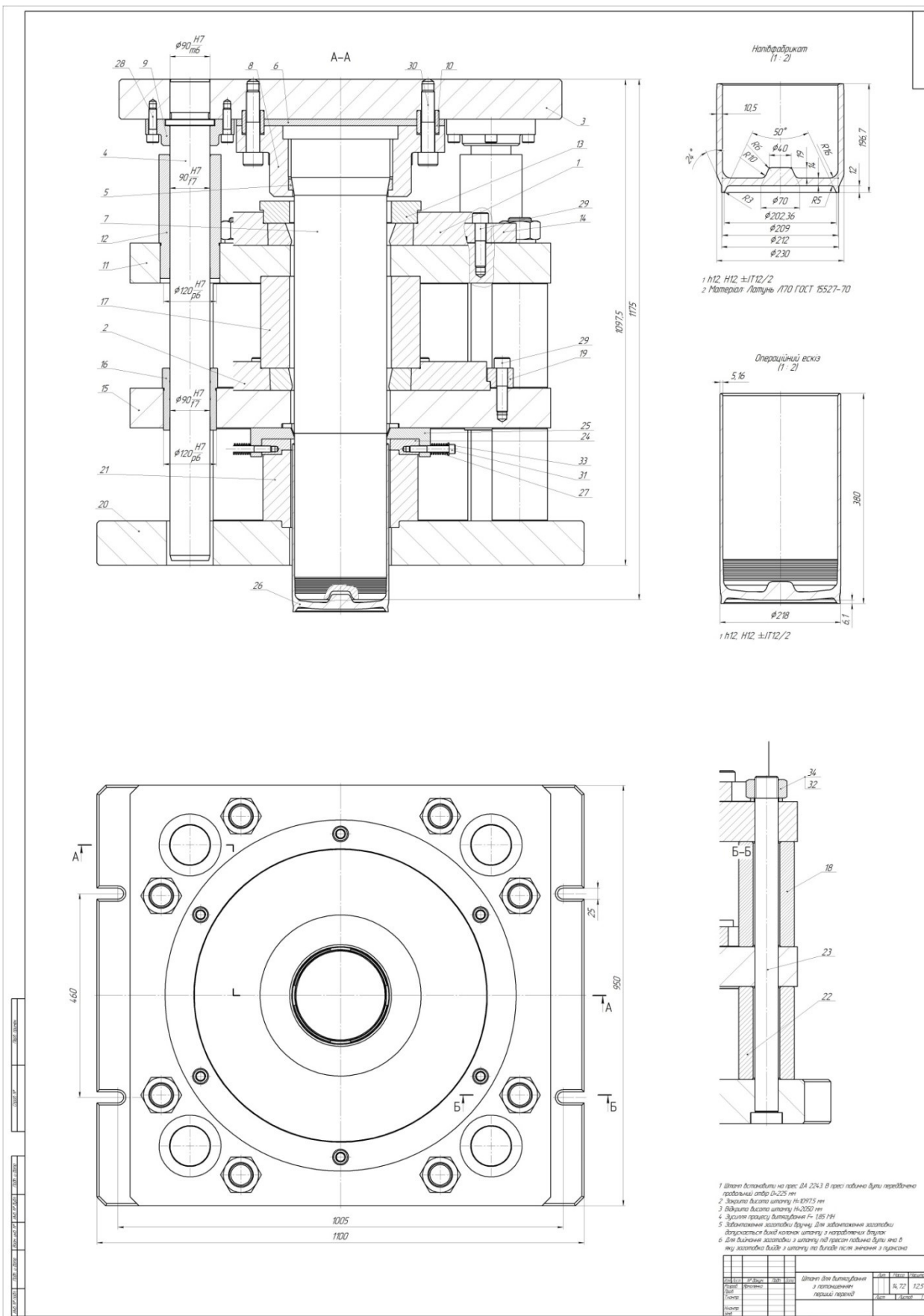


Рисунок Ж.7 Штмп для витягування з потоншенням перший перехід

Рисунок Ж.8 Штамп для витягування з потоншенням перший перехід
специфікація (лист 1)

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № подл.	Подп. и дата

Рисунок Ж.9 Штамп для витягування з потоншенням перший перехід
специфікація (лист 2)

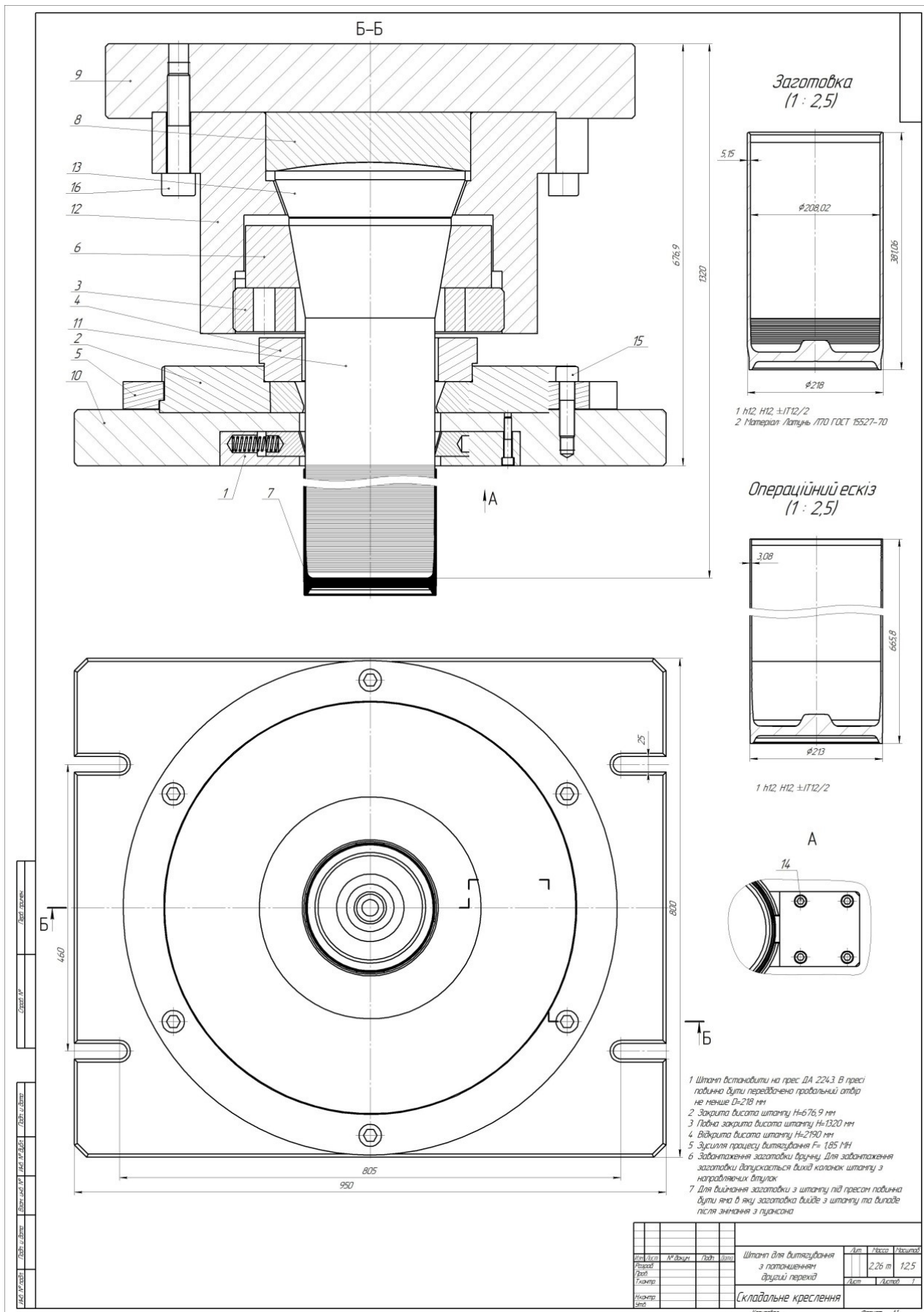


Рисунок Ж.10 Штамп для витягування з потоншенням другий перехід

Пер. прим.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание			
Справ. №	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата							
					A1				Документация		
									Складальне креслення		
									Сборочные единицы		
					Б/к	1			Знімач	4	
					Б/к	2			Матриця бандажована	1	
									Детали		
Б/к	3			Гайка	1						
Б/к	4			Кільце направляюче	1						
Б/к	5			Кільце прижимне	1						
Б/к	6			Конічна направляюча	1						
Б/к	7			Напіфабрикат	1						
Б/к	8			Підп'ятник	1						
Б/к	9			Плита верхня	1						
Б/к	10			Плита нижня	1						
Б/к	11			Пуансон	1						
Б/к	12			Пуансоноутримач	1						
Б/к	13			П'ята	1						
					Стандартные изделия						
					Винт М12-6дх65 ГОСТ 11738-84	1					
					Винт М24-6дх90 ГОСТ 11738-84	1					
					Винт М36-6дх160 ГОСТ 11738-84	1					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата							
	Изм.	Лист	№ док-м.	Подп.	Дата	Штамп для витягування з потоншенням другий перехід		Лит.	Лист	Листов	
Разроб.											
Проб.											
Н.контр.											
Утв.											

Копировав

Формат А4

Рисунок Ж.11 Штамп для витягування з потоншенням другий перехід
(специфікація)

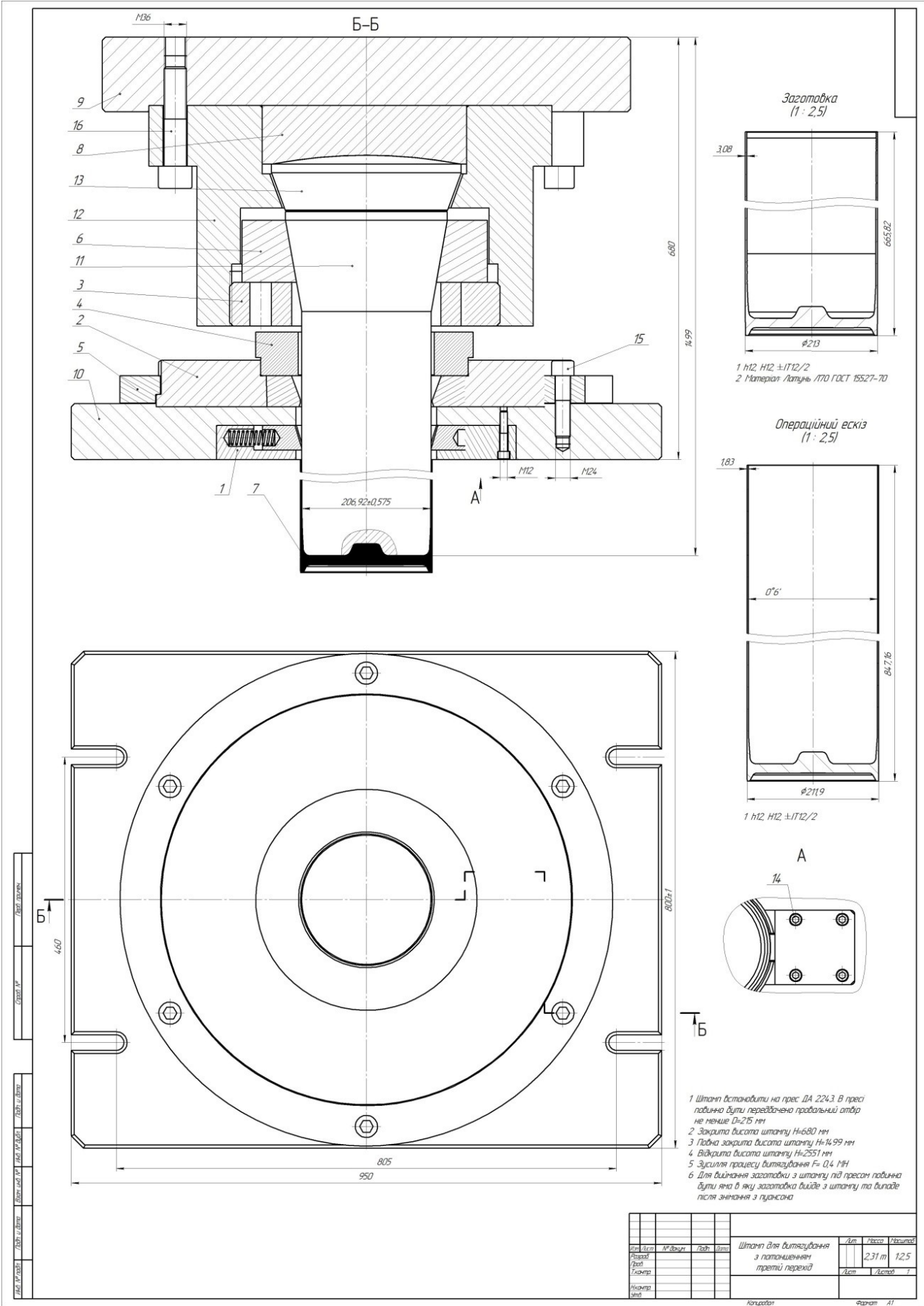


Рисунок Ж.12 Штамп для витягування з потоншенням третій перехід

Перв. примен.	Формат	Зона	Паз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
					<u>Документация</u>			
	A1				Складальне креслення			
					<u>Сборочные единицы</u>			
Справ. №	B/I		1		Знімач	4		
	B/I		2		Матриця бандажована	1		
					<u>Детали</u>			
	B/I		3		Гайка	1		
	B/I		4		Кільце направляюче	1		
	B/I		5		Кільце прижимне	1		
	B/I		6		Конічна направляюча	1		
	B/I		7		Напіфабрикат	1		
	B/I		8		Підп'ятник	1		
	B/I		9		Плита верхня	1		
	B/I		10		Плита нижня	1		
	B/I		11		Пуансон	1		
Подп. и дата	B/I		12		Пуансонодержатель	1		
	B/I		13		П'ята	1		
					<u>Стандартные изделия</u>			
					Винт М12-6х65 ГОСТ 11738-84	1		
					Винт М24-6х90 ГОСТ 11738-84	1		
					Винт М36-6х160 ГОСТ 11738-84	1		
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Штамп для витягування з потоншенням третій перехід		
	Разраб.							
	Проб.							
	Н.контр.							
	Утв.							
						Лит.	Лист	Листов
								1

Копировал _____ Формат A4

Рисунок Ж.13 Штамп для витягування з потоншенням третій перехід
(специфікація)

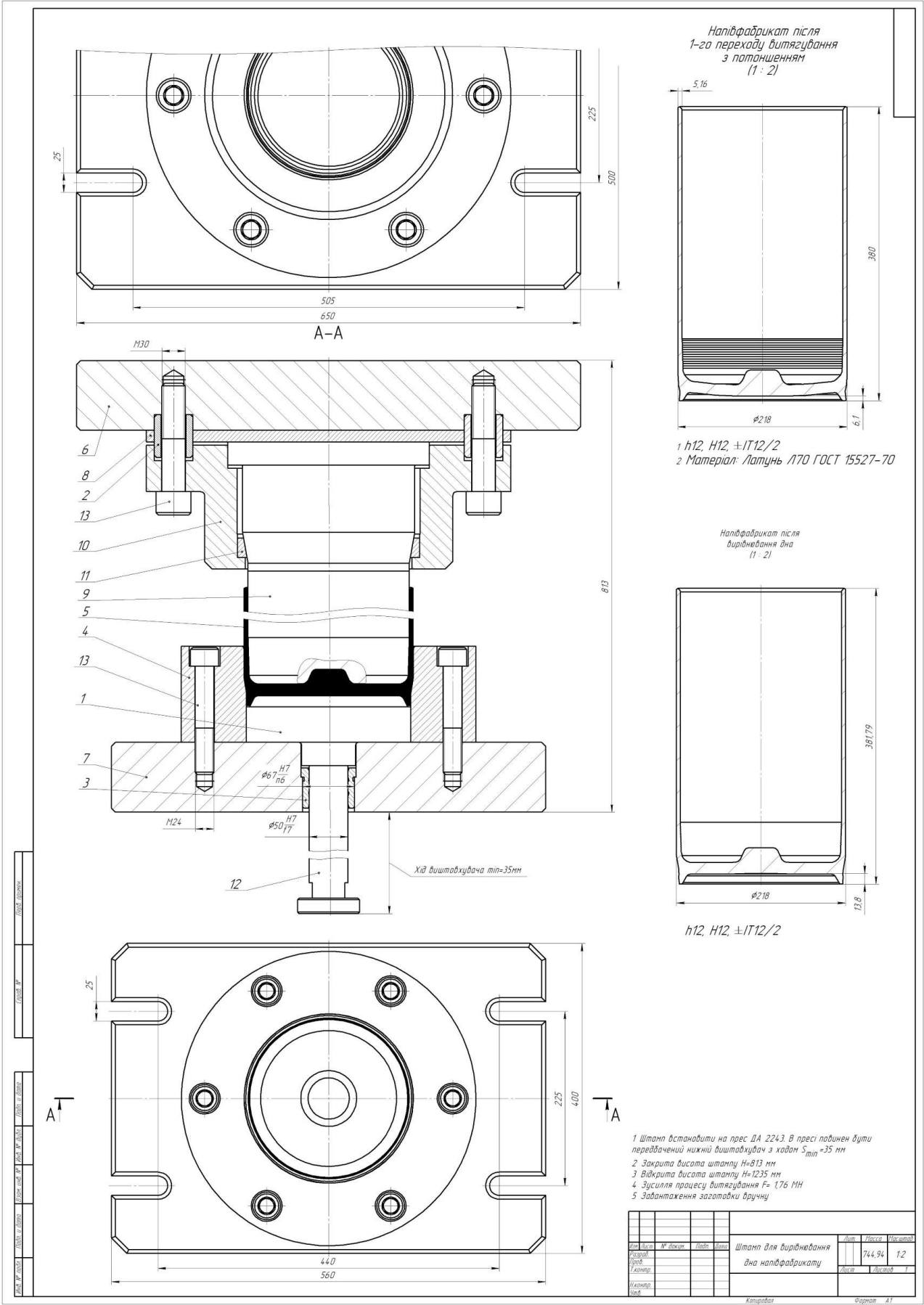


Рисунок Ж.14 Штанга для вирівнювання дна напівфабрикату

Перв. примен.	Формат	Знач.	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
Справ. №	A1				Документация			
					Складальне креслення			
					Детали			
	б/к	1			Виштовхувач	1		
	б/к	2			Втулка	6		
	б/к	3			Втулка направляюча	1		
	б/к	4			Матриця	1		
	б/к	5			Напівфабрикат	1		
	б/к	6			Плита верхня	1		
Подп. и дата	б/к	7			Плита нижня	1		
	б/к	8			Плита підкладна	1		
	б/к	9			Пуансон	1		
	б/к	10			Пуансоноутримач	1		
	б/к	11			Кільце конічне	1		
	б/к	12			Шток виштовхувача	1		
					Стандартные изделия			
		13			Винт М24-6дх140 ГОСТ 11738-84	6		
		14			Винт М30-6дх140 ГОСТ 11738-84	6		
	Взам. инв. №							
Подп. и дата								
	Инв. № подл.	Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Штамп для вирівнювання дна напівфабрикату	Лит.	Лист
Разраб.								1
Пров.								
Н.контр.								
Утв.								

Копіював
Формат А4

Рисунок Ж.15 Штмп для вирівнювання дна напівфабрикату (специфікація)

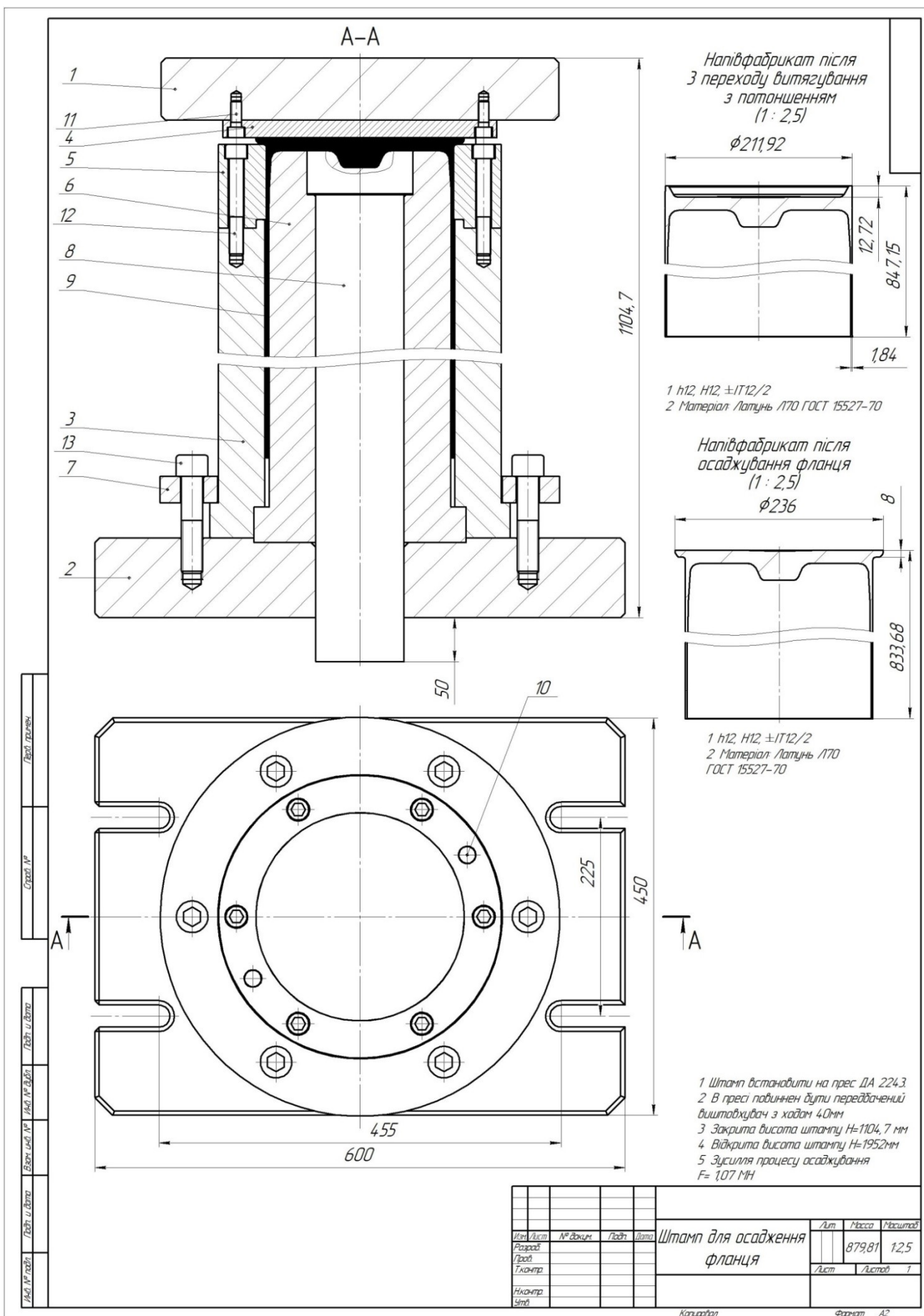


Рисунок Ж.16 Штамп для осаджування фланця

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание		
						<u>Документация</u>				
		A1				Складальне креслення				
						<u>Детали</u>				
Справ. №		б/і	1			Плита верхня	1			
		б/і	2			Плита нижня	1			
		б/і	3			Підставка для матриці	1			
		б/і	4			Пуансон	1			
		б/і	5			Матриця	1			
		б/і	6			Оправка	1			
		б/і	7			Тримач	1			
		б/і	8			Виштовхувач	1			
		б/і	9			Напівфабрикат	1			
Подп. и дата						Грибок дистанційний	2			
						<u>Стандартные изделия</u>				
Инв. № дубл.						Винт М12-6дх30 ГОСТ 11738-84	6			
						Винт М16-6дх110 ГОСТ 11738-84	6			
						Винт М24-6дх110 ГОСТ 11738-84	6			
Взам. инв. №										
Подп. и дата										
Инв. № подл.										
	Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Штамп для осадження фланця			Лист	Лист	Листов
	Разраб.									1
	Пров.									
	Н.контр.									
	Утв.									

Копировал

Формат А4

Рисунок Ж.17 Штамп для осаджування фланця (специфікація)

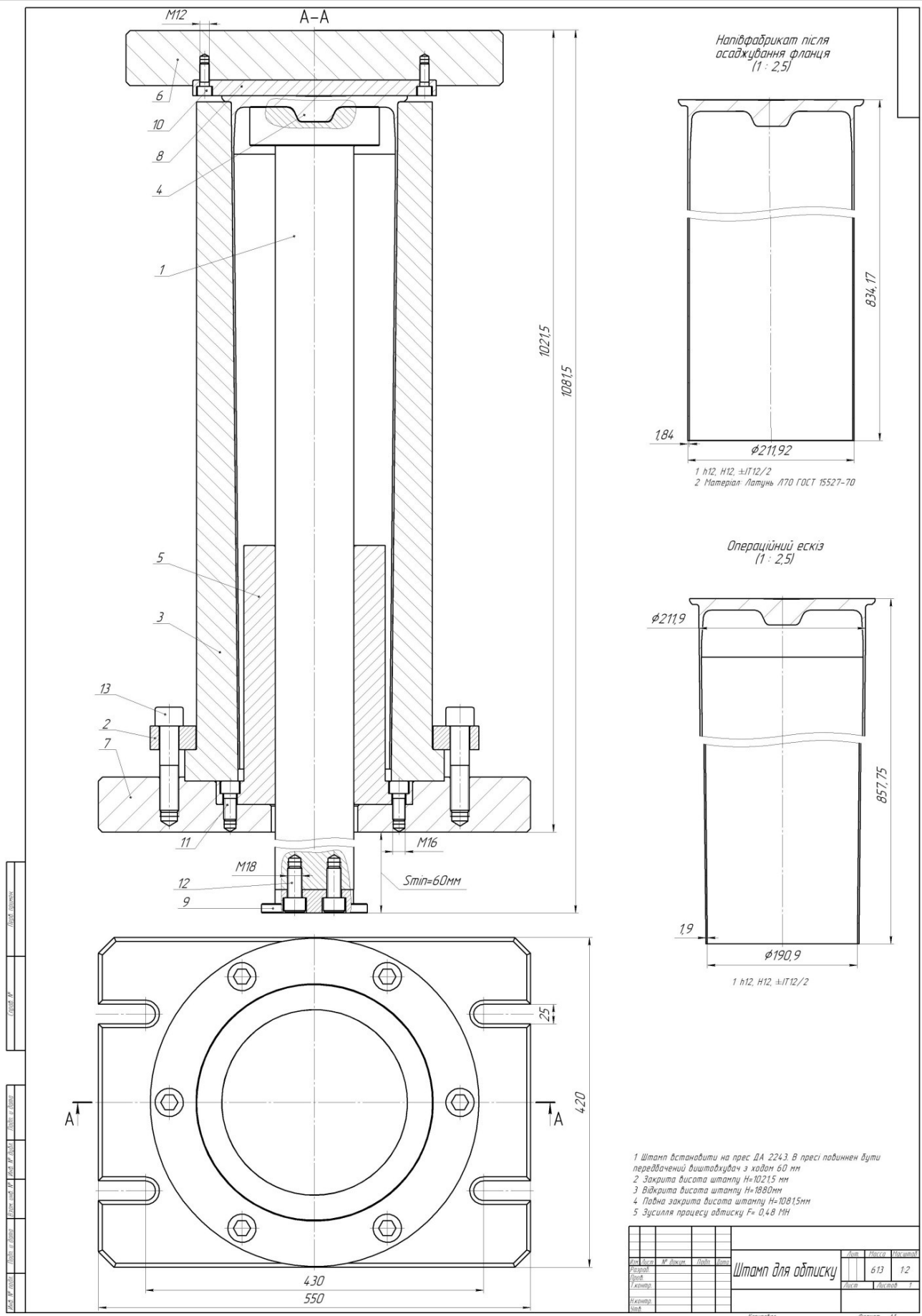


Рисунок Ж.18 Штанн для обтиску

Перв. примен.			Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание			
Справ. №			A1				Документация					
							Складальне креслення					
							Детали					
			Б/к	1		Виштовхувач	1					
			Б/к	2		Кільце прижимне	1					
			Б/к	3		Матриця	1					
			Б/к	4		Напівфабрикат						
			Б/к	5		Направляюча	1					
			Б/к	6		Плита верхня	1					
			Б/к	7		Плита нижня	1					
Подп. и дата			Б/к	8		Пуансон	1					
			Б/к	9		П'ята виштовхувача	1					
Инв. № дучл				10		Винт М12-6дх30 ГОСТ 11738-84	6					
				11		Винт М16-6дх35 ГОСТ 11738-84	4					
				12		Винт М18-6дх40 ГОСТ 11738-84	2					
				13		Винт М24-6дх110 ГОСТ 11738-84	6					
Взам. инв. №												
Подп. и дата												
Инв. № подл			Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Штамп для обтиску				
			Разраб.							Лит.	Лист	Листов
			Пров.									1
			Н.контр.									
			Утв.									

Копировав

Формат А4

Рисунок Ж.19 Штамп для обтиску (специфікація)



КОРПОРАЦІЯ "ТАСКО"®

Р/р UA 733226690000026000300763664 в ТВБВ № 10026/0104 ФГУ
по м. Києву та Київській обл. АТ «Ощадбанк», МФО 322669.
Код ЄДРПОУ 22866094, Свідоцтво ПДВ 100267024, ІПН 228660926589.
Адреса: вул. Ярославська, 5/2 Б, м. Київ, 04071.
Тел.: (044) 425-80-83, факс (044) 425-80-82. Email: tasko-corp@ukr.net.

14.04.2023 № 170

"Затверджую"



Директор виконавчий
Мачехін О.В.

АКТ

Цей акт складено про те, що на кафедрі технології виробництва літальних апаратів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" в процесі виконання на протязі 2019-2021 р. держбюджетної науково-дослідної роботи № 2318п «Розроблення інноваційних технологій штампування гільз артилерійських снарядів для промислових підприємств України» (№ 0120U102385) розроблена технологія виготовлення із латуні Л70 і ЛК75 гільз великої довжини. Технологія включає операцію гарячого осаджування циліндричної заготовки з формоутворенням кругового виступу на торці донної частини, операцію гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату з виступом на донній частині зі сторони порожнини, три операції холодного витягування з потоншенням, операцію калібрування донної частини з формоутворенням фланцю на торці бокової поверхні та операцію холодного обтиску. Для реалізації вказаних операцій розроблено і спроектовано конструкції штампового оснащення, яке може бути встановлене на існуючому пресовому обладнанні на підприємствах України.

Запропонована технологія, в порівнянні з існуючими, забезпечує більш високу продуктивність виготовлення гільз, економію металу та може бути використана на виробництві.

Представники КПІ ім. Ігоря Сікорського

Представники корпорації ТАСКО

Науковий керівник розробок
д.т.н., проф. В.Л. Калюжний

Директор виконавчий
к.т.н. Мачехін О.В.

Виконавці:

к.т.н., доц. О.В. Калюжний

аспірант О.С. Ярмоленко

Рисунок И.1. Акт впровадження на підприємстві корпорації ТАСКО

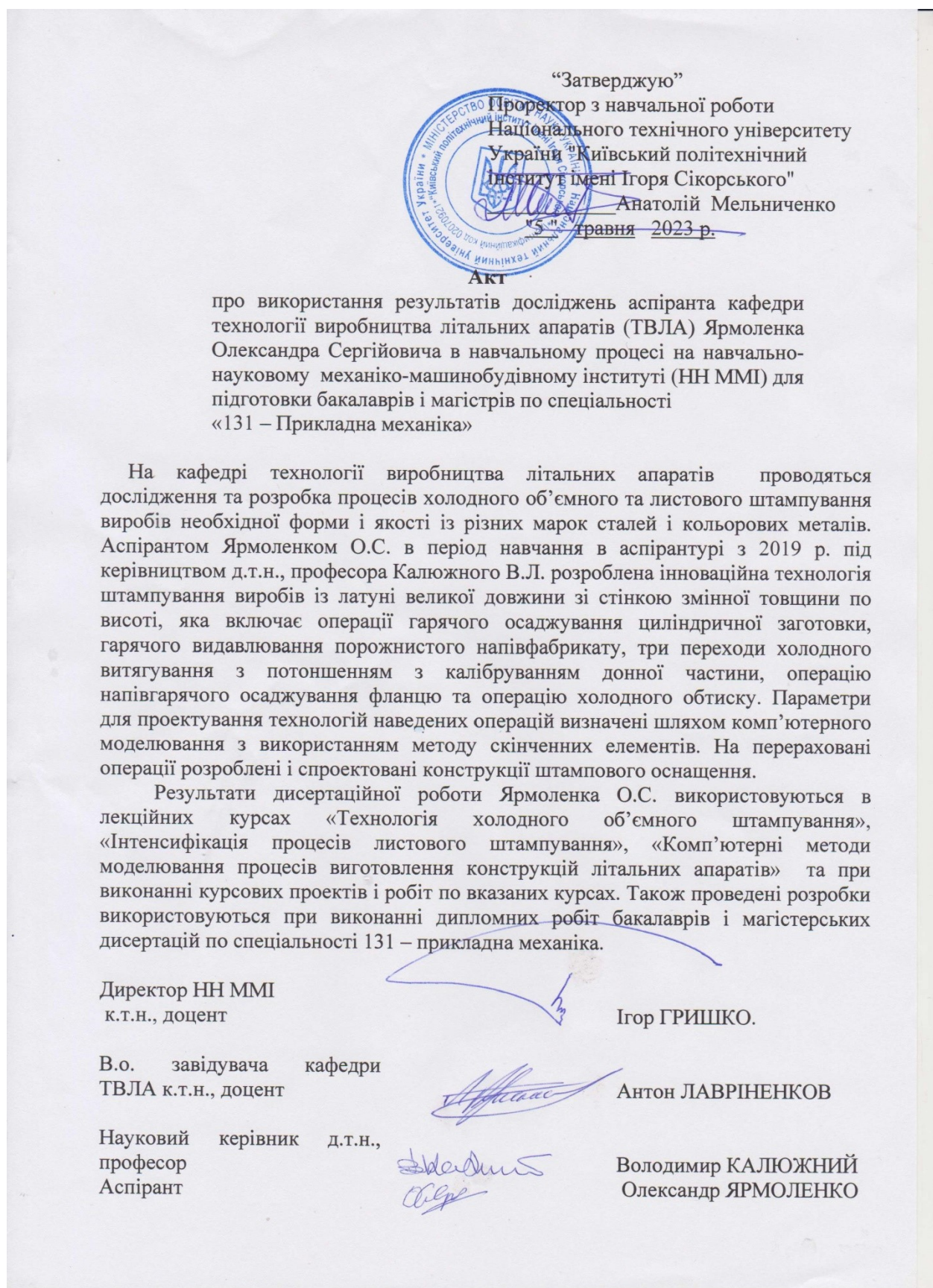


Рисунок И.2. Акт використання результатів дослідження в навчальному процесі на кафедрі ТВЛА