

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

СИТНИК СТАНІСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.73

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ
МЕТАЛУ ПРИ ШТАМПУВАННІ ІЗ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ
ЗАГОТОВОК ГІЛЬЗ ДЛЯ СНАРЯДІВ СЕРЕДНЬОГО КАЛІБРУ

Спеціальність 131 – Прикладна механіка
Галузь знань 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

_____ С. В. Ситник

Науковий керівник: Калюжний Володимир Леонідович,
доктор технічних наук, професор

Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Ситник С. В. Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні із маловуглецевої сталі заготовок гільз для снарядів середнього калібру.

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, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню способів підвищення продуктивності процесів пластичного формоутворення зі сталі вісесиметричних виробів із змінною товщиною стінки, використовуючи спосіб гарячого витягування з потоншенням, для зменшення кількості переходів витягування з потоншенням при їх виготовленні, а також дослідженню способів зменшення витрат металу при виготовленні вказаних виробів.

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 з роздачою порожнистих напівфабрикатів, витягування з потоншенням та кінцеву операцію обтиску.

Вперше використовуючи метод скінченних елементів проведено розрахунковий аналіз переходів гарячого осаджування та подальшого зворотного видавлювання круглих порожнистих напівфабрикатів із заготовки квадратного перерізу з маловуглецевої сталі. Для проектування робочого інструменту проаналізовано розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях напівфабрикату з деформуючим інструментом. Встановлено температуру підігріву деформуючого інструменту та швидкість деформування, які забезпечують пластичне формоутворення в умовах гарячої деформації. Визначено початкову температуру нагріву заготовок і температурний розподіл в них в кінці процесу деформування. Визначено

енерго-силові режими деформування і зусилля вилучення деформованих заготовок із штампів, розподіли питомих зусиль на пуансонах, матрицях і виштовхувачах. Встановлено кінцеві форми та розміри напівфабрикатів з розподілами напружень і деформацій. Виявлено, що зворотне видавлювання заготовок квадратного перерізу без попереднього осаджування кутових зон призводить до формоутворення виступів на верхньому торці порожнистого виробу, що негативно впливає на подальші операції витягування з потоншенням, а введення додаткової операції торцювання виступів призведе до значних витрат металу у відхід, що є неприпустимим у масовому виробництві. За допомогою аналізу розподілу інтенсивності деформацій порівняно характер пропрацювання структури матеріалу донної частини напівфабрикатів після гарячого зворотного видавлювання заготовок круглого та квадратного перерізів. Використання квадратної заготовки забезпечує більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією у донних частинах і стінках виробів.

З використанням методу скінченних елементів проведено розрахунковий аналіз подальших переходів штампування напівфабрикатів після операції зворотного видавлювання, а саме гарячого та холодного витягування з потоншенням з отриманням напівфабрикатів потрібної форми для виконання кінцевого переходу обтиску з необхідним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією та досягненням заданих механічних властивостей по висоті стінки гільзи і піддону. Встановлено залежності зусиль витягування від переміщень пуансонів, форми і розміри напівфабрикатів після витягування та розподіли інтенсивності деформацій для оцінки пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

Визначено необхідність переходу вирівнювання донної частини формоутворення напівфабрикату гільзи після операції гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці, оскільки внаслідок деформування відбувається викривлення дна на зовні, що не дає змоги

встановити отриманий напівфабрикат в робочу зону матриці для виконання операції холодного витягування з потоншенням.

Вперше проведено моделювання методом скінченних елементів процесів кінцевого переходу обтиску з одночасним осаджуванням фланців на донній частині заготовок гільзи з урахуванням накопичених деформацій в напівфабрикатах після витягування з потоншенням. Встановлено зусилля деформування, розподіли інтенсивності деформації та кінцеві форми і розміри заготовки гільзи. Доведено, що із виступу на донній частині, який було сформовано при переході гарячого зворотного видавлювання можливо отримати фланець необхідної форми та розмірів.

Для досліджених переходів формоутворення піддону було розроблено та спроектовано конструкції штампів, які забезпечують отримання необхідних форм та розмірів напівфабрикатів.

Штамп для гарячого зворотного видавлювання заготовки круглого перерізу. В штампі передбачено водяне охолодження матриці для тривалої роботи штампа. Також в конструкції штампа передбачено можливість формоутворення спеціального виступу на донній частині напівфабрикату.

Штамп для гарячого витягування з потоншенням через одну матрицю. В штампі передбачено знімачі для зняття напівфабрикату при зворотному ході пуансона.

Штамп для холодного витягування з потоншенням через одну матрицю. В штампі передбачено знімачі для зняття напівфабрикату при зворотному ході пуансона.

Штамп для одночасного гарячого формоутворення осаджуванням фасок на заготовці квадратного перерізу і видавлювання круглого порожнистого напівфабрикату. В штампі передбачено механізм зняття напівфабрикату з пуансона або виштовхування напівфабрикату з матриці.

Штамп для гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці. В штампі передбачено знімачі для зняття

напівфабрикату при зворотному ході пуансона. Для вилучення напівфабрикату з робочої зони передбачено вікно необхідних розмірів.

Для кожної операції формоутворення напівфабрикатів було підібрано обладнання яке забезпечить необхідну швидкість та зусилля деформування, робочу зону для встановлення штампового оснащення.

Після проведення експерименту на отриманих виробах було вирізано зразки згідно вимог креслення на яких було проведено випробування на розтяг. За результатами розтягу зразків було отримано наступні дані: відносне подовження, межа міцності, умовна межа текучості і твердість. Отримані дані було порівняно з вимогами, які вказано на кресленні деталі для встановлення досягнення необхідних механічних характеристик.

Ключові слова: гаряче осаджування, гаряче зворотне видавлювання, гаряче витягування з потоншенням, холодне витягування з потоншенням, обтиск, гільза, піддон, напруження, деформації, енерго-силові режими деформування, нормальні напруження, критерій руйнування.

Список публікацій здобувача

Праці, які підтверджують апробацію результатів дисертації

1 Калюжний В. Л., Ситник С. В., Титаренко А. Є. Гарячий обтиск в матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих заготовок із високовуглецевої сталі. *Механіка і новітні технології*. 2022. Vol. 6, № 2. С. 187-194, DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.2.264785 (фахове видання Категорія Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання)*.

2 Калюжний В. Л., Алієва Л., Ярмоленко О. С., Ситник С. В. Гаряче видавлювання із високовуглецевої сталі конусних порожнистих виробів. *Механіка і новітні технології*. 2022. Vol. 6, № 3. С. 302-308, DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.3.269897 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконаний аналіз результатів моделювання процесу штампування)*.

3 Калюжний В. Л., Левченко В., Калюжний О. В., Ситник С. В. Варіанти обтиску в контейнері і матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих заготовок із сталі С60. *Механіка і новітні технології*. 2023. Vol. 7, № 1, DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.1.264790 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконана обробка результатів моделювання)*.

4 Калюжний В. Л., Ситник С. В., Левченко В. Порівняльний аналіз гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із заготовок круглої і квадратної форми. *Механіка і новітні технології*. 2023. Vol. 7, № 2. С. 236-242, DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.2.288484 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконано моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання та обробка результатів моделювання)*.

5 Калюжний В. Л., Ситник С. В., Савченко Д. В., Чучин О.В. Напівгаряче та гаряче зворотне видавлювання з роздачою осесиметричної порожнистої деталі. *Обробка матеріалів тиском*. 2023. Vol. 52, № 1. С. 10-19, DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(51)10 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконано моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання та обробка результатів моделювання)*.

6 Калюжний В.Л., Калюжний О. В., Ситник С. В., Шульга К. М., Готра М. В. Збільшення пропрацювання пластичною деформацією стінок і донної частини порожнистого напівфабрикату при гарячому зворотному видавлюванні. *Наукові Нотатки*. 2023. № 76. С. 72-79, DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.10 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконано моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання)*.

7 Драгобецький В. В., Калюжний О. В., Калюжний В. Л., Ситник С. В. Вплив швидкості деформування на процес гарячого видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів. *Механіка і новітні технології*. 2024. Vol. 8, № 1. С. 45-53, DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.1(100).297296 (фахове

видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконаний аналіз результатів моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання).*

8 Драгобецький В. В., Калюжний О. В., Калюжний В. Л., Ситник С. В. Підвищення точності форми і розмірів порожнистих напівфабрикатів при гарячому зворотному видавлюванні із заготовок квадратного перерізу. *Механіка і новітні технології*. 2024. Vol. 8, № 3. С. 256–264, DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.3(102).297388 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконано моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання).*

9 Піманов В. В., Орлюк М. В., Гончар А., Ситник С. В. Аналіз технології виготовлення напівфабрикату для порожнистої деталі складної геометричної форми за технологією гарячого об'ємного штампування. *Наукові вісті КПП*. 2023. Vol. 136, № 1-4. С. 54-61, DOI: 10.20535/kpissn.2023.1-4.304818 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконаний аналіз результатів моделювання гарячого об'ємного штампування).*

10 Калюжний О. В., Калюжний В. Л., Ситник С. В. Вплив тертя при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглого і квадратного перерізу. *Наукові Нотатки*. 2024. № 78. С. 83-93, DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.12 (фахове видання категорії Б 131 Прикладна механіка). *(Здобувачем виконано моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання).*

Праці, які додатково відображають результати дисертації

11 Калюжний В. Л., Ситник С. В. Напівгаряче та гаряче зворотне видавлювання з роздачою вісесиметричного порожнистого напівфабрикату із маловуглецевої сталі ХІІІ МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском» секція Підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності виробів машинобудування технологічними методами, Київ, КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 43-46. *(Здобувачем виконано моделювання процесу зворотного видавлювання та обробка результатів моделювання).*

12 Ситник С. В., Ліподат В. Є. Вплив швидкості деформування на технологічне зусилля процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого виробу із маловуглецевої сталі Міжнародна наукова конференція «Новітня наука та технологія досягнення та їх значення для суспільства» секція 2 Прикладна механіка, Ченстохова, Республіка Польща, 2023. С. 19-23, DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-388-0-4>. *(Здобувачем виконано моделювання процесу зворотного видавлювання та обробка результатів моделювання).*

13 Ситник С. В., Піманов В. В., Орлюк М.В. Вплив попереднього профілювання заготовок квадратного перерізу на подальші формозмінні операції XIV МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском», Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 21-25. *(Здобувачем виконано моделювання процесу зворотного видавлювання та витягування з потоншенням та обробка результатів моделювання).*

14 Піманов В. В., Гуменний Д. О., Родюк О. К., Ситник С. В., Савченко Д. В. Боєприпас протипіхотний для дистанційного мінування шляхом скиду з БПЛА типу коптер XIV МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском», Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 45-47. *(Здобувачем виконаний аналіз результатів моделювання).*

ABSTRACT

Sytnyk S. V. Increasing productivity and reducing metal consumption when stamping blanks for medium-caliber shells from low-carbon steel.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - Mechanical Engineering in the specialty 131 “Applied Mechanics” - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of methods for increasing the productivity of processes for plastic forming of steel axisymmetric products with variable wall thickness, using the method of hot drawing with thinning, to reduce the number of drawing transitions with thinning during their manufacture, as well as to the study of methods for reducing metal consumption in the manufacture of these products.

An analysis of literary sources on existing technologies of plastic forming of products with variable wall thickness was conducted. The technologies include operations of hot deposition and subsequent reverse extrusion with the distribution of hollow semi-finished products, drawing with thinning and the final crimping operation.

For the first time, using the finite element method, a computational analysis of the transitions of hot deposition and subsequent reverse extrusion of round hollow semi-finished products from a square-section billet made of low-carbon steel was carried out. To design the working tool, the distribution of normal stresses on the contacting surfaces of the semi-finished product with the deforming tool was analyzed. The heating temperature of the deforming tool and the deformation rate were established, which ensure plastic shaping under hot deformation conditions. The initial heating temperature of the billets and the temperature distribution in them at the end of the deformation process were determined. The energy-force modes of deformation and the forces for removing deformed billets from dies were determined, the distributions of specific forces on punches, matrices and ejectors were determined. The final shapes and dimensions of the semi-finished products

with the distributions of stresses and strains were established. It was found that the reverse extrusion of square-section blanks without prior deposition of corner zones leads to the formation of protrusions on the upper end of the hollow product, which negatively affects subsequent operations of drawing with thinning, and the introduction of an additional operation of facing the protrusions will lead to significant metal waste, which is unacceptable in mass production. Using the analysis of the distribution of deformation intensity, the nature of the development of the structure of the material of the bottom part of semi-finished products after hot reverse extrusion of round and square-section blanks was compared. The use of a square blank provides a more intensive development of the metal structure by plastic deformation in the bottom parts and walls of the products.

Using the finite element method, a computational analysis of further transitions of stamping semi-finished products after the reverse extrusion operation, namely hot and cold drawing with thinning, was carried out to obtain semi-finished products of the desired shape for performing the final crimping transition with the necessary development of the metal structure by plastic deformation and achieving the specified mechanical properties along the height of the sleeve wall and pallet. The dependences of the drawing forces on the displacements of the punches, the shapes and dimensions of the semi-finished products after drawing, and the distribution of the intensity of deformations were established to assess the development of the metal structure by plastic deformation.

The need for a transition to align the bottom part of the sleeve semi-finished product after the hot drawing with thinning operation through two consecutively arranged matrices was determined, since as a result of deformation, the bottom is curved outward, which does not allow installing the obtained semi-finished product in the working zone of the matrix for performing the cold drawing with thinning operation.

For the first time, finite element modeling of the processes of the final crimping transition with simultaneous deposition of flanges on the bottom part of the sleeve blanks was carried out, taking into account the accumulated deformations

in the semi-finished products after drawing with thinning. The deformation forces, deformation intensity distributions and final shapes and dimensions of the sleeve blank were established. It was proved that from the protrusion on the bottom part, which was formed during the hot reverse extrusion transition, it is possible to obtain a flange of the required shape and dimensions.

For the studied transitions of the pallet forming, die designs were developed and designed, which ensure the obtaining of the required shapes and dimensions of the semi-finished products.

A die for hot reverse extrusion of a round-section blank. The die provides for water cooling of the die for long-term operation of the die. The die design also provides for the possibility of forming a special protrusion on the bottom part of the semi-finished product.

A die for hot drawing with thinning through one die. The die is provided with pullers for removing the semi-finished product during the reverse stroke of the punch.

A die for cold drawing with thinning through one die. The die is provided with pullers for removing the semi-finished product during the reverse stroke of the punch.

A die for simultaneous hot forming by depositing chamfers on a square-section workpiece and extruding a round hollow semi-finished product. The die is provided with a mechanism for removing the semi-finished product from the punch or pushing the semi-finished product out of the die.

A die for hot drawing with thinning through two consecutive dies. The die is provided with pullers for removing the semi-finished product during the reverse stroke of the punch. A window of the required size is provided for removing the semi-finished product from the working area.

For each operation of forming semi-finished products, equipment was selected that would provide the necessary speed and deformation force, a working area for installing die equipment.

After conducting an experiment on the obtained products, samples were cut according to the requirements of the drawing, on which tensile tests were conducted. According to the results of tensile testing of the samples, the following data were obtained: relative elongation, tensile strength, yield strength and hardness. The obtained data were compared with the requirements specified in the drawing of the part to establish the achievement of the required mechanical characteristics.

Keywords: hot deposition, hot reverse extrusion, hot drawing with thinning, cold drawing with thinning, crimping, sleeve, pallet, stresses, deformations, energy-force deformation modes, normal stresses, failure criterion.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГТОВЛЕННЯ ГІЛЬЗ ДЛЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СНАРЯДІВ МАЛОГО, СЕРЕДНЬОГО ТА ВЕЛИКОГО КАЛІБРУ	30
1.1 Загальні способи формоутворення порожнистих виробів	30
1.2 Теоретичні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини	57
1.3 Теоретичні та експериментальні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини	76
1.4 Експериментальні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини	92
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	98
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З РОЗДАЧОЮ ПОРОЖНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ	100
2.1 Гаряче зворотне видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату із заготовки круглої форми	100
2.1.1 Розрахункова схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки круглої форми	100
2.1.2 Силкові режими процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу	101
2.1.3 Температурний розподіл напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу	102

2.1.4	Напружений стан та питомі зусилля напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу	103
2.1.5	Деформований стан напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу	104
2.2	Гаряче зворотне видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату із заготовки квадратної перерізу	105
2.2.1	Розрахункова схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу	105
2.2.2	Силкові режими процесу видавлювання порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу	108
2.2.3	Температурний розподіл напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу	110
2.2.4	Напружений стан та питомі зусилля напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу	110
2.2.5	Деформований стан напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу	111
2.3	Гаряче осаджування заготовки квадратного перерізу	113
2.3.1.	Розрахункова схема процесу гарячого осаджування напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу	113
2.3.2	Силкові режими процесу гарячого осаджування заготовки квадратного перерізу	114
2.3.3	Температурний розподіл осаджування напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу	115
2.4	Гаряче зворотне видавлювання з роздачою порожнистого виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу	116
2.4.1	Розрахункова схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого виробу	116

	здеформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу	
2.4.2	Силкові режими процесу видавлювання порожнистого виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу	117
2.4.3	Температурний розподіл виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу	118
2.4.4	Напружений стан та питомі зусилля виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу	118
2.4.5	Деформований стан виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу	119
2.5	Теоретичний аналіз процесів гарячого формоутворення порожнистих виробів за допомогою аналітичних розрахунків	121
2.5.1	Опис основних аналітичних методів дослідження	121
2.5.1.1	Метод верхньої оцінки	121
2.5.1.2	Інженерний метод	121
2.5.1.3	Метод балансу потужностей	122
2.6	Висновки	122
	РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ ПОРОЖНИСТОГО ВИРОБУ	124
3.1	Аналітичні розрахунки процесу витягування з потоншенням	124
3.2	Гаряче витягування з потоншенням порожнистого виробу через дві послідовно розташовані матриці	127
3.2.1	Розрахункова схема процесу гарячого витягування з потоншенням порожнистого виробу через дві послідовно розташовані матриці	127

3.2.2	Силові режими процесу гарячого та напівгарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці	129
3.2.3	Оцінка критерію руйнування процесу гарячого витягування з потоншенням порожнистого виробу	130
3.2.4	Температурний розподіл порожнистого виробу	131
3.2.5	Напружений стан та питомі зусилля порожнистого виробу zdeформованого через дві послідовно розташовані матриці	133
3.2.6	Деформований стан порожнистого виробу zdeформованого через дві послідовно розташовані матриці	136
3.3	Вирівнювання донної частини отриманого виробу після операції витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці	137
3.3.1	Розрахункова схема процесу калібрування донної частини напівфабрикату	137
3.3.2	Силові режими процесу вирівнювання донної частини напівфабрикату	138
3.3.3	Напружений стан та питомі зусилля процесу вирівнювання нижнього виступу напівфабрикату	139
3.3.4	Деформований стан напівфабрикату в кінці процесу вирівнювання нижнього виступу напівфабрикату	140
3.4	Холодне витягування з потоншенням порожнистого вісесиметричного виробу через одну матрицю	142
3.4.1	Розрахункова схема процесу холодного витягування з потоншенням через третю матрицю	142
3.4.2	Зусилля та питомі зусилля процесу витягування з потоншенням через одну матрицю	143
3.4.3	Напружено-деформований стан виробу	144
3.5	Висновки	148

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ОБТИСКУ І ОСАДЖУВАННЯ	150
4.1 Схема процесу обтиску і осаджування порожнистого напівфабрикату	150
4.2 Силкові режими та питомі зусилля процесу обтиску та осаджування	152
4.3 Напружено-деформований стан процесу обтиску та осаджування	154
4.4 Оцінка критерію руйнування процесу обтиску і осаджування	162
4.5 Висновки	163
РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГІЛЬЗИ ДЛЯ 125 мм ТАНКОВОГО ПОСТРІЛУ ІЗ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ	165
5.1 Форма та розміри готового виробу та визначення форми та розмірів вихідної заготовки	165
5.2 Операція гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату	166
5.2.1 Схема процесу гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату	166
5.2.2 Зусилля деформування та питомі зусилля процесу зворотного видавлювання напівфабрикату	167
5.2.3 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату	168
5.2.4 Напружено-деформований стан процесу гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату	168
5.2.5 Проектування штампового оснащення для операції гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату	173
5.3 Операція гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату	175
5.3.1 Схема процесу гарячого витягування з потоншенням	175
5.3.2 Зусилля деформування та питомі зусилля процесу гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату	176
5.3.3 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату	177

5.3.4	Деформований стан напівфабрикату після операції гарячого витягування з потоншенням	178
5.3.5	Проектування штампового оснащення для операції гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату	181
5.4	Операція холодного витягування з потоншенням напівфабрикату	183
5.4.1	Схема процесу холодного витягування з потоншенням	183
5.4.2	Зусилля деформування та питомі зусилля процесу холодного витягування з потоншенням напівфабрикату	184
5.4.3	Деформований стан напівфабрикату після операції холодного витягування з потоншенням	185
5.4.4	Проектування штампового оснащення для операції холодного витягування з потоншенням напівфабрикату	188
5.5	Операція гарячого осаджування фланця напівфабрикату	190
5.5.1	Схема процесу гарячого осаджування фланця	190
5.5.2	Зусилля деформування та питомі зусилля процесу гарячого осаджування фланця напівфабрикату	191
5.5.3	Деформований стан напівфабрикату після операції гарячого осаджування фланця напівфабрикату	192
5.6	Висновки	198
РОЗДІЛ 6. ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГІЛЬЗИ ДЛЯ 125 мм ТАНКОВОГО ПОСТРІЛУ ІЗ ЗАГОТОВКИ КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ		200
6.1	Форма та розміри готового виробу та визначення форми та розмірів вихідної заготовки	200
6.2	Операція гарячого осаджування напівфабрикату	200
6.2.1	Схема процесу гарячого осаджування фасок в кутових зонах напівфабрикату	200
6.2.2	Зусилля деформування процесу гарячого осаджування фасок в кутових зонах	201

6.2.3	Температурний розподіл отриманого напівфабрикату	202
6.2.4	Розподіл інтенсивності деформацій	202
6.3	Операція гарячого видавлювання з роздачою круглого порожнистого напівфабрикату	203
6.3.1	Схема процесу гарячого видавлювання з роздачою круглого порожнистого напівфабрикату	203
6.3.2	Зусилля деформування процесу гарячого видавлювання з роздачою круглого порожнистого напівфабрикату	204
6.3.3	Температурний розподіл отриманого напівфабрикату	204
6.3.4	Напружений стан напівфабрикату в кінці видавлювання	205
6.3.5	Проектування штампового оснащення для операцій гарячого осаджування та гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату	208
6.4	Операція гарячого витягування з потоншенням круглого порожнистого напівфабрикату через дві послідовно розташовані матриці	209
6.4.1	Схема процесу гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату	209
6.4.2	Зусилля деформування, напружений стан та питомі зусилля процесу гарячого витягування з потоншенням круглого порожнистого напівфабрикату	211
6.4.3	Деформований стан круглого порожнистого напівфабрикату в кінці гарячого витягування з потоншенням	213
6.4.4	Температурний розподіл отриманого напівфабрикату в кінці витягування	214
6.4.5	Проектування штампового оснащення для операції гарячого витягування з потоншенням порожнистого напівфабрикату	217
6.5	Операція гарячого осаджування фланця	218

6.5.1	Схема процесу гарячого осаджування фланця	218
6.5.2	Зусилля деформування процесу гарячого осаджування фланця	218
6.5.3	Основні характеристики процесу гарячого осаджування фланця	219
6.6	Висновки	220
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	222
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	224
	ДОДАТКИ	
Додаток А	Характеристика матеріалів та криві зміцнення	249
Додаток Б	Креслення загального вигляду штампа для операції гарячого зворотного видавлювання	250
Додаток В	Креслення загального вигляду штампа для операції гарячого витягування з потоншенням	253
Додаток Г	Креслення загального вигляду штампа для операції холодного витягування з потоншенням	255
Додаток Д	Креслення загального вигляду ролику для ротаційного витягування	257
Додаток Ж	Результати замірів механічних характеристик та механічні характеристики згідно креслення для порівняння	258
Додаток И	Креслення загального вигляду штампа для одночасного виконання гарячого осаджування та зворотного видавлювання	259
Додаток К	Креслення загального вигляду штампа для операції гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці	262
Додаток Л	Апробація роботи	264

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АРЛ – автоматичні роторні машини

РКЛ – роторно-конвеєрні лінії

ОПД – осередок пластичної деформації

МСЕ – метод скінченних елементів

ОМТ – обробка металів тиском

МВО – метод верхньої оцінки

ІМ – інженерний метод

ДРР – диференційні рівняння рівноваги

ВСТУП

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

Однак, застосовуючи традиційні процеси формоутворення вищенаведених виробів, важко досягнути заощадження ресурсів та підвищення продуктивності процесів виготовлення, оскільки виготовлення таких виробів вимагає великої кількості переходів штампування.

Отримання таких виробів можливе застосовуючи способи гарячої та холодної обробки тиском. За допомогою гарячої обробки тиском можна отримати з незначним зусиллям напівфабрикатів найбільш сприятливої форми під подальші операції витягування з потоншенням для досягнення у стінці виробів необхідних розмірів та механічних характеристик. Тому дослідження вищенаведених процесів та використання їх для вдосконалення відомих на сьогодні технологічних процесів є актуальною задачею.

На разі важливим є швидке впровадження технології виготовлення таких виробів на виробництві. Однак розробка технології виготовлення вищенаведених виробів є непростю задачею, оскільки необхідно враховувати велику кількість факторів, а саме силові режими формоутворення, геометрична форма початкової заготовки та проміжних напівфабрикатів, спосіб отримання початкової заготовки і найважливіше у таких виробках характеристики напружено-деформованого стану у донній частині та у стінці виробу для досягнення необхідних механічних характеристик, що потребує багато часу для розрахунків з подальшим підтвердженням за допомогою

експериментальних досліджень. Для прискорення процесу розроблення технології виготовлення таких деталей, зменшення витрат на дослідження та встановлення вищенаведених параметрів необхідно застосовувати способи комп'ютерного моделювання, що дозволить швидко впровадити результати розрахунків на виробництві. Темою дослідження є підвищення продуктивності та зниження витрат металу процесів формоутворення таких виробів за рахунок скорочення кількості переходів штампування та використання вихідної заготовки квадратного перерізу, що зменшить витрати металу у відхід, пришвидшить виготовлення виробів та зменшить їх собівартість. Для розв'язання поставленої задачі буде проведено теоретичні дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів та експериментальні дослідження на виробництві що дозволить розробити технологію виготовлення порожнистих вісесиметричних виробів з дном та стінкою змінної товщини, а також спроектувати штампове оснащення для формоутворення вказаних виробів з необхідними механічними характеристиками в донній частині та стінці.

Мета та завдання дослідження: метою роботи є підвищення продуктивності процесів витягування з потоншенням для отримання порожнистих вісесиметричних виробів зі змінною товщиною стінки по висоті за рахунок скорочення кількості переходів.

Після аналізу літературних джерел в роботі були поставлені та вирішені наступні завдання:

- 1 Для заготовок круглого і квадратного перерізу із використанням методу скінченних елементів створити математичні моделі та провести комп'ютерний аналіз гарячого осаджування та подальшого гарячого зворотного видавлювання круглого порожнистого напівфабрикату із маловуглецевої сталі для наступного переходу витягування з потоншенням. Встановити необхідній підігрів інструмента та швидкість деформування для забезпечення температурного інтервалу в умовах гарячої деформації, виявити силові режими формоутворення, розподіл питомих зусиль на деформуючому

інструменті, напружено-деформований стан металу та провести оцінку пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

2 Методом скінченних елементів створити математичні моделі та виконати комп'ютерне моделювання другого переходу витягування з потоншенням в умовах гарячої, неповної гарячої та холодної деформації. Встановити граничні ступені деформації, зусилля деформування, питомі зусилля на інструменті, напружено-деформований стан металу на переходах витягування та кінцеву форму і розміри напівфабрикатів для наступного переходу обтиску. Провести прогнозування напруження текучості деформованого металу після холодного пластичного формоутворення.

3 З урахуванням накопичених деформацій у напівфабрикатах після переходів холодного витягування з потоншенням створити математичні моделі та провести комп'ютерний аналіз останнього переходу холодного обтиску з одночасним осаджуванням фланців на донних частинах напівфабрикатів з отриманням виробів 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.

4 З використанням результатів комп'ютерного моделювання виконати розроблення і проектування конструкцій штампового оснащення для гарячого зворотного видавлювання, переходів витягування з потоншенням в умовах гарячої, неповної гарячої і холодної деформації та осаджування фланців.

5 Впровадити результати роботи на виробництві та в навчальному процесі.

Об'єкт дослідження: процеси гарячого осаджування та зворотного видавлювання, гарячого, напівгарячого та холодного витягування з потоншенням, а також формоутворення обтиском вісесиметричних порожнистих виробів із змінною товщиною стінки по висоті.

Предмет дослідження: закономірності впливу конструктивних та технологічних факторів при виготовленні вісесиметричних порожнистих

виробів зі змінною товщиною стінки по висоті на технологічних переходах осаджування, видавлювання, витягування з потоншенням і обтиску для отримання виробів із заданою геометричною формою, розмірами та з необхідним зміцненням матеріалу в готовому виробі.

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

Наукова новизна отриманих результатів:

1 З використанням методу скінченних елементів вперше проведено розрахунковий аналіз переходів гарячого осаджування та подальшого зворотного видавлювання круглих порожнистих напівфабрикатів із заготовки квадратного перерізу з маловуглецевої сталі. Встановлено температуру підігріву деформуючого інструменту та швидкість деформування, які забезпечують пластичне формоутворення в умовах гарячої деформації. Визначено енерго-силові режими деформування і зусилля вилучення деформованих заготовок із штампів, розподіли питомих зусиль на пуансонах, матрицях і виштовхувачах та кінцеві форми та розміри напівфабрикатів з розподілами напружень і деформацій.

2 Отримали подальший розвиток математичні моделі та комп'ютерний аналіз методом скінченних елементів подальших переходів штампування напівфабрикатів після видавлювання з використанням операцій гарячого та холодного витягування з потоншенням з отриманням напівфабрикатів потрібної форми для виконання кінцевого переходу обтиску з необхідним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією та досягненням

заданих механічних властивостей по висоті стінки гільзи і піддону. Встановлено залежності зусиль витягування від переміщень пуансонів, форми і розміри напівфабрикатів після витягування та розподіли інтенсивності деформацій для оцінки пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

3 Вперше проведено моделювання методом скінченних елементів процесів кінцевого переходу обтиску з одночасним осаджуванням фланців на донній частині заготовок гільзи з урахуванням накопичених деформацій в напівфабрикатах після витягування з потоншенням. Встановлено зусилля деформування, розподіли інтенсивності деформації та кінцеві форми і розміри заготовки гільзи.

Особистий внесок здобувача:

Для написання дисертаційної роботи було використано ідеї та навички, які було отримано при проведенні досліджень. Тема дисертаційної роботи є продовженням раніше розпочатої роботи, певні результати якої відображено в магістерській дисертації. Автором було розроблено математичні моделі та проведено комп'ютерне моделювання за допомогою методів скінчених елементів процесів гарячого осаджування, гарячого зворотного видавлювання, гарячого витягування з потоншенням, холодного витягування з потоншенням, осаджування фланця з одночасним обтиском. Визначено напружено-деформований стан, нормальні напруження на інструменті, температурний розподіл напівфабрикатів для гарячих процесів, силові режими та критерій руйнування по переходах формоутворення. Також спроектовано штампове оснащення вищезгаданих переходів виготовлення деталі.

Апробація результатів роботи. Матеріали дисертаційної роботи було повідомлено та обговорено на Міжнародних науково-технічних конференціях: XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Теоретичні та практичні проблеми в обробці тиском», 31 травня 2023 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна, опубліковано тези; XXVI Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення та проблеми розвитку технологій

і машин обробки тиском», 13-15 грудня 2023 р., м. Краматорськ-Тернопіль, Україна; XV Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 02.05.2024 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна, опубліковано тези; Форум інженерів-механіків. МНТК: «Теоретичні й практичні проблеми обробки матеріалів тиском», 28-29.11.2024 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна, опубліковано тези. Також по темі дисертації на Міжнародній науковій конференції «Новітні досягнення в науці та техніці і їх значення для суспільства», 6-7 грудня 2023 р., м. Ченхостова, Республіка Польща, опубліковано тези.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Матеріал представлений на 264 сторінках машинописного тексту, у тому числі 222 сторінок основного тексту, 162 малюнків, 4 таблиці, список використаних джерел 192 найменувань та 9 додатків, на 17 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 об'ємній пластичній деформації. Використовуючи метод скінчених елементів 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 виконувалось в рамках Держбюджетної науково-дослідної роботи №2318п «Розробка інноваційних технологій штампування гільз для артилерійських снарядів для промислових підприємств України», а також господарсько-договірної науково-дослідної

роботи № Дндч/0201.01/1200.02/127/2022 «Дослідна партія гільзи та корпусу у кількості 12 шт. кожної», які виконувались на кафедрі «Технології виробництва літальних апаратів» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення мають наступні результати роботи:

1 Параметри процесу попереднього профілювання заготовки квадратного перерізу шляхом формоутворення фасок в кутових зонах гарячим осаджуванням: залежності зусилля осаджування від переміщення інструменту, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті; розподіл температури у деформованій заготовці.

2 Параметри процесів гарячого зворотного видавлювання круглих порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглого і квадратного перерізів: залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів; розподіли питомих зусиль на пуансонах, матрицях і виштовхувачах; розподіли температури і інтенсивності деформацій у напівфабрикатах після видавлювання.

3 Для проектування технологій отримано параметри процесів гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці та подальшого холодного витягування з потоншенням для гільзи, а також параметри гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці для піддону: залежності зусиль витягування від переміщення пуансонів; розподіли питомих зусиль на пуансонах і матрицях; розподіли температури і інтенсивності деформацій у напівфабрикатах.

4 Для кінцевих процесів осаджування фланців із попередньо отриманих виступів на донних частинах напівфабрикатів - холодного з одночасним обтиском для гільзи та гарячого для піддону визначено зусилля деформування, розподіли питомих зусиль на інструменті, розподіли інтенсивностей деформацій.

5 Розроблені конструкції штампового оснащення для операцій гарячого осаджування, гарячого зворотного видавлювання, гарячого витягування з потоншенням, холодного витягування з потоншенням.

6 Результати роботи використані на виробництві на підприємстві ТОВ «БСТІ «Стандарт.Т» (акт про впровадження № 354/03 від 05.11.2023 р).

Результати роботи також використані в навчальному процесі на кафедрі технології виробництва літальних апаратів КПП ім. Ігоря Сікорського (акт про використання від 10.10.2024 р), які застосовують в лекційних курсах та при виконанні бакалаврських і магістерських атестаційних робіт.

Публікації: матеріали дисертації було опубліковано в 10 статтях у фахових виданнях, опубліковано 4 тези на конференціях.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ГІЛЬЗ ДЛЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СНАРЯДІВ МАЛОГО, СЕРЕДНЬОГО ТА ВЕЛИКОГО КАЛІБРУ

1.1 Загальні способи формоутворення порожнистих виробів.

У сучасному машинобудуванні переважна більшість об'ємних деталей різних розмірів і геометричних форм отримують способом холодного або гарячого штампування – видавлюванням. Процес холодного або гарячого видавлювання полягає у формоутворенні деталей шляхом пластичної течії металу в формоутворюючу порожнину інструмента при дії зовнішнього навантаження. Такий процес приносить значну економічність.

В залежності від типу і геометричних форм деталей, які необхідно отримати застосовуються наступні способи видавлювання:

- прямий – характеризується тим, що течія металу відбувається у напрямку прикладеної сили тиску (рис. 1.1);

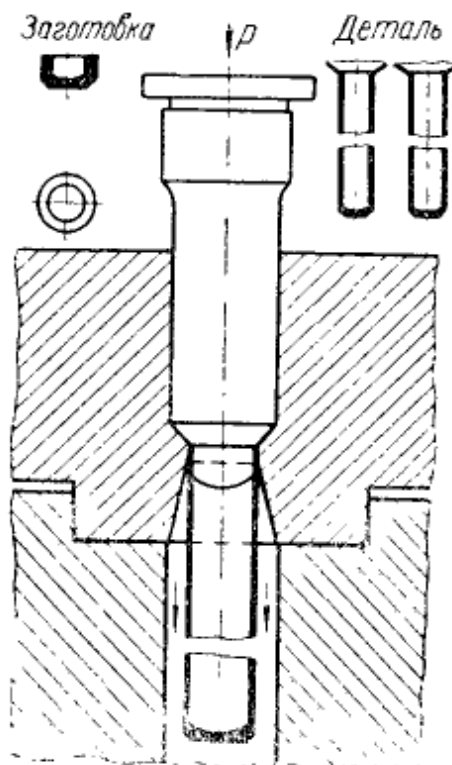


Рисунок 1.1. Схема способу прямого видавлювання

- зворотній – характеризується тим, що течія металу відбувається у протилежному напрямку відносно прикладання сили тиску (рис. 1.2);

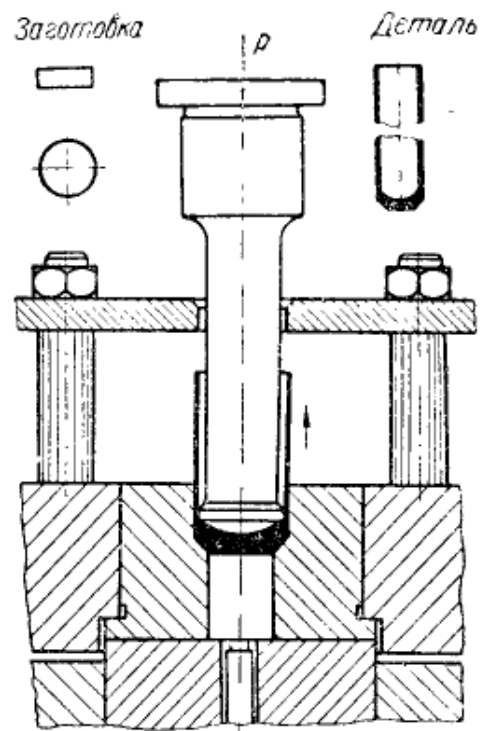


Рисунок 1.2. Схема способу зворотного видавлювання

- комбінований – представляє собою комбінацію прямого та зворотного видавлювання, метал одночасно тече в напрямку прикладання сили тиску, і в зворотному напрямку (рис. 1.3).

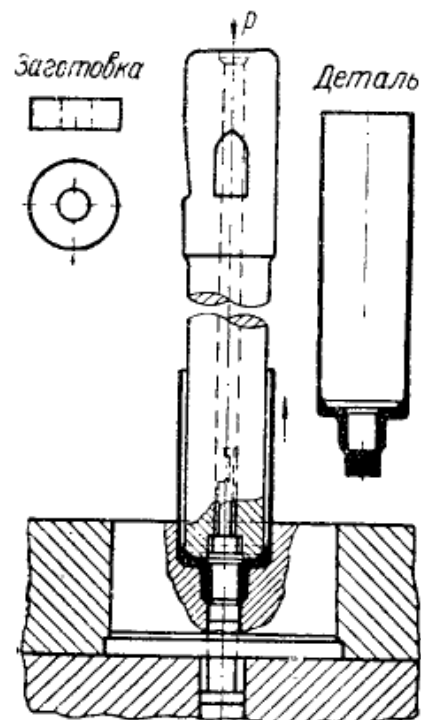


Рисунок 1.3. Схема способу комбінованого видавлювання

В роботі [1] автор детально описує цю класифікацію та наводить приклади деталей, які можна виготовити вищевказаними способами.

Спосіб холодного видавлювання має наступні незаперечні переваги технологічних процесів:

- висока точність розмірів і форми кінцевої деталі;
- підвищена міцність і твердість відштампованих деталей;
- високий показник коефіцієнту використання металу (0,75 – 0,95);
- збільшується несуча здатність поверхні деформованої деталі;
- можливість отримання складних деталей за один – два переходи з мінімальною величиною припусків для подальшої механічної обробки;
- пресове обладнання забезпечує великі можливості механізації і автоматизації технологічного процесу.

За допомогою способу гарячого видавлювання можливо отримувати деталі з набагато меншим зусиллям деформування ніж спосіб холодного видавлювання, однак при цьому показники міцності, твердості та точності деталей, що отримані за допомогою гарячого видавлювання будуть значно меншими.

Класифікація процесу витягування з потоншенням

Процес витягування з потоншенням, відноситься до класу товстостінного штампування і являє собою процес формоутворення порожнистої деталі шляхом примусового потоншення стінки заготовки при незначній зміні її внутрішнього діаметра при протягуванні заготовки через одну або кілька мaticь. Як правило застосовується в якості наступної операції формоутворення порожнистих заготовок, отриманих будь-яким способом металообробки (гарячим або холодним видавлюванням, витяжкою без потоншення, розгорткою і т.д.). Для процесу витягування з потоншенням вихідною заготовкою слугує порожниста заготовка з дном циліндричної, конічної або призматичної форми та з тонкими по відношенню до поперечних розмірів стінки постійної або змінної товщини. У загальній класифікації

способів штампування можна акцентувати увагу на наступних основних способах витягування з потоншенням, які застосовуються у виробництві:

- за формою вихідної заготовки та відштампованої деталі – витягування вісесиметричних і не вісесиметричних деталей зі змінною товщиною стінки, ступінчасту та безступінчасту;
- за видом руху заготовки і робочого інструмента - витягування в штампах при поступальному руху робочого інструмента, витягування в качаючихся матрицях, ротаційне витягування;
- за схемою прикладення додаткових сил – витягування з прикладанням додаткових сил, витягування без прикладення додаткових сил;
- за швидкісними умовами – статичне, швидкісне та високошвидкісне витягування;
- за температурними умовами - витягування без нагрівання заготовки і з нагріванням поза штампом;
- за умовами тертя - витягування з граничним і рідинним тертям при реалізації змішаної схеми дії сил тертя (активних і пасивних);
- за кількістю матриць - витягування через одну або кілька матриць;
- за типом технологічного оснащення та обладнання - витягування в штампах на пресовому обладнанні, витягування на верстатах для ротаційної обробки, витягування в інструментальних штампових блоках на автоматичних роторних машинах і роторно-конвеєрних лініях (АРЛ і РКЛ) [2].

В патронному виробництві застосовують переважно витягування в штампах на пресах та інструментальних блоках, на АРЛ і РКЛ через одну і (або) дві матриці з ковпачків, отриманих розгорток з потоншенням, без їх нагрівання, в умовах статичного та швидкісного штампування [3].

Процес витягування з потоншенням через одну матрицю

Витягування здійснюється в конічних матрицях пуансонами, що мають невеликий кут конусності (односторонній кут конусності β до $1^\circ 30'$). Процес витягування з потоншенням через одну матрицю має чотири істотно виражені

стадії (рис. 1.4): деформування дна і придонної ділянки заготовки (б, в), деформування стінки (г), деформування крайової частини заготовки (д).

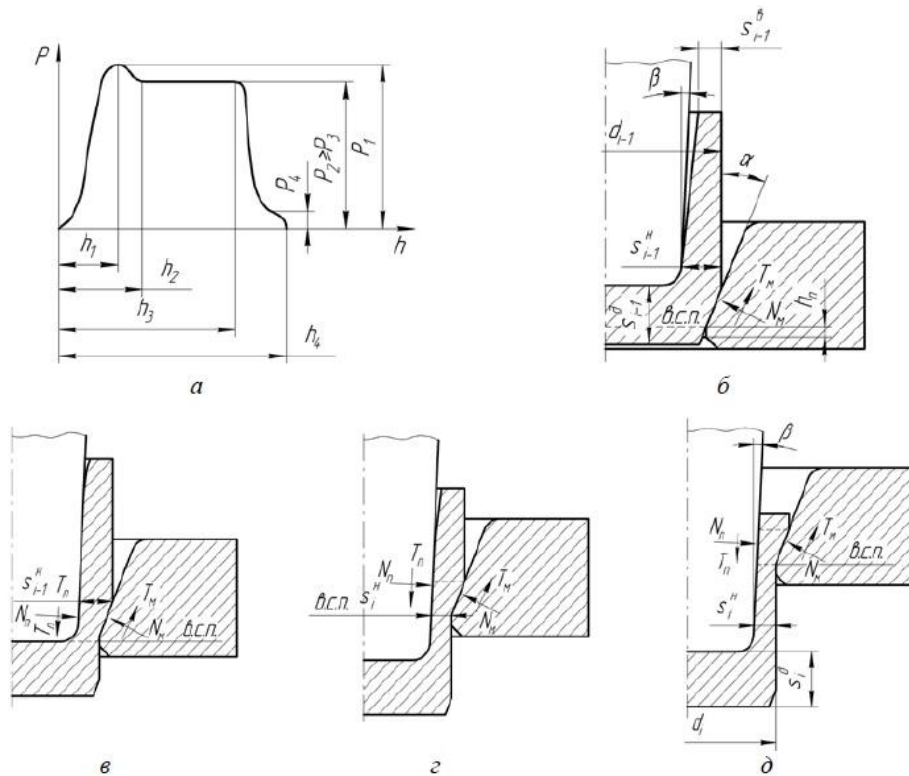


Рисунок 1.4. Машинна діаграма «зусилля – шлях інструмента» $P-h(a)$ і схема формозміни заготовки по стадіям процесу витягування з потоншенням через одну матрицю(б-д)

Перша, друга і четверта стадії є нестационарними, третя стадія – стаціонарна, що дає підставу відносити витягування з потоншенням до класу стаціонарних процесів. Перша стадія завершується при суміщенні торця пуансона з вхідним перерізом каліброваного циліндричного пояска матриці (в.с.п.), друга - при поєднанні нижнього розрахункового перетину пуансона з в.с.п. Початок четвертої, заключної стадії може бути встановлено по суміщенню кромки заготовки з початковим перетином геометричного осередку деформації. При витягуванні заготовки на невелику висоту, третя, стаціонарна стадія може бути відсутня. На рисунку 1.4 показані сили нормального тиску N_m , N_n і сили тертя T_m , T_n , які діють на контактних поверхнях заготовки з пуансоном і матрицею. В осьовому напрямку на стінку заготовки діє, так зване, «тягнуче» зусилля Q [4].

Зусилля деформування P_1 (максимальне) відповідає першій стадії процесу витягування, зусилля P_2 і P_3 – початку і кінця третьої, стаціонарної стадії процесу витягування. В результаті дослідження встановлено вплив на вказані характерні зусилля та їх відношення P_1/P_2 , P_1/P_3 таких технологічних факторів, як відносною товщини дна вихідної заготовки S_{i-1}/d_{i-1} , кута конусності матриці α , кута конусності дна заготовки γ (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Вплив кута конусу матриці і дна початкової заготовки на зусилля витягування з потоншенням ($d_{i-1} = 43$ мм; ($d_i = 39,6$ мм)

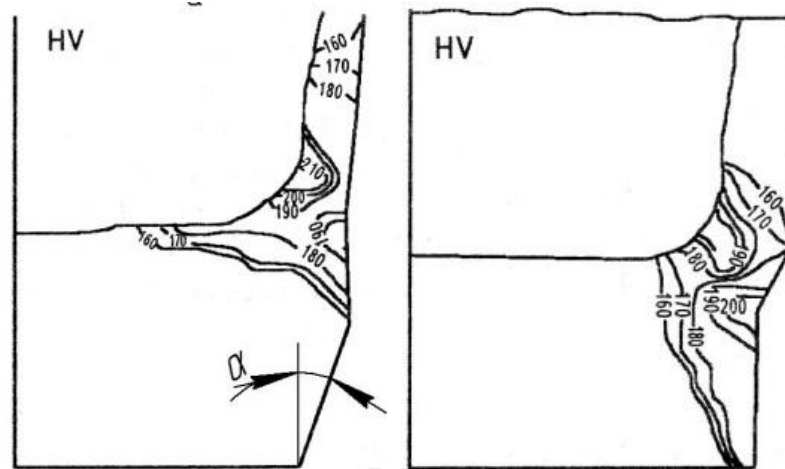
Кут конусу		Силові параметри процесу									
		При $S_{i-1}^A/d_{i-1} = 0,16$					При $S_{i-1}^A/d_{i-1} = 0,32$				
α	γ	P_1	P_2	P_3	P_1/P_2	P_1/P_3	P_1	P_2	P_3	P_1/P_2	P_1/P_3
		кН					кН				
5°	5°	128,1	66,0	54,4	1,9	2,4	142,5	71,8	59,4	2,0	2,4
	15°	127,6	67,7	56,1	1,9	2,3	124,3	54,2	46,2	2,3	2,7
	25°	111,7	64,4	56,1	1,7	2,0	128,2	54,5	34,6	2,4	3,7
15°	5°	128,7	59,4	47,8	2,2	2,7	148,5	70,1	56,1	2,1	2,7
	15°	121,1	60,2	49,5	2,0	2,5	126,5	60,3	47,8	2,1	2,7
	25°	120,5	59,4	49,5	2,0	2,4	121,5	57,7	44,5	2,1	2,7
25°	5°	145,2	60,2	49,5	2,4	2,9	158,9	74,3	56,1	2,1	2,8
	15°	128,2	55,3	49,5	2,3	2,6	132,0	63,5	44,6	2,1	3,0
	25°	120,4	54,4	52,8	2,2	2,3	117,2	58,6	41,3	2,0	2,8

Зазначені особливості зміни технологічного зусилля під час витягування пояснюються значним впливом зміни форми, розмірів осередку пластичної деформації (ОПД), схеми процесу деформування витягуванням при переході від першої до наступних стадій процесу [5].

На форму і розміри ОПД істотно впливають геометричні параметри дна заготовки (S_{i-1}^d/d_{i-1} , γ) і робочого інструмента (α), ступінь деформації (ϵ_i). Зі

зменшенням α , γ , S_{i-1}^D/d_{i-1} і збільшенням ϵ_i , розміри ОПД в поздовжньому та поперечному напрямках і його обсяг збільшується.

Деформований стан і механічні властивості (твердість) неоднорідні за обсягом осередку деформації (рис. 1.5). Области з найбільшими значеннями інтенсивності деформації (ϵ_i) і твердості по Віккерсу (HV) формуються в зонах заготовки, що контактують зовнішньою поверхнею заготовки із робочою поверхнею матриці та зонах, що контактують внутрішньою поверхнею заготовки – з радіусною ділянкою пуансона, що сполучається з його торцем.



а – $\alpha = 25^\circ$, $\gamma = 5^\circ$; б – $\alpha = 5^\circ$, $\gamma = 15^\circ$

Рисунок 1.5. Розподіл твердості HV по перетину товстостінної заготовки на першій і другій стадіях процесу витягування з потоншенням

Ці зони представляють собою локальні осередки деформації. У момент їх злиття, об'єм пластичного деформування металу і технологічне зусилля досягають максимальних значень. У придонній ділянці заготовки можливо визначити місце максимального зміцнення металу. При деяких умовах в цьому місці або на межі з таким місцем можливе формування небезпечного, з точки зору руйнування, перетину в заготовці [5].

Комбіноване витягування і область використання

Комбіноване витягування застосовується для отримання порожнистих циліндричних деталей в машинобудуванні та приладобудуванні. Також в патронному виробництві для виготовлення металевих елементів патронів:

оболонок, корпусів трасера, піростаканів та деяких гільз (рис. 1.6). Головною особливістю комбінованого витягування є значна зміна діаметра і примусове потоншення стінки заготовки [6].

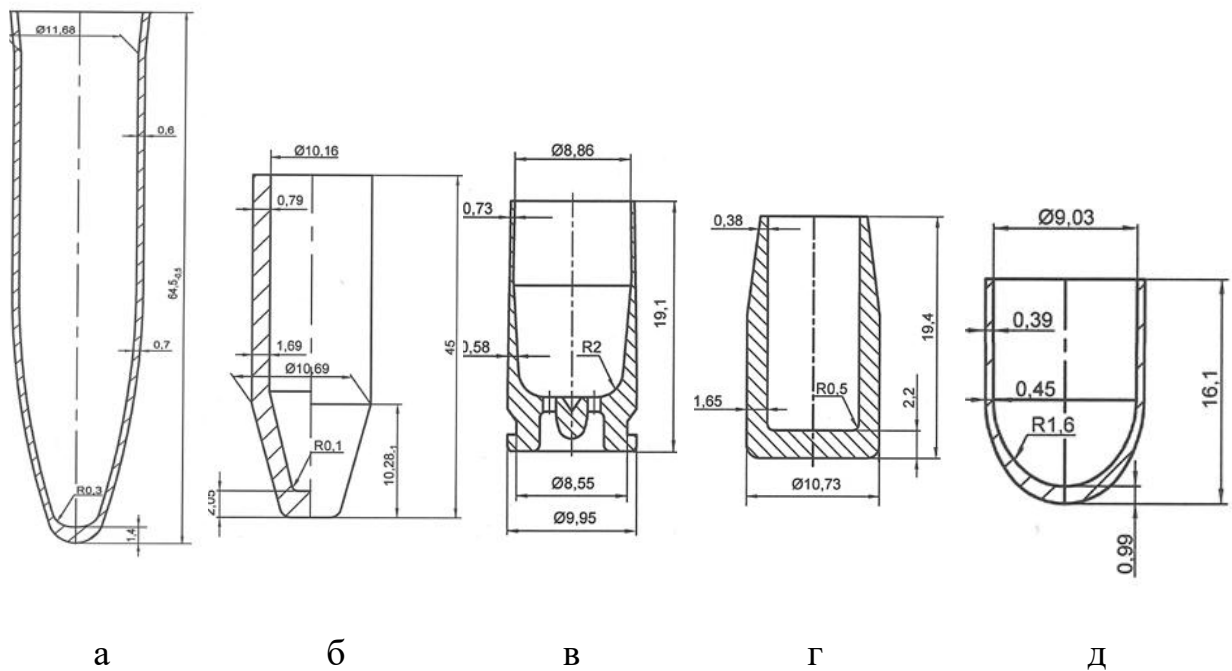


Рисунок 1.6. Металеві елементи патронів, що виготовляються за допомогою комбінованого витягування: а - оболонка; б - піростакан; в- пістолетна гільза; г - корпус трасера; д - оболонка до пістолетного патрону

Комбіноване витягування - процес пластичної формозміни плоскої або порожнистої заготовки шляхом витягування пуансоном через матрицю з одночасним істотним зменшенням її периметра і примусовим потоншенням стінки. Застосовується для виготовлення відносно високих ($h/d \leq 5...6$) порожнистих деталей з товщиною стінки менше, ніж товщина дна в 1,5...3,0 рази. При виготовленні кульних оболонок і гільз на останній операції деформування, як правило, повинні бути сформовані необхідні механічні характеристики за рахунок зміцнення матеріалу [7].

Витягування – видавлюванням та його технологічні параметри

Витягування-видавлюванням - найбільш складний комбінований процес штампування, в залежності від форми та розмірів вихідної заготовки і конструкції робочого інструменту - має кілька різновидів, які застосовують у виробництві патронів при виготовленні гільз, піростаканів, втулок і т.д.

Можливість перерозподілу металу по периметру в процесі штампування дозволяє застосовувати заготовки квадратної та шестигранної форми, можна отримати напівфабрикати з мінімальним нахилом і різностінністю, значно економити метал. Форма і розміри заготовки не тільки істотно впливають на коефіцієнт використання металу, але багато в чому визначають величину допустимого ступеня деформації, характер формозміни, максимальні технологічні навантаження. Наприклад застосування заготовки квадратного або шестигранного перерізу призводить до утворення неоднорідних деформацій по периметру і висоті зон, що може слугувати причиною утворення поздовжніх складок - тріщин у фланці [8].

У виробництві часто зустрічається варіант згортки-видавлювання, коли діаметр заготовки дорівнює діаметру приймальної частини матриці $D_0 = D_M$ (рис. 1.7).

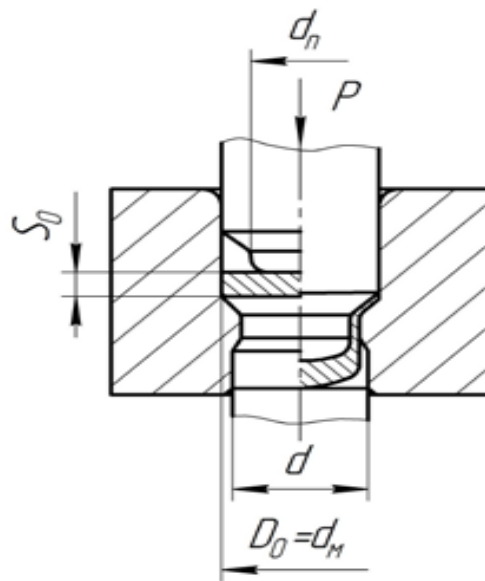


Рисунок 1.7. Схема згортки-видавлювання

Основними технологічними параметрами для процесу витягування-видавлювання є:

- гранична і допустима ступінь деформації;
- максимальне технологічне зусилля і питомі навантаження на інструмент;
- показники точності і шорсткості поверхонь штампованих деталей.

Критеріями граничного ступеня деформації при витягуванні-видавлюванням прийняті:

- можливість відриву дна заготовки на етапі витягування-висаджування;
- поява поздовжніх тріщин і складок на етапі видавлювання в кінці процесу;
- деформація або руйнування інструменту в кінці процесу штампування.

Максимальне технологічне зусилля, що розвивається під час процесу витягування-видавлюванням, приблизно відповідає процесу об'ємного штампування порожнистих деталей. Питомі навантаження на інструмент, як правило, досить високі і в окремих випадках можуть сягати межі міцності матеріалу робочого інструмента при стисненні (від 2500МПа до 3000МПа) [9].

Точність розмірів штампованих деталей після витягування-видавлюванням відповідає 9-му, 10-му квалітету, шорсткість поверхні Ra – від 0,63 мкм до 1,25 мкм

Основні фактори, що впливають на параметри процесу:

- форма і розміри заготовки;
- задіяна технологічна схема процесу;
- ступінь потоншення стінки і ступінь зменшення діаметра;
- форма і розміри робочих частин інструменту;
- матеріал заготовки та його стан;
- умови тертя;
- тип технологічного оснащення та обладнання, що застосовується.

Форма і розміри заготовки впливають на величину граничного ступеня деформації та на силові параметри процесу. Наприклад, застосування круглих або порожніх з плоским торцем заготовок для процесу витягування-видавлюванням дозволяє досягати більшої міри граничної деформації, виключає утворення поздовжніх тріщин, однак вимагає більшого технологічного зусилля деформування. Штампування шестигранних і

квадратних заготовок вимагає менших силових витрат, але гранична деформація обмежується не тільки можливістю відриву дна, але і при певних умовах деформації зумовлює утворенню поздовжніх тріщин або складок.

Збільшення ступеня деформації підвищує ймовірність відриву дна і призводить до зростання технологічного зусилля деформування і питомих навантажень на робочий інструмент. Невелика ступінь деформації (особливо невелике потоншення) може привести до утворення поздовжніх тріщин при штампуванні квадратних і шестигранних заготовок і порожнистих заготовок з корончатим торцем [10].

Збільшення кута конусності матриці знижує величину допустимого ступеня деформації і призводить до зростання технологічного зусилля. Оптимальне значення одностороннього кута конусності матриці α_m лежить в межах від 40° до 50° . Зменшення кута конусності уступу пуансона щодо робочого конуса матриці веде до зростання технологічного зусилля.

Висота виступаючої частини пуансона $h_{п1}$ повинна дорівнювати глибині порожнини заготовки (при штампуванні плоских заготовок ця висота не повинна бути менше глибини порожнини заготовки після етапу згортки). Зменшення висоти пуансона $h_{п1}$ призводить до утворення кільцевих напливів металу на внутрішній поверхні штампованої деталі. Збільшення висоти $h_{п1}$ може привести до відриву дна.

Збільшення радіусів сполучення на пуансоні і матриці сприяє зменшенню технологічного зусилля і підвищенню стійкості робочого інструмента, але може викликати появу поздовжніх тріщин у фланці і збільшити різнотонність в деталі, що виготовляється [1].

З підвищенням характеристик опору матеріалу заготовки ($\sigma_{0,2}$, σ_b) технологічне зусилля і питомі навантаження на інструмент зростають. Зменшення показників пластичності (ϵ_y , ϵ_p , ψ , δ) веде до зниження допустимого ступеня деформації.

Погіршення умов тертя несприятливо позначається на параметрах витягування-видавлюванням: збільшується зусилля штампування, знижується

допустима ступінь деформації, можливе утворення задирів на зовнішній і внутрішній поверхнях деталі. Тому доцільно застосовувати заготовки з міцним антифрикційним покриттям (фосфатовані, оміднені та ін.) [11].

Тип технологічного оснащення та обладнання впливає на жорсткість системи «прес-штамп-інструмент-заготовка» і на точність центрування заготовки в штампі, а отже, на якість штампованих деталей. Наприклад, застосування горизонтальних пресів з жорстким закріпленням повзуна по всій довжині ходу дозволяє вдвічі зменшити різностінність відштампованих напівфабрикатів в порівнянні з вертикальними пресами [12].

Для оцінки ступеня деформації слід приймати такі показники:

- коефіцієнт потоншення стінки m_s (формула 1.1):

$$m_s = S_l / S, \quad (1.1)$$

де S_l - товщина стінки напівфабрикату після операції витягування;

$S = S_0$ – товщина стінки порожнистої заготовки перед витягуванням-видавлюванням;

$S = S_l$ – товщина листової заготовки перед витягуванням;

- коефіцієнт зменшення діаметра m_d (формула 1.2):

$$m_d = d_l / A, \quad (1.2)$$

де d_l - діаметр напівфабрикату після деформації;

A - поперечний розмір заготовки;

$A = D_0$ - для порожнистої заготовки перед витягуванням-видавлюванням;

$A = a_4$ - сторона квадрата листової заготовки;

$A = 1,73a_6$ - діагональ шестигранної заготовки;

$A = D$ - діаметр круглої заготовки;

узагальнений показник ступеня деформації ψ (формула 1.3):

$$\psi = 1 - m_d m_s; \quad (1.3)$$

логарифмічна ступінь деформації e_1 :

- для верхньої частини штампованої деталі в зоні фланця (формула 1.4):

$$e_i = \ln \frac{(A - d_{п1})^2}{(d_{м} - d_{п1})^2 m_s m_d}; \quad (1.4)$$

- для нижньої частини корпусу штампованої деталі (формула 1.5):

$$e_i = \ln \frac{1}{m_s m_d}. \quad (1.5)$$

Маючи форму і розмірами готової деталі, не складно встановити придатність її до виготовлення застосовуючи витягування-видавлюванням. Тому попередньо складається ескіз розрахункової деталі (кінцевої заготовки).

Розрахункова деталь необхідна для оцінки можливості застосування витягування-видавлюванням і призначення оптимальних ступенів деформації по операціям формозміни. Розрахункові розміри визначають за номінальними розмірами готової деталі з урахуванням припусків на обрізування і можливої зміни розмірів при подальшій обробці: штампування або механічна обробка. Найчастіше за розрахункову деталь беруть напівфабрикат (кінцеву заготовку) після заключної операції витягування технологічного процесу.

У випадку коли готовий виріб подібний по формі напівфабрикату після витягування-видавлюванням, то розміри розрахункової деталі визначають за розмірами готового виробу з урахуванням припуску на механічну обробку. У випадку коли готовий виріб за формою відрізняється від напівфабрикату, то розміри розрахункової деталі можуть бути призначені, за розмірами напівфабрикату після кінцевої операції витягування в пропонованому технологічному процесі [13].

Штампування донної частини порожнистих деталей

Штампування донної частини - це процес формоутворення порожнистої деталі з профільним дном шляхом місцевого выдавлювання центральної порожнини і висаджування дна заготовки в штампі. За схемою заготовки цей процес відноситься до класу холодного об'ємного комбінованого штампування.

Штапування донної частини призначене для надання донній частині деталі необхідної форми, остаточних розмірів і механічних властивостей, забезпечити жорсткість дна і безвідмовність функціонування при складанні з навантаженням.

Такий технологічний процес штапування дозволяє виготовляти деталі з точністю від 8 кв до 10 кв. (від 4 кл до 5 кл.), шорсткістю поверхні до Ra 0,63 при значному деформаційному зміцненні металу в зоні дна ($\sigma_v \geq$ від 450 МПа до 600 МПа, HV до 220 ... 240) [14].

Місце операції штапування донної частини в технологічному процесі виготовлення гільз визначається тим, що дно гільзи після проведених операцій штапування повинно мати не тільки передбачені кресленням форму і остаточні розміри, але і кінцеві механічні властивості [15]. Тому дно отриманого напівфабрикату після операції штапування не повинно піддаватися термічній обробці, оскільки це викликає зміну отриманої структури металу і його механічних властивостей. Зазвичай для гільз з упором в скат (тобто без виступаючого фланця) операції першого та другого штапування слідують одна за одною після всіх операцій витягування. При виготовленні гільз з виступаючим фланцем першу операцію штапування вводять перед останньою витяжкою, а другу - після неї, при цьому термічна обробка не проводиться. Штапуванню повинна передувати обрізка відкритого торця, щоб забезпечити безперебійну роботу живильників і легке входження опорного пуансона в напівфабрикат. Крім того, напівфабрикати повинні бути добре знежирені і просушені.

Способи штапування дна заготовок класифікують за такими признаками:

- співвідношенням вільних і контактуючих з інструментом поверхонь заготовок;
- формі вихідної заготовки і порядкового номеру операції;
- швидкості процесу і характеру навантаження;
- точності штапованих деталей;

- ступеня складності штампового оснащення;
- типом обладнання.

За співвідношенням вільних $F_{св}$ і контактних F_k поверхонь деформуючої заготовки виділяють способи відкритого ($F_{св} F_k \geq 0,3 \dots 0,5$), напівзакритого ($F_{св} F_k = 0,15 \dots 0,30$), закритого ($F_{св} F_k \leq 0,03 \dots 0,10$) штампування (рис. 1.8).

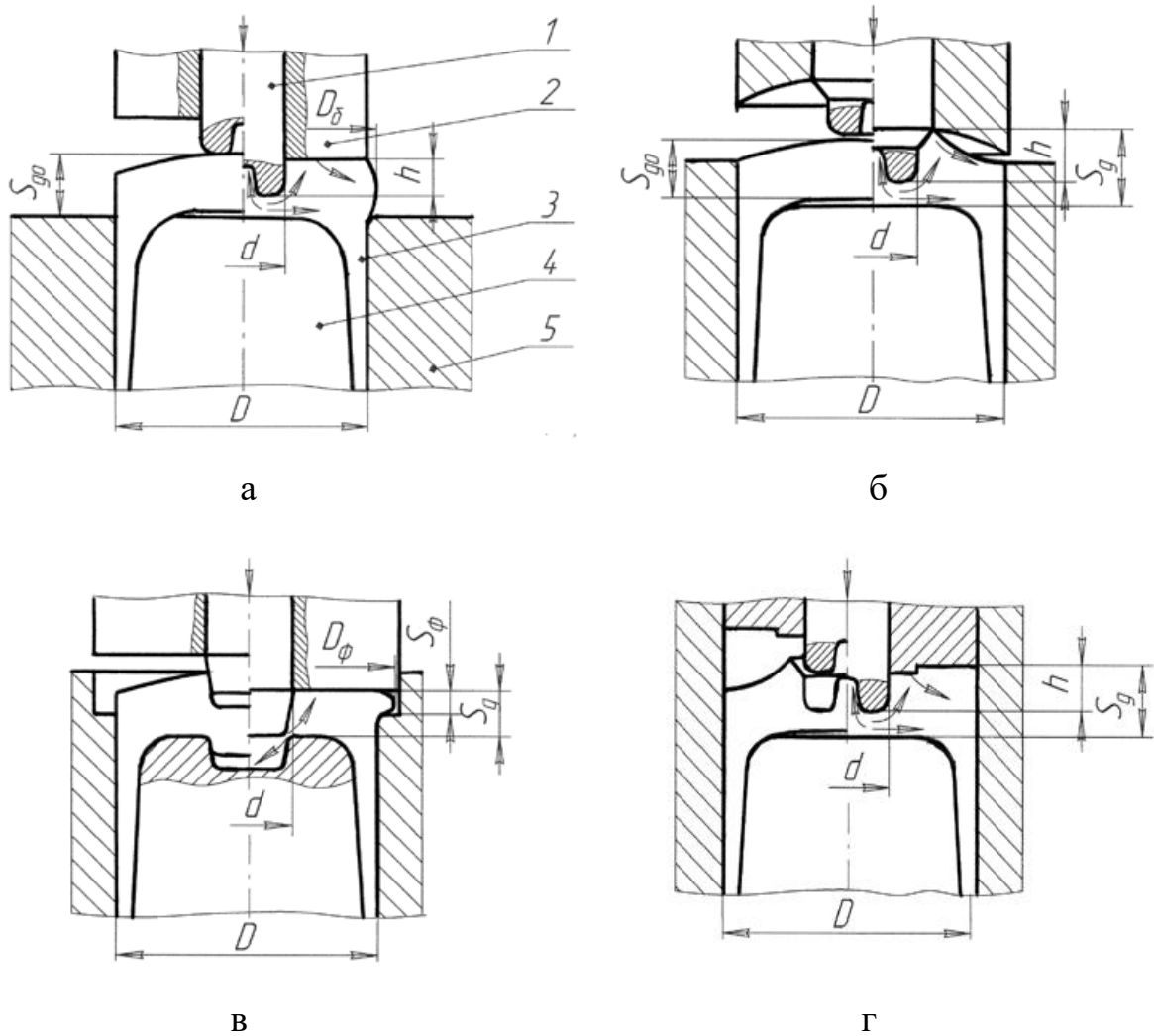


Рисунок 1.8. Способи штампування дна порожнистих деталей:
а - відкрите; б, в - напівзакрите; г - закрите; 1, 2 - ступінчастий пуансон; 3 - заготовка; 4 - опорний пуансон; 5 – матриця

Істотні особливості відкритого штампування - невисокі технологічні зусилля і питомі навантаження на робочий інструмент ($P \leq 1000 \dots 1100$ МПа) при низькій точності форми, розмірів деталі і збільшення відходу металу на подальшу механічну обробку, що практично виключає її застосування в патронному виробництві.

На відміну від відкритого при закритому штампуванні забезпечується можливість виготовлення деталей з відносно високим ступенем точності, майже повністю виключає подальшу механічну обробку. Однак, з огляду на ускладнення умов перебігу металу в закритому штампі, в кінці процесу виникають значні технологічні зусилля і питомі навантаження, близькі до граничних допустимих значень (від 2200 МПа до 2400 МПа) для матеріалу інструменту в загартованому (з подальшим високим відпуском) стані.

Напівзакритий спосіб штампування з точки зору силових параметрів і точності займає проміжне положення порівняно з розглянутими вище способами [16].

При багатоопераційних процесах слід розрізняти першу і наступну операцію штампування (наприклад, попередню і остаточну двоопераційну). При цьому, як правило, на першій операції штампування використовується вихідна порожниста, отримана під час витягування з потоншенням заготовка з плоским або напівсферичним дном, а на наступній - з профільованим дном. Перша операція штампування зазвичай виконується в напівзакритих штампах, а подальші - в закритих або також в напівзакритих штампах.

За швидкістю процесу розрізняють способи статичного ($v \leq 0,1 \dots 0,5$ м/с, $\varepsilon = 10^{-1} \dots 10^{-5}$, $\tau \geq 60$ с), швидкісного (v до $0,5 \dots 10,0$ м/с, $\tau \geq 10^{-1} \dots 10^{-3}$ с), високошвидкісного штампування ($v \geq 10,0$ м/с, $\varepsilon = 10^2 \dots 10^5$ с $^{-1}$, $\tau \geq 10^{-3} \dots 10^{-6}$ с).

За характером навантаження можна виділити способи штампування з неперервним і переривчастим (наприклад, циклічним) навантаженням, за точністю штампованих деталей - з великими, малими припусками і без припусків на наступну механічну обробку.

За ступенем складності штампового оснащення і застосування технологічного обладнання слід розрізняти формоутворення в штампах на механічних пресах вертикального виконання, на горизонтально-висадочних пресах, в інструментальних штампових блоках на автоматичних роторних лініях (АРЛ).

На рис. 1.9 відображено основний спосіб штампування дна гільз без виступаючого фланця [17].

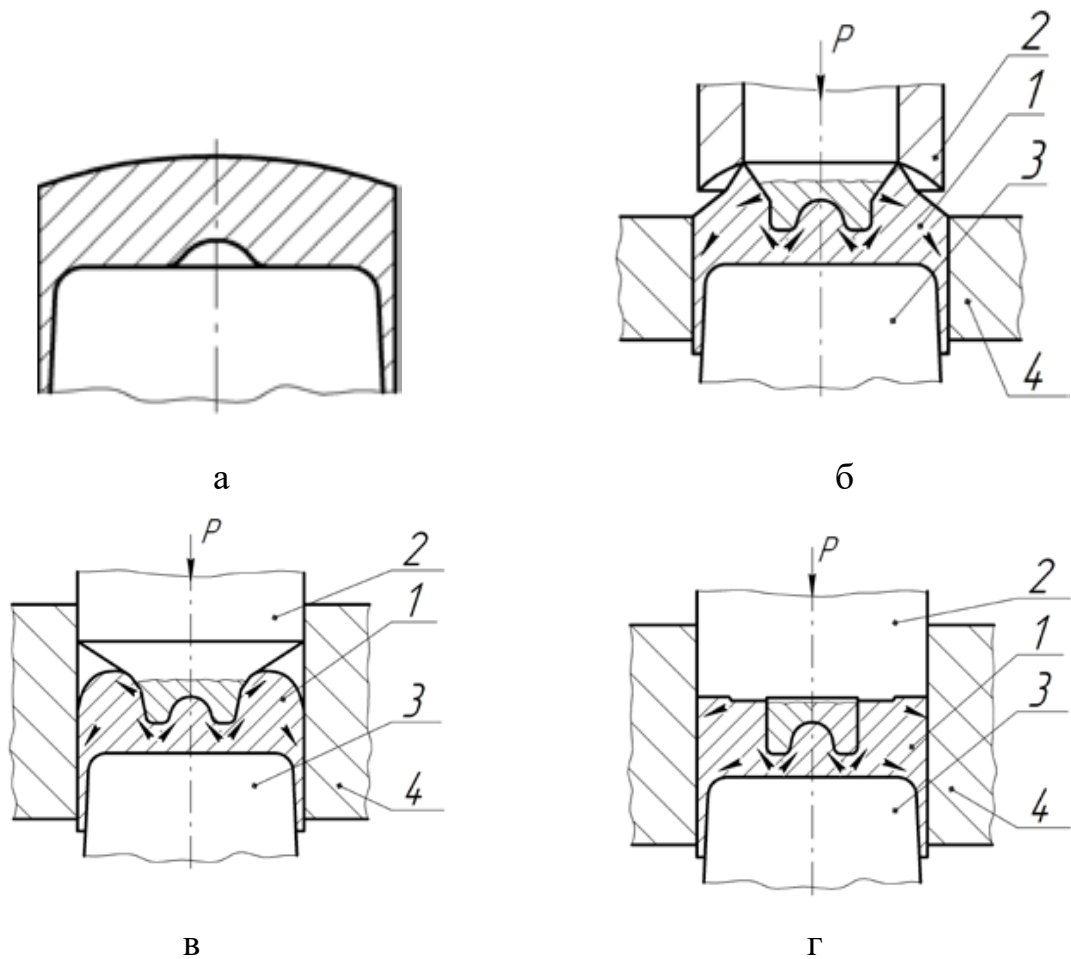


Рисунок 1.9. Технологічні схеми двоопераційного штампування дна гільз:

а – вихідна заготовка; б, в - перше (попереднє) штампування; г - друге (остаточне) штампування; 1 – заготовка; 2 – ступінчастий пуансон, 3 – опорний пуансон, 4 - матриця

Відомі також способи штампування гільз з канавкою, розроблені авторами, які можуть бути застосовані для виготовлення гільз великих калібрів (рис. 1.10). Цей спосіб передбачає застосування на другій операції штампування роз'ємної матриці 4 [17].

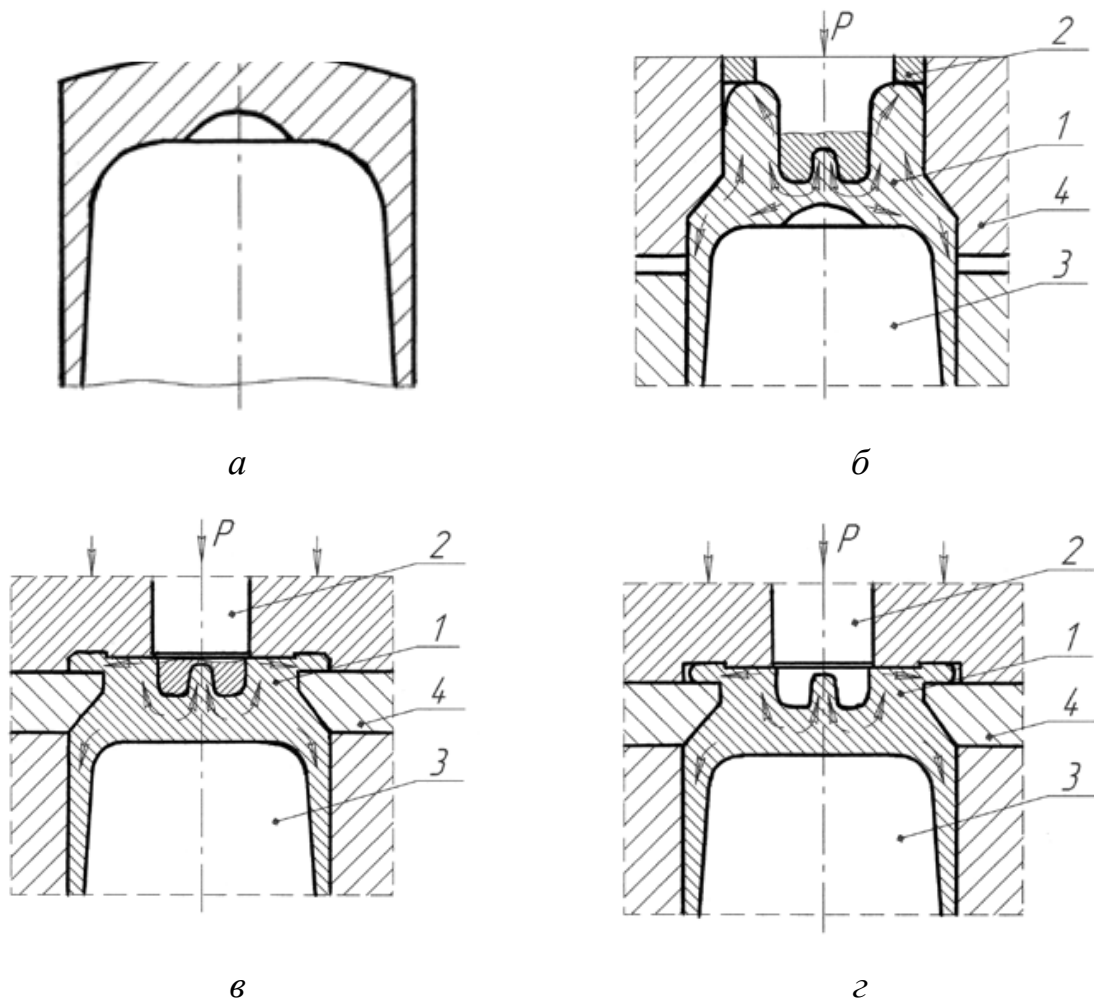


Рисунок 1.10. Технологічні схеми двоопераційного точного штампування дна гільз: а - вихідна заготовка; б - перше штампування; в - друге штампування з калібруванням фланця; г - друге штампування без калібрування фланця; 1 – заготовка; 2 – ступінчастий пуансон; 3 – опорний пуансон; 4 - матриця

Обтиск та його різновид

Одним з прогресивних процесів листової формозміни штампування є обтиск, застосовуваний для формоутворення порожнистих деталей з маловідходних трубних і порожнистих заготовок, одержуваних із застосуванням інших процесів штампування, наприклад витягування, видавлювання. Під обтиском розуміють процес отримання порожнистих деталей з різним профілем, що утворені з порожнистих тонкостінних заготовок шляхом зменшення поперечних розмірів і потовщення стінок

деформуючої частини заготовки при впливі на неї стискаючих сил і напружень (рис. 1.11) [18].

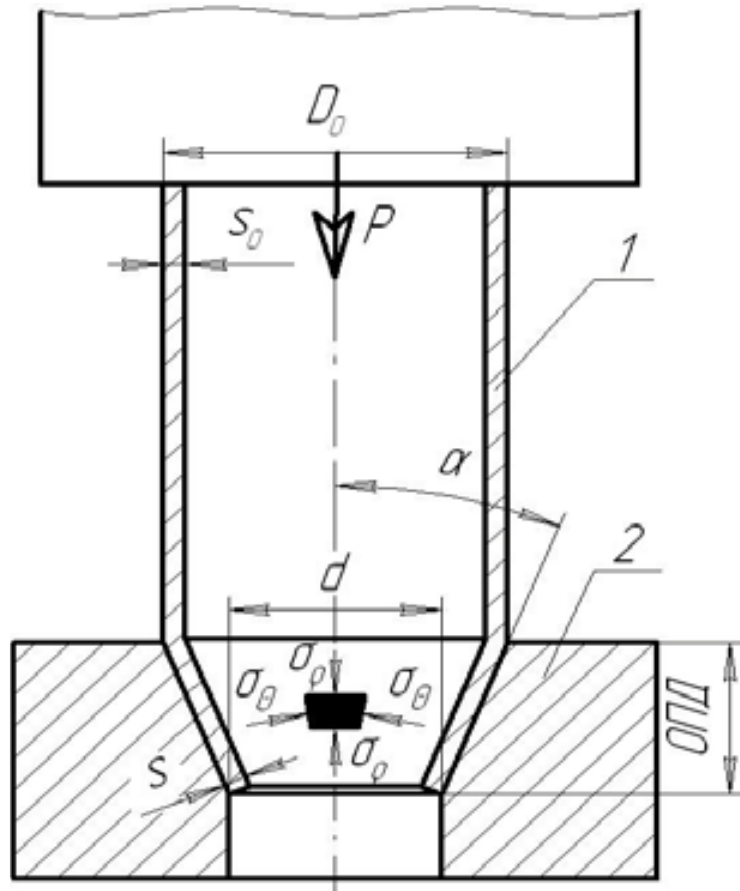


Рисунок 1.11. Технологічна схема обтиску трубної заготовки (1) в конічній матриці (2)

Процес обтиску можна розділити на простий обтиск і комбінований обтиск. При використанні простого процесу реалізується схема напружено-деформованого стану (НДС), характерна тільки для обтиску (рис. 1.11). При комбінованому процесі, НДС заготовки формується внаслідок взаємодії силових і деформуючих полів різних за класифікацією процесів, наприклад: витягування-обтиск, обтиск-роздача, витягування-обтиск-роздача, обтиск-калібрування. У патронному виробництві знаходить застосування останній процес. Обтиск гільз виконується з обтискним калібрувальним стержнем. При формуванні дульця на кінцевій стадії процесу кромка дульця заштовхується в зазор між обтискним стержнем і матрицею [19].

Основні ознаки класифікації способів обтиску:

- вид вихідної заготовки;

- схема дії основних і додаткових сил;
- вид взаємодії інструмента з заготовкою;
- умови деформації;
- тип застосовуваного технологічного устаткування [20].

По виду вихідної заготовки слід розрізняти обтиск порожнистої відкритої (трубної) заготовки і порожнистої напівзакритої (з дном). При цьому способи обтиску крайової частини тієї та іншої заготовок аналогічні, але способи обтиску закритою донної частини відрізняються від них [21].

У напрямку діючих на заготовку основних сил розрізняють поздовжній, поперечний і комбінований обтиск. При поздовжньому обтиску зусилля спрямовано уздовж осі, при поперечному (радіальному) - перпендикулярно їй, при комбінованому - одночасно уздовж і поперек осі заготовки. Найбільш широко застосовується поздовжній обтиск в штампах на пресах і в блоках на АРЛ. У патронному виробництві поперечний радіальний обтиск застосовується при складанні патронів - обтиску дульця гільзи з кулею. При виготовленні гранатометних пострілів під час обтиску обтікачів. Значно рідше застосовується поперечний обтиск в роз'ємних матрицях на пресах. Схема поперечного обтиску частіше реалізується на радіально-обтискних, ротаційно-обтискних, обкатних машинах і верстатах, на магнітно-імпульсних установках. За схемою прикладання додаткових сил розрізняють вільний обтиск, обтиск з підпором заготовки по зовнішній і (або) внутрішній поверхні, розташованим поза зоною осередку пластичної деформації, обтиск з підпором по внутрішній поверхні заготовки в зоні осередку пластичної деформації; обтиск з підпором по всім вільним поверхням заготовки [22].

При вільному обтиску з інструментом зі сторони зовнішньої поверхні контактує тільки деформуюча частина заготовки (див. рис. 1.11).

Механічна обробка гільз

Обробка елементів патронів різанням проводиться як на автоматичних роторних і роторно-конвеєрних лініях, що виконують дві і більше операцій,

так і на роздільному обладнанні - спеціальних автоматичних верстатах, кожен з яких виконує одну операцію [19].

При виготовленні елементи патронів піддаються обробці різцями, зенкерами, зенківки, свердлами і абразивним кругом. Процеси класифікуються за застосуванням інструменту та обладнання на два класи: різцеві та абразивні препарати (табл. 1.2). Процеси різцевої обробки діляться на токарні та свердлильні.

Різання металів супроводжується великими тисками на ріжучий інструмент і виділенням тепла, що викликає його зношування і викришування. Основні вимоги, що пред'являються до матеріалів для виготовлення ріжучої частини інструменту:

- 1) зносостійкість при високій температурі нагріву;
- 2) міцність ріжучої кромки;
- 3) збереження зносостійкості і міцності протягом тривалого часу [23].

Таблиця 1.2. Класифікація процесів обробки елементів патронів різанням.

Операція	Оброблюваний елемент патрону	Елемент кріплення	Робочий інструмент	Характеристика процесу
1	2	3	4	5
Токарна обробка				
Підрізання дульця і зняття фаски в отворі	Гільза	Втулка	Тангенціальний різець, спеціальний	Обробка порожнистої торцевої поверхні обертання з одночасним зняттям фасок з внутрішньої і зовнішньої поверхонь при відносно поєднаних рухах обертання деталей і осьового переміщення деталі або інструменту
Підрізання торця	Гільза	Втулка	Дисковий різець, спеціальний	Обробка порожнистого торця поверхні обертання при відношенні суміжних рухів обертання деталі та радіального переміщення деталі або інструменту

Операція	Оброблюваний елемент патрону	Елемент кріплення	Робочий інструмент	Характеристика процесу
1	2	3	4	5
Обточка фланця («головки»)	Гільза (гвинтова)	Цанга	Дисковий різець, спеціальний	Утворення циліндричної поверхні і притуплювання гострої кромки на "головці" при спільному рухах оброблюючої деталі і різця: обертання гільзи, поперечного переміщення інструменту
Зняття задирок із затравочного отвором (шарошування)	Гільза до патронів 12,7 мм і 14,5 мм	Втулка	Зенківка	Зняття задирок, отриманих свердлінням отворів приманок при поєднаних рухах обрублюючи гільзи і зенкування: обертання гільзи і осьове переміщення зенкера
Обточування конуса	Серцевина броньбійна	Цанга	Різець призматичний, спеціальний	Утворення конуса на стержні при поєднаних рухів обертання деталі і різця : обертання стержня, поперечного переміщення інструменту.
Попереднє і кінцеве обточування оживала	Серцевина броньбійна	Цанга	Різець призматичний, спеціальний. Різець круглий, спеціальний.	Утворення фасонного профілю на поверхні циліндричного стержня при поєднаних рухах оброблюваної деталі і різця : обертання стержня, осьового переміщення інструменту.
Підрізання торця і зняття фаски	Серцевина броньбійна	Цанга	Різець спеціальний	Обробка торцевої поверхні обертання з одночасним обробленням фаски при поєднаних рухах оброблюваної деталі і різця : обертання стержня поперечного переміщення різця.
Проточка канавки	Стакан	Цанга	Різець круглий, спеціальний	Обробка різанням канавки необхідного профілю: обертання деталі, поперечне переміщення різця.
Свердлильна обробка				

Операція	Оброблюваний елемент патрону	Елемент кріплення	Робочий інструмент	Характеристика процесу
1	2	3	4	5
Свердління затравочних отворів	Гільза до патронів 12,7 і 14,5 мм калібру	Втулка	Свердло	Утворення циліндричних наскрізних отворів в суцільному металі (одночасно 4 отвори у 4-х гільзах) при відносно поєднаних рухах оброблюваної деталі та інструмента: обертання свердла і осьового переміщення свердла або деталі.
Зенкування торця	Оболонка	Цанга	Зенкування	Обробка торцевої поверхні при відносно поєднаних рухах оброблюваної деталі і інструменту: обертання деталі, осьове переміщення інструмента.
Шліфування				
Шліфування циліндру	Серцевина бронебійна	-	Шліфувальний круг	Зняття шару металу обертаючим абразивним інструментом з автоматичною поздовжньою подачею ведучим кругом при різних відносних і сумісних рухах оброблюваної поверхні і круга.
Вихрове точіння				
Точіння фланця	Гільза до патронів 12,7 і 14,5 мм калібру	Втулка	Спеціальна головка с різцями	Утворення канавки спеціального профілю обертальним рухом гільзи і головки з різцем з відносно зміщеними осями і послідовним різанням кожним різцем.
Проточка живильної	Серцевина бронебійна	Втулка	Спеціальна головка с різцями	Утворення фасонного профілю на поверхні стержня: обертального руху стержня і різцевої головки з відносним зміщенням осі і поперечного руху головки з послідовним

Операція	Оброблюваний елемент патрону	Елемент кріплення	Робочий інструмент	Характеристика процесу
1	2	3	4	5
				різанням кожним різцем.

Обробка елементів патронів різанням виконується на верстатах-автоматах і на АРЛ. Час обробки деталей вимірюється секундами, а перестановка робочого інструменту - хвилинами. Саме тому в патронному виробництві економічно виправдано використовувати матеріал, який забезпечить максимальну стійкість інструменту, навіть якщо такий матеріал виявиться більш дорогим.

Термічна обробка

Термічною обробкою називають процес обробки металевих деталей шляхом регульованого температурного впливу з метою формування певної структури і властивостей матеріалу деталі в необхідному напрямку і у виділених контрольованих зонах. Такий вплив може поєднуватися з деформаційними, хімічними та іншими впливами [24].

Термічна обробка є одним з ключових методів обробки металів, що реалізується спільно з методом обробки металів тиском (ОМТ), в холодному штампуванні, в комплексній технології виготовлення металевих елементів патронів.

Основним призначенням термічної обробки при виготовленні гільз, сердечників, оболонок та інших елементів патронів:

- відновлення пластичних властивостей металу після операції холодного оброблення тиском;
- надання готовим деталям спільно з операціями холодного штампування заданих механічних властивостей;
- усунення залишкових напружень, які призводять до самовільного розтріскування латунних гільз і загартованих сталевих сердечників.

Від якісного проведення процесу термічної обробки залежать:

- якість випущених елементів патронів і патронів в цілому, визначається надійністю їх функціонування;
- тривалість технологічного циклу;
- стійкість робочого інструмента [25].

Вид термічної обробки визначається типом фазових і структурних перетворень в металі під час нагрівання і охолодження. Термічна обробка в цілому підрозділяється на: термічну, термомеханічну і хіміко-термічну. Термічна обробка полягає лише в термічному впливі на метал або сплав, термомеханічна - в поєднанні термічного впливу і пластичної деформації, хіміко-термічна - в поєднанні термічного та хімічного впливів.

Термічна обробка включає наступні основні види: відпал, загартування, відпуск і старіння. Ці види термічної обробки відносяться до сталей, до кольорових металів і сплавів. Кожен з видів термічної обробки підрозділяється на підвиди, різновиди та способи виконання [26].

Виробничі назви окремих процесів термічної обробки утворювалися історично і спиралися не на характер внутрішніх перетворень в металі або сплаві, а на зовнішні ознаки. У зв'язку з цим при вживанні деяких виробничих назв термічної обробки, наприклад «нормалізація», іноді важко зрозуміти, яку фізичну природу несе цей процес. У таких випадках слід застосовувати, замість виробничого терміну або паралельно з ним, термін по прийнятій, науково обґрунтованій класифікації (рис.1.12) [27].

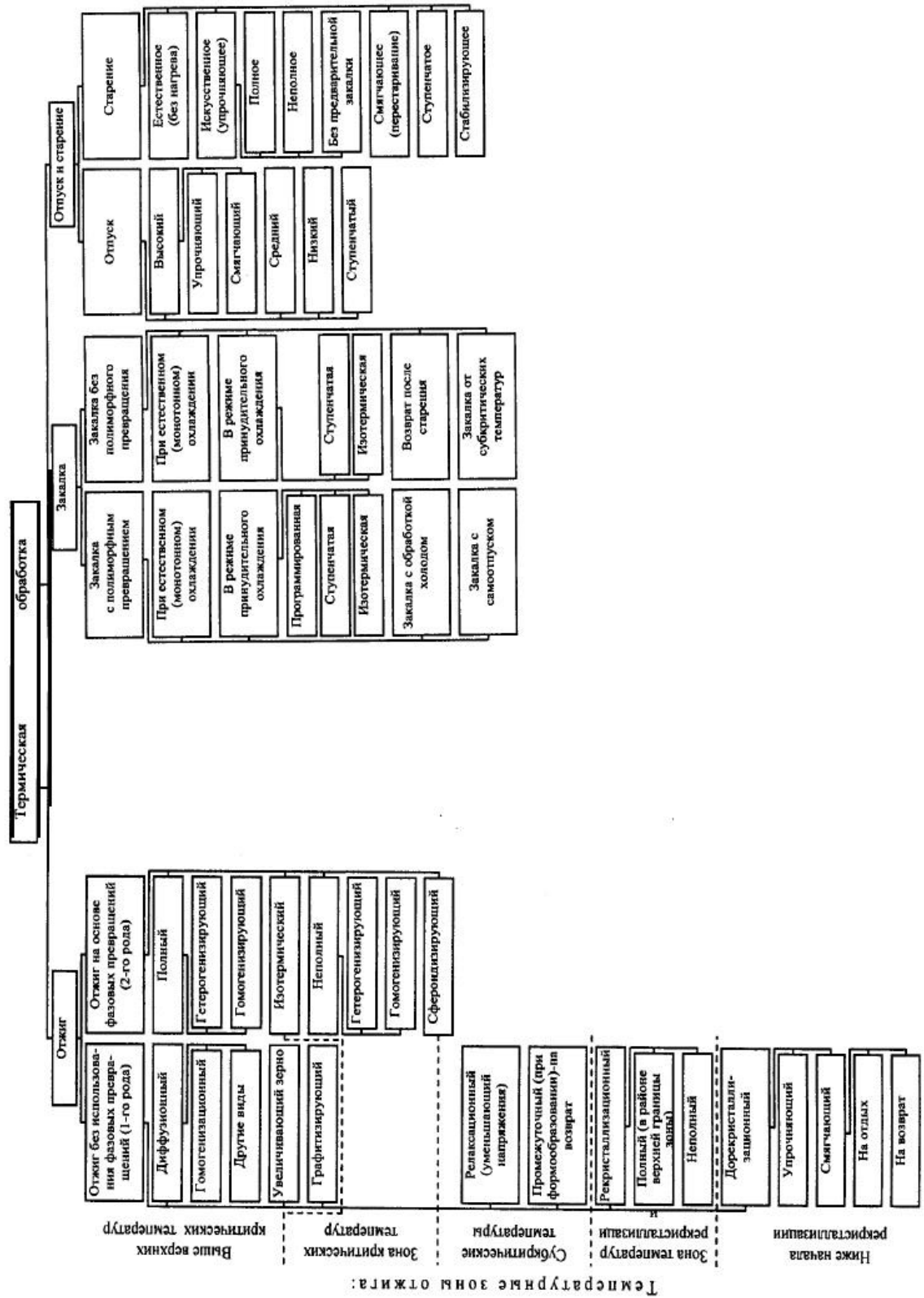


Рисунок 1.12. Класифікація процесів термічної обробки

Хімічна обробка гільз

Хімічна обробка елементів патронів виконується з метою отримання покриттів, що оберігають готові вироби від корозії, а також покриття, є технологічним мастилом при виконанні операцій штампування.

Хімічна обробка складається з основних і допоміжних процесів.

До основних відносяться процеси отримання різного роду покриттів.

Покриття класифікують за основним призначенням, способу нанесення і масі [28].

За основним призначенням покриття діляться на захисні (фосфатування, лакування, латунювання) і технологічні (фосфатування, омилання, латунювання і т. д.).

Захисні покриття застосовуються для захисту виробів від корозії в різноманітних умовах.

Технологічні покриття призначені для захисту виробів від корозії під час між операційного зберігання та транспортування і є технологічним мастилом на операціях штампування.

За способом нанесення покриття поділяються на хімічні (фосфатування, пасивація), покриття прямого нанесення, гальванічні.

Хімічні покриття наносять шляхом хімічної обробки поверхні у відповідних розчинах [29].

Гальванічні покриття наносять шляхом катодного відновлення постійним струмом катіонів металу з відповідних електролітів.

Покриття прямого нанесення - лакувальні, покриття пастами і т. д.

За видом покриття діляться на металеві (латунювання) і неметалеві (фосфатування, лакування).

Допоміжні операції служать для очищення поверхні виробів перед нанесенням покриттів, а також для поліпшення якості покриттів. До допоміжних операцій відносяться такі процеси хімічної обробки як: знежирення, травлення, декапірування, промивка, омилання [30].

1.2 Теоретичні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини

Значна кількість геометричних форм деталей, що штамнуються і марок оброблюваних матеріалів потребують великої кількості схем деформування. Схема прикладання зовнішніх сил повинна враховувати головні закономірності течії матеріалу, особливо при деформуванні деталей складної конфігурації. Вибір схеми процесу визначається розмірами деталі, формою і фізико – механічними властивостями металу заготовки і залежить від:

- результатів аналізу напруженого стану;
- тиску течії при формоутворенні;
- результатів аналізу деформованого стану заготовки і співвідношення окремих елементів деталі.

У джерелах [2] [31] зібрані теоретичні методи аналізу ОМТ які дозволяють визначити НДС заготовки, що деформується з врахуванням зміцнення та впливу зовнішнього тертя на закономірності процесів формозміни. Викладається методика розробки технологічних процесів. Приводяться методи розрахунку деформацій і зусиль для різних процесів ОМТ.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій на сьогодні дає змогу значно полегшити проведення інженерних розрахунків, моделювання технологічних процесів і їх аналізу. У тому числі знайшли широке застосування спеціалізовані програмні пакети, які вирішують задачі ОМТ.

Робота [32] представляє один із таких – систему DEFORM, що призначена для моделювання технологічних процесів обробки тиском.

Суть комп'ютерного моделювання полягає в наступному: на основі математичної моделі з допомогою електронно – обчислювальної машини проводиться серія обчислювальних експериментів. Обчислювальний експеримент дозволяє замінити дорогий натурний експеримент розрахунками на електронно – обчислювальній машині. Він дозволяє в досить короткі терміни і без значних матеріальних витрат здійснювати дослідження великої

кількості варіантів об'єкта, що проектується або процесу для різних режимів його експлуатації, що значно скорочує терміни розробки складних систем і їх впровадження у виробництво.

Програма здатна моделювати наступні процеси:

- прокатування;
- витягування;
- кування;
- холодне, напівгаряче і гаряче штампування;
- інші.

Розрахункова частина даної програми ґрунтується на методі скінченних елементів (МСЕ), описаному автором джерела [32]. Цей метод на сьогоднішній день є одним із найнадійніших і найвідоміших та широко використовується у механіці.

Його перевагами є:

- розміри елементів в сітці за потреби можна зменшувати або збільшувати;
- властивості матеріалів тіла, не повинні бути однаковими;
- можливість апроксимації тіл зі складною формою країв;
- можливість задавати граничні умови, що суттєво скорочує час розрахунків;
- велика розмірність рівнянь дозволяє отримати високу точність розрахунків.

Головним недоліком МСЕ є потреба у високій потужності електронно-обчислювальних машин.

У роботі [32] також приведена математична постановка задачі при моделюванні МСЕ процесів холодного видавлювання. Вона включає в себе сукупність різних математичних співвідношень, що описують поведінку і властивості об'єкта моделювання.

Авторами джерела [33] рекомендовано основні етапи проектування технологічного процесу холодного об'ємного штампування (ХОШ), що включає в себе наступні етапи:

- аналіз технологічності і розробка креслення деталі;
- розрахунок об'єму заготовки, вибір форми і розміру вихідного матеріалу по сортаменту, що випускається промисловістю; визначення технологічних операцій підготовки матеріалу; вибір способу поділу вихідного матеріалу на заготовки;
- визначення технології підготовки заготовки до видавлювання;
- розробка технологічного процесу формозміни з визначенням кількості операцій, доцільності їх суміщення чи послідовності проведення;
- вибір і розрахунок конструкції робочих деталей інструменту для штампування (пуансонів, матриць, оправок);
- розробка технологічного завдання на проектування штампу;
- розробка технологічних вимог для обладнання (величина ходу, зусилля і графік навантаження, наявність виштовхувачів, знімачів тощо);
- розробка технологічного завдання на засоби механізації і автоматизації;
- розрахунок економічної ефективності від впровадження ХОШ в порівнянні з обробкою різанням.

У роботах [32–33] розглянуті головні особливості технологічних переходів. Приводяться зразки типових конструкцій штампів холодного видавлювання. Штампи для холодного видавлювання працюють в тяжких умовах, приймаючи великі навантаження від високих питомих зусиль, значних сил тертя металу об інструмент, температурних змін при формоутворенні. Для забезпечення стабільності технологічного процесу, виготовлення заданої якості деталей і економічно обґрунтованій стійкості інструмента, штампова оснастка повинна задовольняти наступним вимогам:

- безпечність;
- міцність і жорсткість;

- уніфікація деталей;
- технологічність форми і розмірів деталей штампу;
- легкість заміни деталей;
- простота і надійність роботи штампу;
- можливість подачі змащення.

Джерела [32–33] описують методику розрахунку зусиль деформування деталей при холодному видавлюванні. Проведений порівняльний аналіз теоретичних та емпіричних залежностей для визначення зусиль видавлювання. Розглянуті фактори, які мають вплив на зусилля деформації.

Методика вибору пресового обладнання для холодного видавлювання приведена авторами джерел [32–33]. Детально розглянуте штампування на гідравлічних пресах, які через свої характеристики широко використовують при різних видах штампування видавлюванням.

При підготовці до штампування гільз для артилерійських снарядів, значна увага припадає саме на стадію проектування. У зв'язку з тим, що необхідно забезпечити не тільки габаритні розміри кінцевої деталі, а і фізико-механічні властивості кінцевого виробу. На сьогодні існує багато різних програмних забезпечень, які дозволяють попередньо змодельовати процес отримання виробу та проаналізувати отриману мікроструктуру внаслідок обраного технологічного процесу.

Перед визначенням параметрів процесу виготовлення попередньої заготовки гільзи для артилерійських снарядів середнього калібру, було розглянуто схожі процеси отримання порожнистих виробів та проаналізовані отримані результати для остаточного визначення параметрів виготовлення деталей за обраною темою.

В дослідженні [34] авторами було визначено значення трьох важливих параметрів процесу глибокого витягування, а саме температури заготовки, радіуса дуги та швидкості штампування для характеристик глибокого витягування алюмінієвого листа 7075. Поєднання МСЕ та аналізу Тагучі було використано для визначення впливу параметрів процесу. Моделювання

проводили за ортогональним масивом за допомогою програмного забезпечення DEFORM 2D. На основі прогнозованої деформації глибоко витягнутого стакану та аналізу дисперсійного тесту (Anova) було виявлено, що температура заготовки найбільше впливає на сформованість алюмінієвого матеріалу, а також швидкість штампування та радіус дуги штампа.

На основі деталей, що формують потреби у співвідношенні висоти та діаметра, в роботі [35] авторами запропоновано новий процес глибокого витягування з незалежним радіальним тиском націлюючись на конічний стакан з тонкостінного алюмінієвого сплаву 5A06, досліджували вплив гідравлічних шляхів навантаження та співвідношення радіального тиску на розподіл товщини стінки за допомогою чисельного моделювання. Результати дослідів показують, що розумний збіг тиску в камері рідини та незалежного радіального тиску може ефективно стримувати появу тріщини на дні конуса та дефекти внутрішньої зморшки в конічній ділянці стінки деталі.

Авторами в роботі [36], було відображено процес глибокого витягування круглого стакану з магнієвого сплаву AZ31B із застосуванням програмного забезпечення ABAQUS / Standard. Результати моделювання, отримані в результаті цього дослідження добре погоджуються з експериментальними результатами і показують, що граничне відношення витягування зростає із збільшенням температури формування.

В роботі [37], авторами було описано формування порожнистого виробу з алюмінію шляхом роторної екструзії.

В джерелі [38], здійснено чисельне моделювання отримання циліндричного стакану сплаву In718 за допомогою зворотної екструзії з різними параметрами. Досліджено зміну структури зерна в різних областях формування деталі. В результаті дослідження було встановлено, що краще отримувати більш дрібний та рівномірний розмір зерна з 1000 (°C) -1050 (°C) та 5 (мм/с) у циліндричному стакані сплаву In718 за допомогою екструзії назад згідно з дослідженням.

В роботі [39], автори за допомогою програмного забезпечення DEFORM 3D, відобразили важливість використання програмного забезпечення, для отримання деталей з необхідними габаритними розмірами та фізико-механічними властивостями.

Метод виготовлення порожнистого вісесиметричного виробу описано в роботі [40]. В результаті отримано діаметр на 1 – 3% менший за розрахунковий, а висота після попереднього витягування 0,7 – 0,85 висоти готового виробу.

В роботі [41] описано спосіб отримання порожнистих деталей як з фланцями так і без. Заготовку нагрівають та піддають деформації у штампі, попередньо нагрівши заготовку, щоб співвідношення температури заготовки до температури штампу було в діапазоні від 0,7 до 7,4. Нагрів заготовки виконують у визначеному температурному інтервалі, який залежить від матеріалу заготовки.

Спосіб гарячого штампування порожнистих виробів з періодичним перерізом зовнішньої бокової частини описано в [42]. Формотворення виробу виконується за один хід пуансону. Зовнішню бокову поверхню виробу формують в розбірній втулці, яка розміщена в контейнері преса. В результаті знижуються температурні навантаження на виріб та інструмент, а також покращується якість поверхні.

В роботі [43] авторами приведено спосіб об'ємного гарячого штампування деталей типу стакан. Штампування виконується в 3 стадії. На першій стадії формується потовщення в торці заготовки шляхом осадження. На другій стадії з напівфабрикату формують шайбу. На третій стадії здійснюється видавлювання шайби, внаслідок чого отримують деталь типу стакан.

В роботі [44] відображено спосіб виготовлення порожнистих виробів. Авторами показано спосіб формування вихідної заготовки, попереднє та остаточне формування центрального виступу. Попереднє формування

центрального виступу виконується при формуванні вихідної заготовки осадженням. В результаті забезпечується підвищення якості готової деталі.

Розглянуто питання з приводу виготовлення деталі комбінованим видавлюванням зі складною конфігурацією зовнішньої та внутрішньої поверхонь [45]. Оцінка та дослідження наведеного процесу здійснюється за допомогою методу комп'ютерного моделювання. Показано графік технологічних зусиль, величину середнього напруження, напруження стиску та розтягу.

В роботі [46] авторами відображено метод отримання вісесиметричних штампованих заготовок типу стакан з високоміцного алюмінієвого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu, легованого скандієм та цирконієм. Нагріту заготовку деформують в два етапи. На першому етапі здійснюють осадження заготовки. На другому етапі формують стінки виробу із заданим профілем та дном. Ці два етапи здійснюють за одну операцію локальним прикладанням навантаження. Зовнішню поверхню формують пуансоном закріпленим під кутом 5° до вертикальної осі матриці. Пуансон обертають зі швидкістю 200 об/хв. Матрицю переміщують назустріч пуансону зі швидкістю, яка змінюється від 15 до 1 мм/с. Як наслідок підвищується коефіцієнт використання матеріалу та якість отриманих виробів.

Спосіб виготовлення деталей типу вісесиметричного стакану описано в джерелі [47]. З вихідної циліндричної заготовки, гарячим об'ємним штампуванням в два етапи формують напівфабрикат. На першому етапі шляхом осадження змінюють габаритні розміри заготовки зі зменшенням висоти та збільшенням діаметральних розмірів. На другому етапі формують стінку чаші та донну частину. Отриманий напівфабрикат піддають термічній та механічній обробці. В результаті отримується пророблення структури всього об'єму заготовки.

Видавлювання з товстостінної трубної заготовки приведено в статті [48]. Досліди проводилися за допомогою математичної моделі для операції зворотного видавлювання короткочасної повзучості, який має циліндричну

анізотропію механічних властивостей. Отримані результати значень зусилля операції зворотного видавлювання. В розрахунках враховувалася кінематика процесу, швидкості деформацій, розподіл еквівалентної швидкості деформацій та деформацій вздовж течії матеріалу. Визначено напруження при деформуванні. В залежності від кута конусності пуансона визначено силові режими та зроблені графічні залежності їх зміни. Матеріал для дослідів ВТ6С і АМг6. Робота виконувалася за грантом РФФИ №07-01-00041.

Розрахунок граничної глибини вдавлення в заготовку з міді було проведено в джерелі [49]. В статті використана методика А.М. Дмитрієва і А.Л. Воронцова для перевірки збіжності розрахункових та експериментальних результатів. Методика дозволила відтворити реальні закономірності процесу видавлювання і вибрати обґрунтовані рішення по вибору переходів та обладнання.

Аналіз процесу гарячого зворотного видавлювання в програмі QFORM досліджувався в джерелі [50]. Розрахунки проведені для визначення течії металу заготовки, її напруженого стану і формозміни в процесі деформування. В якості вихідних даних було прийнято: геометричні параметри заготовки, температури, граничні умови, швидкість переміщення пуансона.

МСЕ в роботі [51] було проведено моделювання операції холодного зворотного видавлювання циліндричної заготовки для визначення технологічних параметрів процесу. В якості параметрів для розрахунку було взято НДС. В якості результатів було отримано наступні дані: розподіл деформацій, графік залежності зусилля від ходу пуансона, графік залежності енергій від ходу пуансона. Отримані результати дозволяють значно знизити енергетичні затрати під час деформування та покращити технологічний процес за рахунок зменшення кількості технологічних переходів.

Авторами [52] розглянутий процес зворотного видавлювання деталей з використанням схеми зі зворотним рухом контейнера. Результати дослідів були порівняні з результатами моделювання в DEFORM 3D. Для дослідів використали заготовки зі сталі 60, отримані напівфабрикати діаметром 36 мм

і 60 мм. Для обох випадків визначені результати відображені у графіках та порівнянні з результатами розрахованими за методами Овчинникова О.Г. і Шофмана Л.А.

Глибоке витягування з потоншенням досліджено і описано в статті [53]. Розглянуто основні складові та характеристики процесу. Дослідження проводилися за допомогою програми DEFORM використовуючи МСЕ. Досліджувалися такі характеристики, як температура, яка виникає під час деформації, вплив швидкості деформації при різному змащенні.

В статті [54] проведено дослідження основних параметрів витягування з потоншенням. Для моделювання процесу використовувався програмний комплекс DEFORM. Встановлені параметри процесу: зусилля, напруження та деформації.

Можливості покращення процесу витягування досліджувалося в джерелі [55]. На основі елементарної теорії пластичної течії були отримані напруження і зусилля при витягуванні з потоншенням заготовок зі змінною товщиною стінки. Моделювання проводилося за допомогою МСЕ. Експерименти перевірені на двох теоретичних моделях.

В статті [56] розглянуто та досліджено процес витягування з потоншенням циліндричної ємності під тиском. Аналіз проводився за допомогою МСЕ. Ціль аналізу було встановити граничні значення процесу для максимальної можливості деформування та якісної поверхні. Була створена модель для теоретичного розрахунку параметрів та визначення напружень. Вдалося зменшити навантаження на пуансоні та знизити розтягуючі напруження, які виникають під час процесу витягування з потоншенням.

Зменшення різностінності при витягуванні з потоншенням в двох послідовно розташованих матрицях досліджено в статті [57]. Описані правила розрахунку кількості операцій при витягуванні з потоншенням, закономірності зміни відносної різностінності в залежності від відносного ступеня деформації. Наведені залежності в пропонованій методиці дозволяють отримати однакову товщину стінки і стабільність протікання процесу.

В статті [58] проведено дослідження процесу витягування деталі стакан в програмі QFORM. Було змодельовано процес витягування в конічній матриці. Описано характеристики стадій деформування при витягуванні. Встановлено залежності зусилля від переміщення.

В роботі [59] приведена модель тонкостінного циліндричного витягування з потоншенням із анізотропних матеріалів. Досліджено вплив технологічних параметрів на напружений та деформований стан. Встановлено силові режими витягування в конічній матриці.

В статті [60] розглянуто вплив різностінності в виробах отриманих за допомогою витягування з потоншенням та нерівномірність розподілення властивостей твердості в поперечних перерізах. Показано як інтенсивність деформації впливає на товщину стінки. Запропонована математична модель її врахування. Наведені способи вказаного врахування при проектуванні штампового обладнання.

В статті [61] встановлено вплив технологічних параметрів накопичених мікропошкоджень і граничні можливості формозміни операції витягування з потоншенням стінки вісесиметричних анізотропних заготовок. Проведені дослідження показують параметри коефіцієнта потоншення, і як він змінюється в процесі витягування при різних кутах матриці. Отримані дані узгоджуються з результатами експериментально підтвердженими в інших статтях.

Авторами роботи [62] досліджені силові режими витягування з потоншенням стінки в вісесиметричних заготовках. Встановлено силові режими, кінематику течії матеріалу. Також досліджено напружений та деформований стани. Описані рівняння, за допомогою яких можливо оцінити кінематику течії матеріалу в процесі витягування з потоншенням. Виявлені кути матриці при яких зусилля досягає найменшого значення. Дослідження приведені в статті узгоджені з експериментальними даними інших авторів.

Витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці описується в джерелі [63]. Для витягування з потоншенням була

запропонована математична модель. В моделі враховувалося найбільша кількість факторів які впливали на витягування. Було встановлено, що крім звичайних сил які діють при витягуванні на процес ще впливають сили противонатягу, які діють в напівфабрикаті. Запропоновано метод для врахування сил противонатягу для корегування потужності. Для більшого розуміння процесу було виведено закономірності деформування в процесі витягування через дві послідовно розташовані матриці. Було розроблено узагальнене уявлення про технологічну деформованість матеріалу при витягуванні.

В статті [64] проведено дослідження розподілення ступеня деформації і механічних властивостей виробів отриманих за допомогою штампування з потоншенням. В роботі приведені особливості штампування з потоншенням та характеристики процесу витягування. Запропоновано моделі для розрахунку властивостей штампованих деталей з врахуванням нерівномірності деформації.

Вплив технологічних параметрів на неоднорідність розподілу деформації під час обтиску товстостінних трубних заготовок досліджувалося в роботі [65]. Дослідження проводилися із застосуванням МСЕ в програмному комплексі QFORM 2D-3D v.7. В статті приведені дослідження зразків з матеріалу сталі 10, в якості формуючого інструменту була матриця з кутом 10° , 20° , 30° . Був представлений розподіл та неоднорідність ступеня деформації. Виведено графіки залежності зусилля від кута в матриці та графік залежності неоднорідності деформації по товщині металу та від кута матриці.

В роботі [66] приведені результати теоретичних досліджень операцій обтиску. Моделювання процесу проводилось в QFORM 2D-3D v.7. В результаті були виявлені закономірності впливу технологічних параметрів і геометрії деформуючого інструменту на силові режими, напружений та деформовані стани, інтенсивності напружень та ступеня деформації в обтиснутих заготовках. Встановлено коефіцієнти, при яких зростають напруження. Залежність значень коефіцієнта приведено у вигляді графіка.

Визначення переходів, форми і розміри заготовок досліджувалися в статті [67]. В роботі використовували в якості заготовки напівфабрикат отриманий витягуванням, який не відпалювався. Встановлено, що найбільше зміцнення матеріалу та вище значення напруження текучості досягається при більшому ступеню витягування. Також було досліджено види втрати стійкості: кільцева і повздовжня та при, яких напруженнях вони виникають. Виведені залежності зміни граничного коефіцієнта в залежності від конусності та величини радіуса матриці. Результати представлені у вигляді графіків. Для визначення граничного значення коефіцієнта обтиску на основі досліджень складена номограма для нагартованих заготовок.

В роботі [68] викладені основи технології гарячого об'ємного штампування в умовах масового, багатосерійного та дрібносерійного виробництва. Розглянуто характеристики застосовуваних матеріалів та методи випробувань на штампованість, наведено аналіз НДС, що виникає в заготовці при виконанні операції гарячого об'ємного штампування. Вказані шляхи інтенсифікації виконання різних технологічних операцій.

В джерелі [69] приведено класифікацію та методику розрахунку операцій листового штампування, викладені основи проектування технологічних процесів. Надано рекомендації по вибору та оптимізації розкрою, застосуванню змашувальних матеріалів, визначенню деформаційних, силових та енергетичних характеристик. Представлені типові конструкції штампів та рекомендації по їх вибору.

Тенденції розвитку процесів листового штампування, включаючи питання механізації та автоматизації викладено в [70]. Показані особливості застосування штампування в дрібносерійному виробництві та використання гнучкого автоматизованого виробництва.

На основі запропонованої математичної моделі розглянуто НДС трубної заготовки при обтиску конічною матрицею [71]. Основні співвідношення, які отримані в ході теоретичного аналізу дозволяють оцінити напруження в

осередку деформації, визначити поле деформацій і розрахувати довжину вихідної трубної заготовки.

В роботі [72] з використанням МСЕ проведений аналіз комбінованого витягування листових заготовок із сталі 10 в одноконусній матриці. Для витягування з різними коефіцієнтами тертя були визначені залежності зусилля витягування та зусилля знімання від переміщення пуансона. Розрахунком визначені кінцеві форми і розміри виробів та їх НДС. Встановлені максимальні величини температур, що виникають у zdeформованому металі при холодній формозміні комбінованим витягуванням. Встановлено, що збільшення коефіцієнта тертя приводить до росту зусилля витягування, зусилля знімання виробу і підвищення температури. При цьому також збільшуються розтягувальні напруження в стінці циліндричної частини zdeформованої заготовки і в стінці на радіусі заокруглення пуансона.

В статті [73] відображено результати моделювання обтиску-роздачі трубчастої заготовки, що проводилось з метою розробки рекомендацій до використання програми DEFORM-2D. Автором описані стадії процесу обтиску-роздачі трубчастої заготовки. Надано рекомендації по вибору коефіцієнту тертя та кількості кінцевих елементів для даного процесу при розрахунках в програмі DEFORM-2D.

В роботі [74] розглянуте моделювання з використанням МСЕ обтиску трубчастих заготовок з різною висотою в матриці спеціального профілю. По розподілу інтенсивності деформацій оцінено пропрацювання структури металу пластичною деформацією. Також встановлені кінцеві форма і розміри виробу.

В роботі [75] за допомогою МСЕ проведені дослідження для визначення за кресленням деталі форми вихідної заготовки для обтиску і встановлення параметрів холодного обтиску такої заготовки з високовуглецевої сталі з отриманням порожнистого виробу зі змінною товщиною стінки заданих розмірів. Розрахунковим шляхом встановлені форма і розміри вихідної заготовки. Показано, що використання для холодного обтиску матриці

традиційної форми не дозволяє отримати виріб необхідної форми внаслідок великого зусилля деформування і потовщення стінок в донній частині zdeформованої заготовки. Застосування матриці спеціального профілю, у якій деформуюча поверхня утворена перетином торів з однаковим діаметром перерізу і послідовно розташованих з однаковим кроком, забезпечило зменшення впливу сил тертя, зниження зусилля обтиску і формоутворення порожнистого виробу із стінкою змінної товщини. Встановлено зусилля і роботу деформації, розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях. Визначено НДС металу, кінцева форма і розміри виробу. За розподілом інтенсивності деформацій проведено прогнозування механічних властивостей zdeформованого металу.

Результати теоретичного аналізу виготовлення глибокої гільзи з дном відображені в роботі [76]. Основною перевагою застосування розробленого способу виготовлення гільзи є зменшення потреби в енергії та силі порівняно з традиційними методами виробництва глибокої гільзи. Чисельні розрахунки проводилися в Кузні R 2D з використанням плоского стану деформації. Отримані результати дозволили визначити зусилля, необхідні для процесу та межу деформації, а також геометрію матриці та швидкість удару по технологічному інструменту.

В статті [77] розглянуто розрахунок операції високошвидкісного холодного видавлювання, побудований на використанні MCE і багатокрокового процесу за допомогою програми DEFORM 3D, що дозволяє отримати технологічну форму і відповідні параметри переміщення.

Розглянуто основні проблеми при формуванні деталі типу стакан за допомогою глибокого витягування з листового матеріалу [78].

Дослідження [79] було спрямоване на прогнозування максимальної змінної сили притискача заготовки протягом ходу пуансона, щоб запобігти утворенню тріщин при глибокому витягуванні деталі типу стакан. В даному дослідженні використовували сталевий лист марки SPCD товщиною 0,2 мм. А діаметр циліндричного виробу типу стакан становив 40 мм. Порівняно із

застосуванням постійної сили притискача заготовки, змінне зусилля притиску може бути досить ефективним для запобігання виникненню тріщин і підвищення здатності формування деталей за допомогою глибокого витягування.

Прогнозування мінімальної змінної сили тримача заготовки під час удару пуансона, щоб запобігти гофроутворення під час виготовлення продукту методом глибокого витягування деталі типу стакан, досліджено в [80]. Для формоутворення порожнистого виробу з діаметром 40 мм, використовувався сталевий лист марки SPCD товщиною 0,2 мм. Аналітичні результати розрахунку змінної сили тримача заготовки добре збігаються з результатами моделювання MCE.

В роботі [81] відображено математичний підхід розрахунку мінімального зусилля притискача заготовки для запобігання гофроутворення під час процесу глибокого витягування циліндричного виробу типу стакан. Для розрахунку було використано листову олов'яну сталь марки T4-C4 товщиною 0,2 мм. Авторами роботи запропоновано використовувати результати моделювання, як простий орієнтир, для запобігання гофроутворення під час процесу глибокого витягування.

Запропоновано новий механізм еліптичного глибокого витягування для виготовлення еліптичного порожнистого виробу з тонкої круглої пластини з латуні CuZn37 (0,8, 0,9 і 1 мм) товщиною та зазором (0,8, 0,9, 1 і 1,1) мм [82]. Розрахунки виконувались за допомогою MCE в програмному забезпеченні ANSYS15. Досліджували вплив зазору та товщин пластини на максимальне зусилля витягування, розподіл напружень та деформацій. В результаті проведених розрахунків було визначено, що при зазорі 0,9 мм між пуансоном та матрицею, та товщині заготовки 0,8 мм отримано найкращі результати для еліптичної глибокої витяжки без притискача заготовки.

В дослідженні [83] смуги листового металу лінійно протягуються через валик і зупиняються після проходження валика. Під час цієї операції формоутворення матеріал зазнає нелінійного деформування. При цьому

протягування зупиняли, поки лист повністю не пройшов валик, для того щоб дослідити локальне постійне зміцнення вздовж товщини листа. Вимірювання мікротвердості здійснювалось до і після проходження валика. Було використано сталь DC для глибокої витяжки.

На процес глибокого витягування впливає багато різних факторів, а саме: сила притискання заготовки, властивість листового матеріалу, товщина листа, швидкість витягування та багато інших [84]. Радіус робочого інструменту має найбільший вплив на здатність до глибокого витягування з нержавіючої сталі після якого слідує сила притискання заготовки та коефіцієнт тертя. Метою дослідження було визначення оптимальної форми заготовки для глибокого витягування деталей типу стакан довільної форми з рівномірним припуском на обріз на фланці.

В роботі [85] авторами були розроблені конструкції штампів для глибокого витягування з використання «комп'ютерної системи обчислень» мовою програмування VISUAL BASIC 6.0, що була пов'язана з пакетом для креслень AutoCAD для заощадження часу та полегшення проектування. Також для чисельного моделювання використовувався MCE програмного забезпечення ANSYS. Як висновок, MCE є більш точним, ніж експериментальний метод у прогнозуванні найкращої конструкції матриці.

Для проектування матриць для багатоетапних операцій глибокого витягування була розроблена експертна система з використанням VB.NET та AUTOCAD [86]. На основі даних співвідношення довжини до діаметра заготовки, система передбачає та оцінює кількість переходів, зазор та зусилля для формоутворення виробу. Перевагами такої системи є: покращення якості, продуктивності праці, зменшення часу на проектування робочого інструменту та зменшення непрямих витрат.

За допомогою моделювання MCE досліджено спосіб зворотного видавлювання коробчастих деталей [87]. Було враховано різні коефіцієнти тертя. За допомогою таких моделювань, автори стверджують, що можна

досить добре визначити необхідні параметри деформування: температура, швидкість деформування та геометричні параметри інструментів.

В статті [88] відображено порівняння процесу отримання вісесиметричних виробів як суцільних так і з порожниною за допомогою прямого та зворотного видавлювання відповідно. Порівняння виконувалось на основі моделювання МСЕ в програмному комплексі DEFORM. Матеріал, що використовувався при моделюванні – маловуглецева сталь марки AISI 1010. В результаті моделювання отримано, що зусилля видавлювання більше для отримання порожнистих виробів, а значення тертя в стінці матриці більше при видавлюванні суцільних виробів.

Застосування комбінованих процесів екструзії з декількома ступенями свободи течії металу вимагає попередньої оцінки формоутворення, що є вірним з урахуванням особливостей еволюції осередків деформації на різних стадіях деформування [89]. В якості альтернативи осьовому прямокутному кінематичному модулю нижнього місця деформації запропоновано використання осьового трикутного модуля, ефективність якого продемонстрована при моделюванні процесу радіально-поздовжнього видавлювання з роздачою. Рекомендується використати розроблену схему моделювання початкової стадії процесу для відносно високих заготовок при $H_0/h_1 > 4 \dots 6$.

У промисловому та військовому виробництві, процес видавлювання є основним при виготовленні порожнистих виробів [90]. Однією із багатьох задач при проектуванні оснащення це правильно визначити навантаження, що буде сприймати робочий інструмент. В цій роботі описано метод моделювання за допомогою штучного інтелекту задля визначення цих навантажень. Штучний інтелект навчається на основі відомих даних процесу видавлювання. Отримані результати були перевірені та порівняні з іншими методами моделювання.

За допомогою МСЕ проведено дослідження гарячого зворотного видавлювання вісесиметричних деталей з алюмінієвих сплавів [91]. Ціль цього

дослідження, було визначити вплив коефіцієнту тертя, геометрії матриці (кут та радіус профілю матриці) та необхідну початкову температуру заготовки на процес. В результаті отримано, що зі збільшенням радіусного профілю матриці, температура зменшується на 17%, а тепловий потік зменшується на 30%.

В роботі [92] авторами описано процес виникнення руйнування штампового оснащення, а саме інструменту у зв'язку з нераціональним вибором матеріалу робочого інструменту, конструкції штампового оснащення та режимів термічної обробки інструменту. Надано рекомендації для проектування штампового оснащення.

Описано процес з'єднання для різних геометричних форм заготовок за допомогою процесу пресування [93]. Такий процес задовольняє велику кількість вимог для з'єднань: стійкість до корозії, адаптованість до навантажень, електропровідність та багато інших. Авторами дослідження наведено параметри процесу пресування, що впливають на міцність з'єднання.

В статті [94], відображено спосіб витягування плоскої заготовки в порожнисту конусну вісесиметричну деталь. Процес поділявся на 2 етапи формування деталі. На першому етапі відбувався процес формування вільної частини заготовки до повного контакту з конічною поверхнею пуансона. На цьому етапі утворюється нерівномірність по товщині, яка на другому етапі може бути компенсована дією активних сил тертя. Процес формоутворення деталі при формуванні конічної частини супроводжується потоншенням товщини в порівнянні з товщиною вихідної заготовки. Величина потоншення зростає по мірі опускання пуансона, тобто кінцева деталь буде тоншою. Цей спосіб дозволяє зменшити величину різностінності кінцевої деталі.

Розроблено фізичну модель тертя на основі результатів випробувань кульки на диску [95]. Модель перевіряється за допомогою тестів екструзії подвійної дії. Було отримано хороші узгодження між прогнозами МСЕ та натурними експериментами щодо довжини екструдату та стаціонарного екструзійного навантаження, що вказує на те, що випробування кулькою на

диску є ефективним способом характеристики тертя для несучого каналу екструзійних матриць та характер тертя в каналі підшипника можна підсумувати як процес, що залежить від тиску: утворення ізольованих клейових з'єднань, зростання клейових з'єднань і злиття клейових з'єднань.

1.3 Теоретичні та експериментальні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини

Процес формування шпонки над високоміцного сталевго барабана із застосуванням опору нагріву бічної стінки стакану, сформованого холодним глибоким витягуванням та пресуванням [96]. Бічна стінка, що має рівномірну площу поперечного перерізу, нагрівалася електризацією в осьовому напрямку. Рівномірність температури було покращено вставкою мідної фольги між електродом і бічною стінкою та зменшення області контакту. Хоча високоміцний сталевий стакан було зламано внаслідок холодного шліцьового формування, барабан редуктора був успішно сформований за рахунок нагрівання.

Процес поліпшення формоутворення над високоміцних зубчастих барабанів за допомогою нагрівання бокової стінки стакану за допомогою рівномірного електричного нагрівання описано у роботі [97].

В роботі [98] автори представили набір пов'язаних в'язкопластичних складових рівнянь деформації та пошкодження при гарячому штампуванні та холодному гартуванні деталей панелі матеріалу AA6082. Набір рівнянь можна використовувати для прогнозування в'язкопластичного потоку та втрати пластичності AA6082 в умовах гарячого формування.

В статті [99] авторами було проаналізовано вплив коефіцієнта тертя на глибоке витягування алюмінієвого сплаву AA6111 при підвищених температурах на основі трьох умов із використанням аналізу кінцевих елементів та експериментального підходу. Результати показали, що наявність змащення суттєво впливає на режим руйнування сформованої деталі. Також було визначено оптимальну величину коефіцієнта тертя, що склала 0,15. Одночасно спостерігається висока збіжність між експериментальними та модельованими результатами.

В роботі [100] описано, що завдяки запобіганню перепаду температури фланця, яке в свою чергу було досягнуто за рахунок високошвидкісного

формування, за допомогою сервопреса та зменшенню контакту з матрицею та заготовкою із використанням розпірок товстіших за лист, отримано покращення штампування над високоміцної сталі.

В роботі [101] для дослідження впливу температури нагрівання на сформованість та зміцнення розчину, обробленого сплавом Al – Mg – Si, проводили одноосьове випробування на розтягування, глибоке витягування та випробування на випинання при температурах від 25 до 500°C. Автори встановили, що деформація руйнування та гранична висота опуклості значно зростали, поки температура не була підвищена до 400°C, граничний коефіцієнт витягування збільшувався, коли температура піднімалася до 200°C, а згодом знижувалась. Твердість змінювалась із підвищенням температури, дві пікові твердості з'явилися при 200 і 500°C. Максимальна твердість може становити 115 HV. Утворення грубих осадів призвело до зменшення твердості при температурах від 250 до 450°C. Покращена сформованість та міцність були отримані одночасно при 200 та 500°C, обидва з яких можна вибрати як відповідні температури формування для гарячого штампування.

Вплив структури зерна/текстури алюмінієвого листа AA3014-H19, що отримано внаслідок гарячого вальцювання під подальше витягування стакану відображено в роботі [102].

В дослідках [103] циліндричну частину виготовляли методом формування гарячого газу та вивчали сформованість листа Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo товщиною 2 мм при 985°C. Автори встановили, що деталі можуть бути сформовані з невеликим радіусом нижнього кута 4 мм із зовнішнім діаметром 60 мм і глибиною 20 мм. Максимальний коефіцієнт потоншення становив 56,3% біля малого кута.

В статті [104] авторами було надано огляд сучасного стану таких процесів гарячого штампування, включаючи загартованість, сформованість, підходи до нагрівання, охолодження та змащування, а також було описано механізм формування та загартування, аналіз процесів гарячого штампування та їх застосування.

В роботі [105] авторами описано гаряче штампування над високоміцних сталей та їх охолодження в матриці водою. При гарячому штампуванні вода утримується в нижній матриці для збільшення швидкості охолодження під час загартування матриці, на додачу, локальне стоншення навколо кута пуансона запобігало гартуванню водою та штампом, і, витягування збільшується.

Порівняння механічних властивостей радіальної зворотної екструзії та традиційної зворотної екструзії для виготовлення деталі у формі стакану показують в дослідженнях [106], що краще очищення зерна та більш рівномірний розподіл фази зміцнення можна досягти за допомогою радіальної зворотної екструзії ніж за допомогою традиційної зворотної екструзії.

В роботі [107], автори досліджували вплив розміру та форми стакану подібних поковок з фланцем на формувальну здатність алюмінієвого сплаву. Чисельне моделювання проводили для процесу формування екструзії для кожної деталі, використовуючи двовимірний метод пружно-пластичних скінченних елементів. Результати показали, що дефекти формування, такі як згортання або тріщини, з'являються в кожному кованому алюмінієвому сплаві. Результати представляють важливі посилення для аналізу технологій та проектування прес-форм.

Високоміцна пластина з алюмінієвого сплаву має низьке подовження при кімнатній температурі, для вирішення цієї проблеми в експериментальних дослідках, що описані в роботі [108], існуюче середовище замінили термостійкими твердими гранулами і застосували обладнання загального тиску. На основі випробування ефективності передачі тиску твердого грануляційного середовища доведено можливість використання припущення про розширену лінійну модель Друкера-Прагера для аналізу кінцевих елементів. Процес формування формованого середнього тиску гарячих гранул вирішує проблеми завантаження та ущільнення в існуючому процесі гнучкого формування прес-форми та забезпечує нову технологію термоформування легкосплавних пластин, таких як магнієвий сплав, алюмінієвий сплав та титановий сплав.

Авторами в роботі [109], були розроблені та протестовані нові установки глибокого витягування, а також запропонована послідовність процесів для підвищення глибини формування листа марки AA6082. Загальний коефіцієнт витягування склав 3,38. Міцність стінки стакану після формування характеризували за допомогою випробування мікротвердості Віккерса, приблизно на 30% поліпшено мікротвердість.

Аналіз впливу поступового глибокого витягування марганцево-борної сталі 22MnB5 з використанням коливального руху в напрямку одночасного охолодження відображено в [110]. Зупинки, що відбувалися при поетапному формуванні, забезпечили достатньо часу для пом'якшення та відновлення формувальних властивостей. Досліджено поведінку розм'якшення при певних температурах формування.

У дослідженні [111] екструзія стакану AA6063 назад була успішно проведена експериментально та теоретично з використанням тропічного кокосового масла та касторової олії в якості мастильних матеріалів. Експеримент також проводився без змащення. Потім був проведений чисельний аналіз із використанням програмного забезпечення DEFORM 3D для екструзії зворотного стакану. Було встановлено, що температура зростала зі збільшенням швидкості деформації. При вищій швидкості деформації також підвищується температура як штампувальної, так і нижньої матриці. Крива екструзії навантаження – хід результату моделювання відповідала експериментальним результатам.

Нова техніка формування стакану з верхньою та нижньою порожнистою головкою методом кування пластин відображено в [112]. У цьому процесі листовий метал обробляють у витягнутий стакан в процесі глибокого витягування, а потім деформують до цільової форми шляхом стискання краю стакану. Форма та розміри кінцевого виробу, добре збігаються з спроектованими розмірами деталі.

Для дослідження мікроструктури та механічних властивостей зразків, сформованих за різних параметрів формування, в дослідях [113] проводили

металографічний аналіз, випробування на твердість по Віккерсу та випробування на розтяг. Зразки без макро- та мікродефектів, сформовані успішно при 580°C під різними навантаженнями. Більш високі значення твердості за Віккерсом, виміряні в придонних областях зразка, сформованого при більших навантаженнях.

Авторами в дослідях [114] були досліджені процеси формування листового металу для виготовлення деталей типу стакан зі стінкою більшої товщини ніж товщина донної частини виробу. Для формування спеціальних заготовок було порівняно карбування та орбітальне формування та проаналізовано стратегію, засновану на процесі карбування з різними умовами змащення. Чисельні та експериментальні результати вказали на те, що деталі листа зі складними перерізами можуть бути сформовані за допомогою спеціальної заготовки методом U-CDZ.

В роботі [115] відображено процес теплового зворотного глибокого витягування для формування циліндричних стаканів з більшою глибиною витягування. Були проведені експериментальні та чисельні дослідження, щоб проаналізувати вплив температурного поля на межу глибини витягування та розподіл напружень під час теплового зворотного глибокого витягування алюмінієвої пластини 5A06. Результати показали, що руйнування відбулося при рівномірному температурному полі, оскільки радіальні напруження на внутрішньому куті більші, ніж на куті пуансона.

Авторами роботи [116], запропоновано метод формування під назвою гнучке формування порожнини порошку. Це технологія формування, яка використовує порошкоподібне середовище замість жорсткого пуансона або штампу для формування листових металів. Результати показали, що технологія гнучкого формування порошкової порожнини може поліпшити межу формування листового металу, також збільшився коефіцієнт витягування з 1,8 до 2,2.

За допомогою моделювання MCE Dynaform, авторами в [117] було відображено вплив температури на глибоке витягування стаканів. Було

виявлено, що існує хороша збіжність між експериментальними та прогнозованими значеннями.

В роботі [118], автори досліджували глибоке витягування сталевих листів при гарячому штампуванні. У цій роботі досліджували застосування опор для зазорів та формування дна заготовки. У цьому експерименті максимальне значення граничного коефіцієнта витягування становило 1,71.

В експериментальних дослідках [119], за допомогою MCE в програмному комплексі Abaqus / Explicit, було спроектовано процес витягування для сферичної деталі з центральним отвором. Також було проведено натурні експериментальні дослідки, що підтвердили прогнозовані результати.

Для прогнозування та поліпшення процесу формування глибокого витягування листів холоднокатаного комерційного класу (SPCC) із сталевих пластин були розглянуті три параметри, включаючи зусилля гасіння, радіус матриці та кут штампування. Експериментальний план згідно ортогонального масиву Тагучі був поєднаний із моделюванням MCE [120]. Оптимальний випадок, знайдений за допомогою моделювання, був остаточно підтверджений експериментом.

Для глибокого розуміння процесу гарячого витягування листа алюмінієвого сплаву з експериментальним підтвердженням проводили моделювання витягування циліндричного стакану при підвищених температурах [121]. Було досліджено важливість при витягуванні таких факторів: швидкість пробивання, зусилля тримача заготовки, коефіцієнт тертя та початкова температура формування.

Процес моделювання зворотного видавлювання описаний в статті [122]. Також приведений опис видавлювання деталей за допомогою рухомого контейнера. Зображено і надано опис НДС. Дослідження проводилися в програмному комплексі DEFORM. Використовували моделювання матеріалу БрБ2, для якої були задані механічні властивості отримані в результаті розтягу зразка. Було проведено декілька дослідів на зразках діаметром 60мм, з отриманою товщиною дна в кінці 2 та 5 мм. Показані графіки для зусилля

процесу в залежності від переміщення інструменту та порівняння отриманих результатів з теоретично розрахованими за методами Дмитрієва О.М. та Овчинникова О.Г.

В роботі [123] авторами приведена математична модель для витягування з потоншенням з товстостінного матеріалу з анізотропними властивостями. Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень деформованого і напруженого стану при витягуванні. Також досліджені і описані результати силових режимів і граничних можливостей витягування з потоншенням стінки в заготовках з анізотропних матеріалів. Теоретичні дослідження задовольняють отриманим результатам проведених експериментів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень силових режимів та граничних можливостей вісесиметричного витягування з потоншенням приведено в джерелі [124]. Розроблена математична модель операції витягування з потоншенням. Проведені експериментальні дослідження витягування з потоншенням для визначення силових режимів на сталі 11ЮА.

В роботі [125] приведені результати витягування з потоншенням для циліндричних деталей з анізотропного матеріалу латунь Л63. Дослідження процесу проводилося теоретично та експериментально. Автори встановили вплив технологічних параметрів на силові. Теоретичні та експериментальні дані узгоджені між собою по силовим режимам операції. В процесі дослідження було встановлено, що можливості формозміни обмежуються першим та третім критерієм руйнування.

Дослідження силових параметрів витягування з потоншенням приведено в джерелі [126]. Досліджено вплив силових режимів операції витягування з потоншенням на циліндричних заготовках. За отриманими результатами виведена залежність коефіцієнта потоншення та відношення діаметру до товщини, для якої відносна величина зменшується. Отримані результати підтверджені експериментально.

Вплив тертя на контактних поверхнях заготовки та пуансона, технологічних параметрів та анізотропних механічних параметрів на деформований та напружений стани, силові характеристики та граничні можливості при деформуванні матеріалу під час обтиску пустотілих заготовок показано в статті [127]. Деформування матеріалу описувалося математичною моделлю в якій враховувалися кут матриці та коефіцієнт обтиску. Напружений та деформований стани досліджувалися теоретично. Представлені графічно залежності описували залежності зусилля від кута матриці. Кут матриці змінювали від 12° до 18° , так як при цих кутах спостерігається найменше зусилля. Експериментально досліди проводили для заготовок з латуні Л63 та сталі 08кп. Видані рекомендації по проектуванню технологічних процесів.

Результати дослідження вісесиметричних заготовок розглянуті в роботі [128]. В статті описуються методики розрахунку та визначення товщини стінки отриманою обтиском. Теоретичні дослідження та моделювання процесу проводили в програмі DEFORM 2D. В якості перевірки теоретичних даних на основі отриманих результатів було виготовлено експериментальне оснащення для штампування деталей типу «форсунка».

Дослідження крайового розширення при обтиску пустотілої заготовки проведено в роботі [129]. Був розглянутий напружений стан крайової ділянки заготовки та визначений закон розподілення напружень в осередку деформації. Отримали співвідношення для опису та розрахунку вільного згину і розпрямлення під час виходу матеріалу з осередку деформації. Розроблена методика розрахунку необхідного радіусу між ділянками переходу від конічної до циліндричної частини для забезпечення стабільного протікання процесу. Для перевірки отриманих залежностей виконано відповідний експеримент, результати експерименту порівняні з розрахунковими даними.

В статті [130] представлено розрахунок сили обтиску трубчастих вісесиметричних заготовок, що здійснюється з використанням матриці, робоча частина якої має кільцеві канавки. Також відображено результати експериментальних досліджень.

Експериментально та моделюванням за допомогою MCE в роботі [131] досліджено холодну екструзію високоякісного алюмінію AA1100. Було досліджено вплив кута нахилу матриці, коефіцієнта зменшення та посадки матриці на силу екструзії під час процесу екструзії. Для аналізу була побудована вісесиметрична 2D геометрична модель інструменту та заготовки. Дані, отримані з моделі, включали контактний тиск штампа-заготовки, ефективне напруження, деформацію та швидкість деформації матеріалу. Наведено та обговорено співвідношення між експериментальними, розрахунковими та кінцевими даними, отриманими в дослідженні.

В статті [132] приведені результати по дослідженню процесу холодного кування для виробництва порожнистих куль із алюмінієвого сплаву. Попередні випробування показали, що в традиційному штампуванні, використання заготовки з такою малою відносною товщиною не тільки обмежує діапазон застосовних геометричних параметрів, але також викликає вигин. Авторами було запропоновано вирішити цю проблему за допомогою додаткового інструменту, який впливає на внутрішню поверхню заготовки, що дозволяє контролювати умови процесу кування.

Було розглянуто проблему формування вісесиметричного виробу зі сплаву Hastelloy C-276 в роботі [133]. Випробування були спрямовані на визначення можливостей та умов пластичного деформування матеріалу. Ця стаття підсумовує приклад результатів як чисельного, так і експериментального формування виробів із важкодеформівного матеріалу.

Робота, описана в [134], є розробкою моделі вигину, заснованої на класичному енергетичному методі матеріалу фланцевої зони з використанням припущення одновимірної геометрії балки для прогнозування гофроутворення в зоні фланця в гарячих алюмінієвих сплавах отриманих за допомогою глибокого витягування з макротекстурованими поверхнями заготовок. Вплив співвідношення текстури та коефіцієнта витягування на гофроутворення виявився більш значним, ніж вплив температури та швидкості деформації.

У [135] досліджувалось здатність формування листового металевого матеріалу DC01 в циліндричний виріб типу стакан за допомогою способу глибокого витягування. Емпірично досліджено вплив тиску в камері матриці, радіуса матриці та товщини листа на формоздатність матеріалу листового металу DC01 за допомогою гідромеханічного та традиційного методів глибокого витягування. За допомогою гідромеханічного глибокого витягування, коефіцієнт витягування збільшився з 2,16 до 2,33 виключно за рахунок збільшення тиску в камері матриці. Результати експерименту виявили відповідні параметри формування за допомогою гідромеханічного та традиційного методів глибокого витягування для зразків матеріалу DC01, що має циліндричну геометрію.

Одним із підходів до зменшення тертя та зношування при сухому формуванні є нанесення покриттів на основі вуглецю з боку інструменту. У роботі [136] покриття з аморфного гідрогенізованого вуглецю (a-C:H) було отримано методом хімічного осадження з парової фази з посиленням плазмою (PECVD). Зразки покриття були нанесені в різних кількостях і співвідношеннях газових атмосфер ацетилену (C_2H_2) і аргону (Ar). Один з варіантів покриття a-C:H із перспективними трибологічними характеристиками щодо алюмінієвих сплавів був зразково протестований у тесті на витягування плоскої стрічки, який моделює трибологічні умови в зоні фланця процесу глибокого витягування.

В статті [137] автори досліджували величину мінімального зазору між притискачем та заготовкою для запобігання такого дефекту як гофроутворення та тріщин під час формоутворення прямокутного порожнистого виробу типу коробка з матеріалу T4 Tin Plate SA. Застосовано аналітичний розрахунок, розрахунок за допомогою MCE та експериментальний дослід. В результаті дослідження рекомендований зазор між притискачем та заготовкою від 120% до 130% від товщини вихідного матеріалу (приблизно $0,24 \div 0,26$ мм).

Щоб виготовляти металеві вироби точного розміру та форми методом глибокого витягування, потрібен точний контроль ряду змінних[138]. Моделюванням в Dynaform LS-DYNA за допомогою MCE та експериментально з використанням листової нержавіючої сталі SUS304, автори досліджували поведінку матеріалу під час глибокого витягування, характер зміни товщини матеріалу, розподіл напружень та деформацій.

У роботі [139] авторами, за допомогою MCE в програмному комплексі DEFORM, було досліджено формування колісних дисків глибоким витягуванням. Було змодельовано та проаналізовано розподіл поля напруги та деформації під час процесу формування круглої заготовки. Описані оптимальні параметри швидкості, радіуса робочого інструмента та коефіцієнта тертя. Також були проведені натурні експерименти, результати яких добре узгоджувалися з результатами моделювання.

Вплив величини зазору між робочими інструментами для формування порожнистого виробу типу стакан досліджено та описано у роботі [140]. Було проведено натурні експерименти та моделювання MCE. В результаті отримано, що найоптимальніша величина зазору складає 1 – 1,5 від товщини листа, а при величині зазору 0,75 мм утворюються гофри та збільшується сила витягування.

Метою проведених дослідів в роботі [141] було проведення чисельних розрахунків та натурального експерименту для аналізу формоутворення порожнистого виробу типу стакан матеріал якого був сплав AA5754 – при кімнатній температурі. Моделювання виконувалось за допомогою MCE в програмному комплексі ABAQUS із суцільними та твердооболонковими елементами. Як результат отримано, що суцільний оболонковий елемент є більш економічно ефективним, ніж суцільний представляючи глобальні точні прогнози, за винятком зон розрідження. І критерія Фон Мізеса, і критерія текучості Hill48 досить точно передбачають розподіл деформацій у кінцевому стакані. Все ще потрібні покращені знання щодо напруженого стану, оскільки

критерій Hill48 показав труднощі з правильним прогнозуванням відскоку, незалежно від того, який тип кінцевого елемента був прийнятий.

У роботі [142] описано процес формоутворення порожнистого виробу за допомогою глибокого витягування та вплив притискача для запобігання гофроутворення. Матеріал що використовувався у дослідженні алюміній марки 3105. Було проведено моделювання МСЕ в програмному середовищі ABAQUS та натурні експерименти. В результаті отримано гарну збіжність між моделюванням та натурними експериментами, а також авторами вказано, що моделюванням МСЕ можна добре передбачити місце руйнування.

Процес зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату відображено в статті [143]. Зворотне видавлювання відбувається за рахунок пуансону, що формує порожнину та обертової матриці. Було проведено моделювання МСЕ та натурні експерименти. Матеріал, що використовувався магнієвий сплав марки AZ80. У порівнянні з класичним варіантом зворотного видавлювання, за рахунок обертання матриці, зменшено зусилля деформації на 20%, а ефективність деформації зросла в 3 рази.

Представлено дві теоретично розрахункові схеми процесу радіально зворотного видавлювання порожнистих напівфабрикатів з фланцем з урахуванням течії металу та проведено натурні експерименти [144]. Було порівняно залежність відношення швидкості течії металу у зворотному напрямку деформації. В результаті дослідження було визначено межі використання розрахункових схем та умови вибору схеми, що полегшує прогнозування геометричної форми виробу та визначення силових режимів формоутворення.

За допомогою МСЕ та натурних експериментів було досліджено новий метод зворотного видавлювання, суть якого полягає у пуансоні з рухомою оправкою [145]. Результати дослідження були порівняні з традиційним методом зворотного видавлювання та показали, що величина пластичної деформації новим методом більша, що покращує механічні властивості виробу.

У роботі [146], досліджено параметри, що впливають на видавлювання композитних матеріалів, а саме міднево-алюмінієвих стержнів. Було проведено моделювання МСЕ в програмному комплексі DEFORM 2D, з допомогою чого, було враховано та відкореговано деякі параметри для проведення натурального експерименту.

Процес комбінованого видавлювання, що поєднує в собі пряме та зворотне видавлювання з урахуванням впливу швидкості деформації (2 мм/с та 20 мм/с), впливу температури попередньо розігрітої заготовки (180°C та 200°C), а також вплив коефіцієнту тертя, що забезпечується змащенням розглянуто у статті [147]. Проведено моделювання МСЕ процесу комбінованого видавлювання та виконано натурний експеримент. Результати натурального експерименту мають гарну збіжність з моделюванням МСЕ.

Процес обертового зворотного видавлювання описано у роботі [148]. Суть методу полягає в тому, що при зворотному видавлюванні пуансон обертається із заданою частотою, що і вивчалось в дослідженні. В результаті отримано, що зі збільшенням частоти обертання пуансона, зменшується величина зерна в металі, а структура металу покращується та стає однорідною.

В статті [149], описано процес зворотного видавлювання порожнистого виробу з фланцем. Матеріал заготовки сплав Mg-Gd-Y. Було проведено моделювання МСЕ та проведено натурний експеримент. В результаті моделювання МСЕ отримано, що деформація фланцевих деталей сягає 30%, а результати натурних експериментів показали, що в таких деталей покращується якість поверхні, механічні властивості та вирівнюється мікроструктура. Авторами вказано, що оптимальна температура для даного процесу складає 430°C та швидкість деформування 1 мм/с.

За допомогою моделювання МСЕ в програмному комплексі DEFORM та проведенні натурних експериментів, досліджено метод зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату. Матеріал заготовки – алюмінієвий сплав [150]. Сутність даного дослідження полягала у тому, що заготовку циліндричної форми розміщують у матриці та деформують

пуансоном що обертається, завдяки такому обертанню під час деформування, заготовка нагрівається та в зоні деформування процес змінюється з холодного видавлювання в гаряче. Завдяки цьому, автори стверджують, що отриманий напівфабрикат має більшу міцність та меншу пластичність.

Процес обертового видавлювання порожнистих вісесиметричних деталей з фланцем висвітлено в роботі [151]. Відображено результати теоретичних розрахунків, що отримані на основі МСЕ, а також результати експериментальних даних. Також проведено порівняння по зусиллю деформації та по швидкості течії металу.

За допомогою МСЕ, змодельовано процес гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату з титанового сплаву Ti-6Al-4V [152]. Також проведені натурні експерименти. Результати натурального експерименту показали, що процес гарячого видавлювання титанового сплаву тісно пов'язаний з фазовими перетвореннями, а також впливає на ріст зерен. Результати натурального експерименту досить добре збігаються з моделюванням за допомогою МСЕ.

За допомогою МСЕ та натурального експерименту, досліджено процес отримання складної за формою деталі методом видавлювання [153]. Наявність на деталі ребер жорсткості ускладнює процес її отримання, оскільки складно спрогнозувати як буде текти метал. Як результат отримано, що розподіл напружень та деформацій в повздовжньому перерізі не однорідний, існують концентрації напружень у площині зсуву, в зоні кута ребра жорсткості покращена структура матеріалу та краща однорідність деформацій.

В роботі [154], досліджено виготовлення порожнистого вісесиметричного виробу з фланцем за допомогою радіально-зворотного видавлювання. Цей процес є складним, оскільки має декілька ступенів свободи течії металу та необхідно враховувати проміжну жорстку зону. Проведено аналітичний розрахунок та експериментальне дослідження. За результатом дослідження, складено рекомендації по застосуванню процесу радіально-зворотного видавлювання з фланцем.

За допомогою аналітичного методу розрахунку задачі зі зворотним видавлюванням було перевірено вплив заокруглення плоского пуансона [155]. Аналітичним методом визначено зусилля тертя між пуансоном та заготовкою, передбачено кінцеву форму та розміри кінцевого виробу та визначено природу течії металу. Аналітичні розрахунки досить добре співпадають з проведеними натурними експериментами.

В дослідженні [156] розглянуто процес зворотного видавлювання обміднених алюмінієвих стержнів. Аналіз цього процесу було проведено за допомогою чисельних розрахунків та натурних експериментів. Моделювання МСЕ було здійснено в програмному комплексі DEFORM 2D, попередньо випробувавши на гаряче стиснення алюмінієвого сплаву EN AW-1080A та мідного сплаву CW004A, отримані дані завантажено в програму DEFORM для задання матеріалу. В результаті моделювання отримано, що швидкість потоку алюмінієвого сердечника вища ніж в мідній втулці, це в свою чергу призвело до високих значень розтягувальних сил, як наслідок відбулось руйнування зразка. Проведено порівняння результатів моделювання та натурального експерименту, на основі отриманих даних було визначено необхідну технологію для зворотного видавлювання.

Запропоновано та досліджено нову схему процесу зворотного видавлювання порожнистого вісесиметричного виробу [157]. Авторами вказано, що при такій схемі зворотного видавлювання, забезпечуються великі значення пластичної деформації і покращується зернистість матеріалу. Новизна схеми полягає в тому, що між матрицею та пуансоном встановлюється нерухома втулка, яка в свою чергу має отвір в який встановлюється вихідна заготовка. Пуансон тисне на заготовку деформуючи останню в отворі втулки, завдяки чому матеріал тече між матрицею та втулкою до набуття необхідної геометричної форми. Було проведено моделювання з використанням МСЕ, а також натурні експерименти на заготовках з алюмінію. Автори цього дослідження стверджують, що при такій схемі зворотного

видавлювання, покращується структура матеріалу та збільшується ступінь деформації, що в свою чергу зменшує дефекти в металі.

За допомогою теоретичних розрахунків МСЕ в програмному середовищі Forge та проведені натурних експериментів за допомогою торсійного пластоміра STD 810, в роботі [158] було досліджено радіально зворотне видавлювання роторною головкою. В результаті авторами отримано, що застосування вказаного способу викликає напруження зсуву в заготовці, що в свою чергу впливає на механічні властивості матеріалу.

В роботі [159], було досліджено покриття та-С за допомогою моделювання МСЕ та проведенні натурних експериментів. В результаті, було отримано, що завдяки покриттю та-С, зменшуються сили тертя між робочим інструментом та заготовкою, покращується якість контактуючих поверхонь і головне не спостерігається явище адгезії.

1.4 Експериментальні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини

В експериментальних дослідах [160], при теплому зворотному витягуванні алюмінієвого сплаву 5A06 при перепаді температур, було досліджено вплив значення температури та градієнта на поведінку деформації. Експериментальні результати показують, що коефіцієнт розрідження на куті пуансона збільшується з 1,4 до 4,6% із зменшенням градієнта температури від 185 до 25°C, що означає, що розрідження можна зменшити із збільшенням градієнта температури.

Міцність листів, яка порівняно вище, ніж у звичайних листів вуглецевої сталі, призводить до їх низької сформованості. В експериментах, що описані в джерелі [161], граничний коефіцієнт витягування та поведінка формоутворення листового металу, оцінювали випробуванням із використанням циліндричного стакану з отвором. Результати показали, що граничні значення висоти стакану мають відношення до граничних значень коефіцієнта витягування досліджуваних матеріалів.

Формоздатність гофрованого стакану досліджували в роботі [162]. Для формування стакану, що має гофровану форму, використовували унікальну матрицю. Плечі плашки були жолобчастими, а сталеві кульки розташовані без зазорів у канавці. Кулі вільно оберталися під час формування. В експерименті заготовками були комерційно низьковуглецева сталь SPCC та нержавіюча сталь SUS304.

В роботі [163], відображено формування гарячим газом з інтегрованою термічною обробкою для дослідження мікроструктури та зміцнення поведінки листа сплаву Al-Cu-Li. Зміцнювальна поведінка була відображена при вимірюванні твердості за Віккерсом. Підвищена сформованість і твердість були отримані під час швидкого формування гарячого газу шляхом поєднання з термічною обробкою.

В дослідженні [164] автори визначили вплив температури нагрівання на витягування круглого металевго стакану. Витягування вимірювали на основі

сили штампування, необхідної для деформації заготовок листового металу. Результати, отримані від ANOVA, вказали на те, що матеріал заготовки має значний вплив на процес глибокого витягування, за яким слідують розмір заготовки, температура нагрівання та техніка нагрівання.

Було досліджено та відображено в [165], як впливає метод отримання листів під подальше глибоке витягування. Експериментальні дані показують, що листи які прокатувались зі змінним кутом 90° , мають покращену пластичність на 28% ніж ті, що прокатувались в одному напрямку.

В роботі [166], автори відобразили спосіб обробки для глибокого витягування для виготовлення довгих циліндричних стаканів із круглих заготовок товщиною 12 мм з алюмінієвої (Al) сталі AISI 1010 В результаті трьох переходів було отримано довгий циліндричний стакан.

В роботі [167], авторами було досліджено гідроформування листа з контролем температури, а саме гідромеханічне глибоке витягування циліндричного стакану при підвищеній температурі. Досліджено еволюцію мікроструктури стакану, сформованих за допомогою теплого HMD під впливом температури. Випробовували твердість гідроформованого стакану, і в результаті зниження твердості не виявлено.

Вплив умов витягування з потоншенням на величину різностінності показано авторами роботи [168]. Експериментально отримані результати показують закономірність зміни товщини стінки в залежності від різних степенів деформації. Виведені криві зміцнення матеріалу на кожному з етапів деформування. Доведено, що при менших деформаціях різностінність менша.

В роботі [169] описано спосіб виготовлення деталей типу «Кришка». З нагрітої сталеві заготовки об'ємним штампуванням, видавлюють порожнистий виріб в формі стакану. Нагрів вихідної заготовки здійснюють в діапазоні температур від критичної температури перетворення в аустеніт A_{c3} до максимальної температури кінця деформування сталі при гарячому штампуванні. Видавлювання здійснюється в умовах всестороннього нерівномірного стиску зі ступенем деформації більше 50%. Потім виконують

зміцнювальну термообробку. В результаті забезпечується підвищення експлуатаційних характеристик виробу.

Спосіб виготовлення порожнистих виробів за допомогою ротаційного видавлювання описано в [170]. Ділянки, на які припадає подальше зварювання виконують плоскими. Потім zdeформували заготовку з потоншенням стінки. Якість деталі підвищується завдяки виключенню попереднього формоутворення оболонки та шпангоутів.

Спосіб виготовлення гільзи патрону стрілецької зброї відображено в [171]. Спосіб включає в себе: вирубування, виготовлення порожнистого напівфабрикату, витягування порожнистого напівфабрикату з потоншенням стінки, хіміко-термічну обробку та комплекс інших формозмінювальних операцій по формуванню капсульного гнізда. Зовнішню поверхню напівфабрикату типу стакан виконують конічною з конусним кутом $8 - 60^\circ$. Отриманий напівфабрикат піддають подальшому травленню та відпалу після чого здійснюють подальші операції витягування. Такий спосіб вирішує завдання поліпшення якості гільзи, покращує механічні характеристики виробу та зменшує відходи на підрізання гільзи.

Дослідження впливу тертя, яке виникає на матриці в процесі витягування з потоншенням, досліджувалося в роботі [172]. Використовувалися матриці з покриттям з різних матеріалів. Встановлено ефект впливу мастила та швидкості витягування на процес. Встановлено, що матриці з твердим покриттям ефективніші при витягуванні стаканів з нержавіючої сталі.

Граничні значення холодного витягування з потоншенням в кількох матрицях приведено в статті [173]. Було досліджено виникаючі напруження при витягуванні та кількість необхідних операцій відпалювання між процесами витягування. Також було показано, в яких випадках з'являється тріщина на заготовках. Було встановлено, що стабільність процесу витягування значною мірою залежить від розподілу напружень.

Для матриць кутом 30° , 45° , 60° проводилися дослідження в статті [174] по виявленню відповідних параметрів при яких зберігається стійкість деформованої стінки заготовки. Коефіцієнти обтиску для заготовок становили 1.25, 1.40, та 1.55. Зафіксована зміна напівфабрикатів після процесу обтиску. Для обтиску застосовувалася схема без оправки. Після дослідження результати показали збільшення товщини стінки, особливо інтенсивно товщина збільшувалася в тонкостінних та високих заготовках. Ці зміни показані у вигляді діаграм. Зміни ділянок які не деформувалися під час обтиску не зафіксовані. Дані результати будуть корисні при розрахунку процесів обтиску в технологічних процесах.

Дослідження процесу обтиску заготовок представлено в джерелі [175]. Результати отримані під час експериментальних досліджень формозміни і силових режимів обтиску з оправкою в середині пустотілого зразка та без оправки. Використовувалася матриця для досліджень з кутом 20° . Отримані результати рекомендовані для використання при проектування процесів обтиску високих та низьких заготовок.

Проведені в статті [176] експериментальні дослідження по виявленню впливу характеристик інструмента і розміру заготовок на стійкість циліндричної ділянки, обтиснутих у конічних матрицях заготовок. Представлені у графіках результати дозволяють передбачити бездефектне штампування при проектуванні процесів та штампувального обладнання для виробів зі змінним профілем.

В роботі [177] експериментально досліджено глибоке витягування металевих листів з полімерним покриттям для зменшення тертя та підвищення ефективності виробництва без використання мастила. В експериментах параметри коефіцієнта глибокого витягування, тиску тримача заготовки та швидкості пуансона змінювали з різними інтервалами, а отримані значення оцінювали за допомогою графіків. Результати цього дослідження показали, що полімерне покриття покращило якість поверхні досліджуваних зразків, як наслідок, середнє зусилля формування зменшилося, отримані коефіцієнти

глибокого витягування зросли, а такі дефекти, як розриви та гофри були зменшені.

Поведінку металево-композитних сендвіч-пластин під час глибокого витягування досліджували в [178]. Використовувалось два типи алюмінію 1050 і 6061. Встановлено, що якісні напівфабрикати без розривів та гофроутворення можуть бути отримані, коли тиск на притискач заготовки є досить високим.

Часто при спробах зменшення кількості операцій штампування, для зменшення матеріальних витрат при виготовленні різних деталей виникає брак у вигляді тріщин, розривів та потоншень матеріалу. У роботі [179] автори відобразили результати технічних рішень під час оптимізації процесу отримання внутрішніх панелей кузова Transit. Виробничий брак, час простою лінії штампування скоротилися більш ніж на 90%.

Переважна кількість процесів ОМТ для зменшення тертя та зношування робочого інструмента використовуються мастила на основі мінеральних масл. Авторами роботи [180], була продемонстрована нова екологічна система мастила для процесів глибокого витягування. Через просвердлені лазером мікроотвори в робочому інструменті, локально вприскується суміш рідкого вуглекислого газу та газоподібного азоту, що використовуються в якості змащення. Така система забезпечує значно розширений робочий діапазон і на 15% більшу глибину витягування порівняно зі звичайним мастилом.

Здатність до глибокого витягування для формування циліндричного напівфабрикату з аустенітної нержавіючої сталі (АСС) 304 товщиною 50 мкм досліджено в роботі [181]. Для цього було проведено попередній відпал заготовок в діапазонах 700-1100°C протягом одної години для отримання різної мікроструктури. Експериментальні результати показали, що при температурах відпалу 900-950°C, даний матеріал має найкращу здатність до глибокого витягування.

Під час ОМТ з часом, робочий інструмент зношується, внаслідок чого може бути велика кількість бракованих деталей. Авторами роботи [182]

запропоновано новий метод контролю якості для процесів глибокого витягування за допомогою швидкості підрахунку сигналів акустичної емісії. Для дослідження використовувався пластичний матеріал холоднокатаної сталевий пластини, в якому відносно важко знайти дефекти під час процесу глибокого витягування. Максимальний рівень розпізнавання шляхом аналізу підрахунків акустичної емісії при пластичній деформації сягнув 97,3%.

Метою дослідження [183] було збільшити коефіцієнт глибокого витягування та зменшити зусилля витягування за допомогою повороту матриці та притискача, а також вплив змащення на даний процес. Використовувалось два різні типи мастила мінеральне та тверде, а також два різні кути між матрицею та притискачем ($\alpha = 0^\circ$; $\alpha = 15^\circ$). В результаті отримано підвищення коефіцієнта витягування з 1,75 до 2,175 без руйнувань.

В роботі [184] відображено спосіб витягування циліндричних деталей без пресування фланця заготовки, що знижує собівартість кінцевої продукції за рахунок використання штампів без посадкового кільця та пресів простої дії. Було досліджено мідні, алюмінієві та сталеві заготовки. Найкращим цей метод був для більш пластичних матеріалів. Авторами вказано, що цей метод не підходить для матеріалів з товщиною меншою ніж 0,25 мм.

Авторами роботи [185], було проведено експериментальні дослідження впливу розміру зерна для процесу зворотного видавлювання сплаву Cu 110. Проаналізовано об'ємні напруження потоку матеріалу під час зворотного видавлювання, що дає можливість визначати відхилення поведінки в пластичності деформування. При проведенні експериментального дослідження спостерігалася аномалія масштабування, це вказує на залежність механічної реакції.

Авторами роботи [186], описано процес комбінованого деформування, при якому метал тече в прямому та в зворотному напрямках відносно руху пуансона. Проведено натурний експеримент процесу комбінованого видавлювання кріпильних виробів типу болт. Визначено значення напружень, деформацій та коефіцієнтів видавлювання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Висновки

1 Проаналізовано 30 джерел посилань загальних способів формоутворення порожнистих виробів.

2 Проаналізовано 65 джерел посилань теоретичних методів дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини.

3 Проаналізовано 64 джерел посилань, які включають одночасно теоретичні та експериментальні методи дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини.

4 Проаналізовано 27 джерел посилань експериментальних методів дослідження по штампуванню порожнистих виробів зі змінним профілем стінки та дном великої товщини.

За результатами проведеного аналізу літературних джерел в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

1 Провести чисельні розрахунки за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) процесу гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату із заготовок круглої та квадратної форми. Проаналізувати зусилля процесу, напружено-деформований стан та розподіл температури в кінці процесу.

2 Провести чисельні розрахунки за допомогою МСЕ процесу гарячого та напівгарячого витягування з потоншенням напівфабрикату який отримано після операції гарячого зворотного видавлювання з роздачою. Проаналізувати зусилля процесу, напружено-деформований стан, розподіл температури в кінці процесу та критерій руйнування.

3 Провести чисельні розрахунки за допомогою МСЕ процесу холодного витягування з потоншенням виробу який отримано після операції гарячого та напівгарячого витягування з потоншенням. Проаналізувати зусилля процесу, напружено-деформований стан, розподіл температури в кінці процесу та критерій руйнування.

4 Провести чисельні розрахунки за допомогою МСЕ процесу холодного обтиску верхнього торцю виробу який отримано після операції холодного витягування з потоншенням. Проаналізувати зусилля процесу, напружено-деформований стан та критерій руйнування.

5 Провести чисельні розрахунки за допомогою МСЕ процесу холодного осадження донної частини виробу для отримання фланця. Проаналізувати зусилля процесу, напружено-деформований стан та критерій руйнування.

6 Спроекувати штампове оснащення для поопераційного отримання виробу.

7 Провести натурні експерименти поопераційного отримання виробу. Порівняти отримані дані чисельних розрахунків за допомогою МСЕ з натурними експериментами.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З

РОЗДАЧОЮ ПОРОЖНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

2.1 Гаряче зворотне видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату із заготовки круглої форми

2.1.1 Розрахункова схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки круглої форми

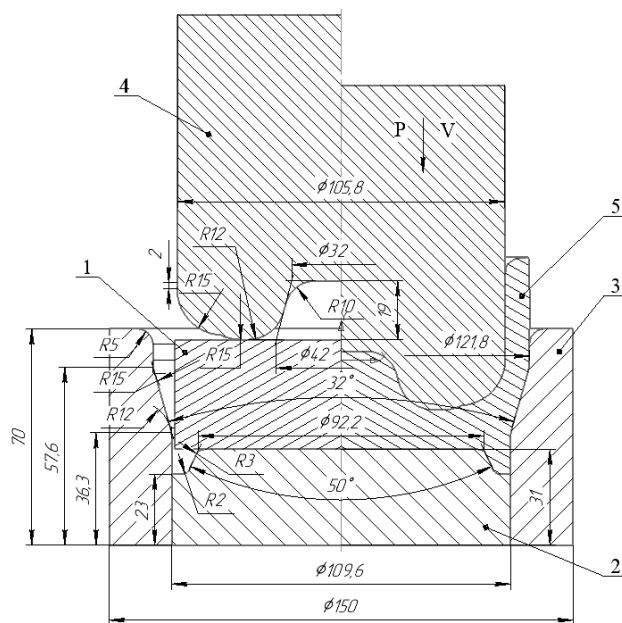


Рисунок 2.1. Схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою напівфабрикату здеформованого із заготовки круглої форми: 1 – заготовка; 2 – виштовхувач; 3 – матриця; 4 – пуансон; 5 – напівфабрикат

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого зворотного видавлювання з роздачою, яку відображено на рис. 2.1. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою, а праворуч - в кінці видавлювання. Заготовка 1 встановлюється на виштовхувач 2 з центруванням в циліндричній частині матриці 3. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні пуансона 4 на задану відстань зі

швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 5. Після вилучення пуансона 4 із напівфабрикату 5 виконується його виштовхування із матриці 3 за допомогою виштовхувача 2.

Для процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою було використано із сталі 20 циліндричну заготовку з $\varnothing 107,6$ мм та висотою 35,5 мм.

Для отримання вихідної заготовки обрано гарячекатаний пруткок згідно ГОСТ 1050-88 з $\varnothing 110$ мм згідно ДСТУ 2590-88. Характеристики матеріалу марки сталь 25 відображені в додатку А на рис. 1.

Для проведення розрахунків МСЕ використовувалась програма DEFORM. Серед аналогів в програмі DEFORM матеріал марки сталь 20 відсутній то ж для його задання було використано найближчий аналог по кривим зміцнення— AISI-1015, криві зміцнення показано в додатку А на рис. 2.

Розрахунок процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату із заготовки круглого перерізу проводився в програмі DEFORM 3D. Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: швидкість переміщення пуансона $V = 50$ мм/с, фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,3$, початкова температура заготовки $T = 1000^\circ\text{C}$.

2.1.2 Силіві режими процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу

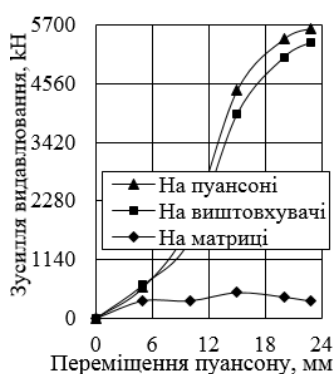


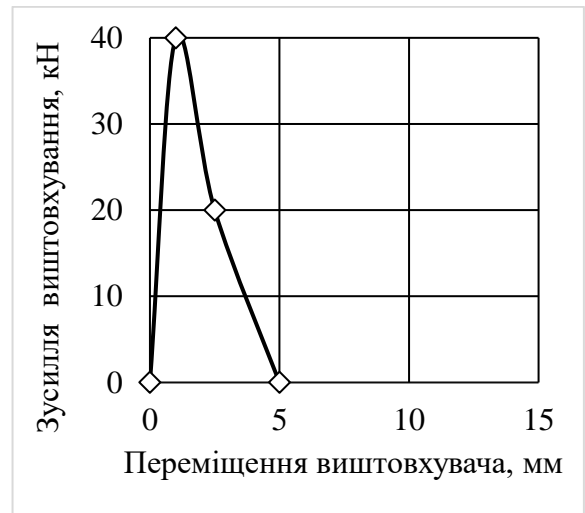
Рисунок 2.2. Залежності зусиль видавлювання напівфабрикату із заготовки круглої форми на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансона

Залежність зусиль гарячого зворотного видавлювання з роздачою напівфабрикату із заготовки круглого перерізу відображено на рис. 2.2. Значення зусиль на пуансоні та виштовхувачі постійно зростають та досягають відповідно максимальних значень 5640 кН і 5360 кН в кінці процесу видавлювання. На матриці зусилля змінюється незначно і досягає найбільшої величини 500 кН.

На рис. 2.3 відображено залежність зусилля вилучення пуансона та зусилля виштовхування напівфабрикату від переміщення робочого інструменту. Зусилля вилучення досягає максимального значення на початку зворотного переміщення пуансона та складає 8 кН. Величина зусилля виштовхування напівфабрикату з робочого отвору матриці сягає максимальних значень 40 кН при переміщенні виштовхувача на 2 мм.



а



б

Рисунок 2.3. Залежність зусилля вилучення пуансона (рис. а) та зусилля виштовхування (рис. б) напівфабрикату від переміщення виштовхувача

2.1.3 Температурний розподіл напівфабрикату zdeформованого із заготовки круглого перерізу

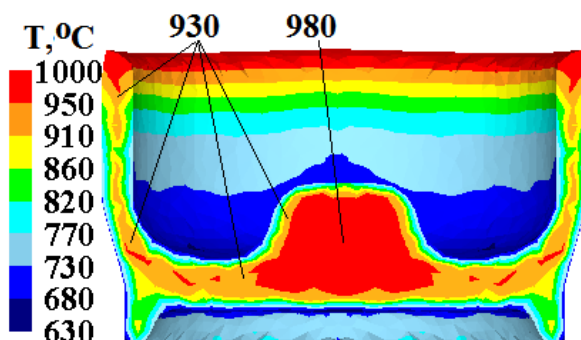


Рисунок 2.4. Розподіл температури в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки круглого перерізу

На рис. 2.4 відображено розподіл температури в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки круглого перерізу. Температура напівфабрикату у донній частині та у стінці знижується до $T = 930^{\circ}\text{C}$. Таким чином відкривається можливість виконання подальшого деформування стінки

напівфабрикату витягуванням з потоншенням в умовах гарячої деформації без проміжного підігріву.

2.1.4 Напружений стан та питомі зусилля напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу

На рис. 2.5 відображено розподіл напружень у напівфабрикаті здеформованого із заготовки круглого перерізу.

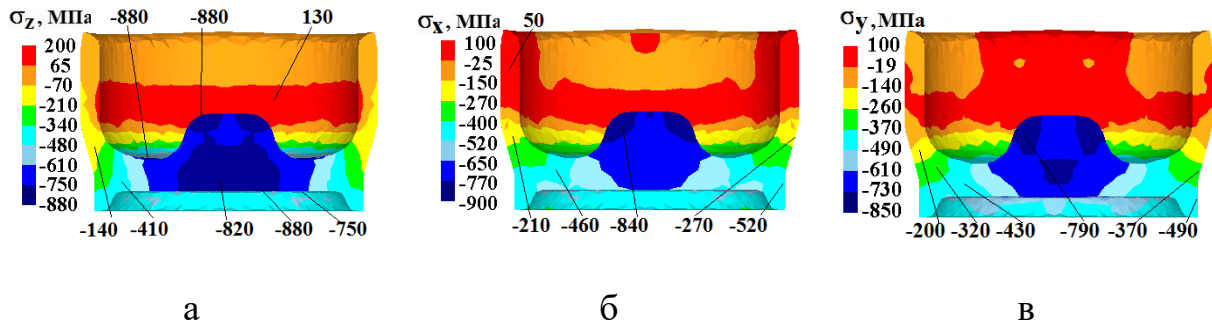


Рисунок 2.5. Розподіл напружень у напівфабрикаті здеформованого із заготовки круглого перерізу: а – напруження σ_z , б – напруження σ_x , в – напруження σ_y

При видавлюванні заготовки круглого перерізу (рис. 2.5а) у донній частині напівфабрикату напруження змінюються від $\sigma_z = -140$ МПа у місці переходу стінки у цю частину до $\sigma_z = -820$ МПа в області вісі донної частини. По напруженнях σ_z можна оцінити питомі зусилля, які виникають на контактуючих поверхнях пуансона і виштовхувача, що дозволяє призначити марку матеріалу та прогнозувати стійкість такого інструменту. Для цього на приведених розподілах напружень σ_z показано величини напружень на контактуючих поверхнях пуансона і виштовхувача. При видавлюванні на пуансоні питомі зусилля досягають 880 МПа, а на поверхні виштовхувача значення питомого зусилля змінюється від 410 МПа до 880 МПа.

Напруження σ_x при видавлюванні заготовки круглого перерізу у донній частині знаходяться у межах $\sigma_x = -210 \div -710$ МПа, у виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_x = -840$ МПа, а на контактуючій поверхні матриці $\sigma_x = -590$ МПа (рис. 2.5б).

Значення напруження σ_y для видавлювання напівфабрикату із заготовки круглого перерізу сягають $\sigma_y = -200 \div -670$ МПа, $\sigma_y = -790$ МПа та $\sigma_y = -490$ МПа (рис. 2.5в). По максимальним абсолютним величинам напружень σ_x і σ_y на контактуючих поверхнях призначають кількість бандажів для матриць.

2.1.5 Деформований стан напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу

На рис. 2.6 відображено розподіл компонент деформацій напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу.

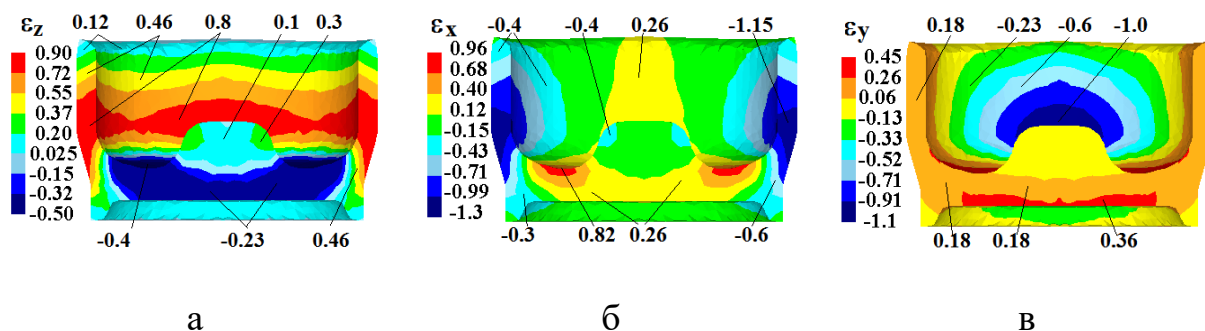


Рисунок 2.6. Розподіл компонент деформацій у напівфабрикаті здеформованого із заготовки круглої форми: а – деформації ε_z , б – деформації ε_x , в – деформації ε_y

У донній частині напівфабрикату деформації ε_z стискаючі в області під торцем пуансона мають величину $\varepsilon_z = -0,4$ (рис. 2.6а). Решта об'єму цієї частини має $\varepsilon_z = -0,23$. В зоні переходу стінки у донну частину отримано $\varepsilon_z = 0,8$ з подальшим зменшенням до $\varepsilon_z = 0,12$ в зоні торцю стінки.

Розтягувальні деформації ε_x виникають у донних частинах виробів, а у стінках вони стають розтягувальними. Після видавлювання заготовки круглого перерізу такі деформації виникають в донній частині у межах $\varepsilon_x = 0,26 \div 0,82$, а у стінці - $\varepsilon_x = -1,15 \div -0,4$ (рис. 2.6б).

Також розтягувальні деформації ε_y виникають у донних частинах виробів та знаходяться в межах $\varepsilon_y = 0,18 \div 0,36$ (рис. 2.6в).

Для деякої номенклатури порожнистих виробів, зокрема що використовується при виготовленні артилерійських боєприпасів, крім форми необхідно отримати задані механічні властивості у донній частині та по висоті

стілки. Для цього потрібне певне пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією. В цілому пропрацювання можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i .

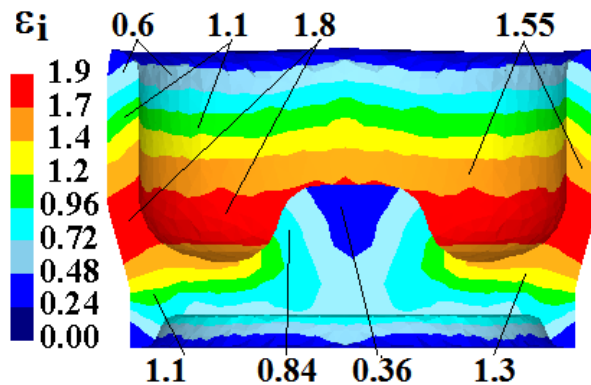


Рисунок 2.7. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки круглого перерізу

На рис. 2.7 показано розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки круглого перерізу. У донній частині виробу значення інтенсивності деформацій знаходиться у межах $\varepsilon_i = 0,84 \div 1,3$. По висоті стінки ці деформації зменшуються від $\varepsilon_i = 1,8$ в місці переходу стінки у донну частину до $\varepsilon_i = 0,6$ в області торцю стінки.

2.2 Гаряче зворотне видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату із заготовки квадратної перерізу

2.2.1 Розрахункова схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу

Розрахункові схеми в розрізі по площині ZOX при отриманні виробу із заготовки квадратного перерізу наведено на рис. 2.8. Схему на початку видавлювання показано на рис. 2.8а. Заготовка квадратного перерізу 1 встановлена в матриці 2 на виштовхувачі 3. Процес деформування виконується пуансоном 4, при опусканні якого отримується напівфабрикат 5 із виступами на донній частині зі сторони порожнини та на нижньому торці, а також в кутових зонах на торці стінки (рис. 2.8б). Необхідно відмітити, що формоутворення напівфабрикату із заготовки круглого перерізу, що описано раніше забезпечує отримання рівного торця стінки. При зворотному переміщенні пуансона 4 відбувається вилучення його із напівфабрикату 5,

який залишається в матриці 2 (рис. 2.8в). Виштовхування напівфабрикату 5 із матриці 2 відбувається при переміщенні виштовхувача 3 (рис. 2.8г).

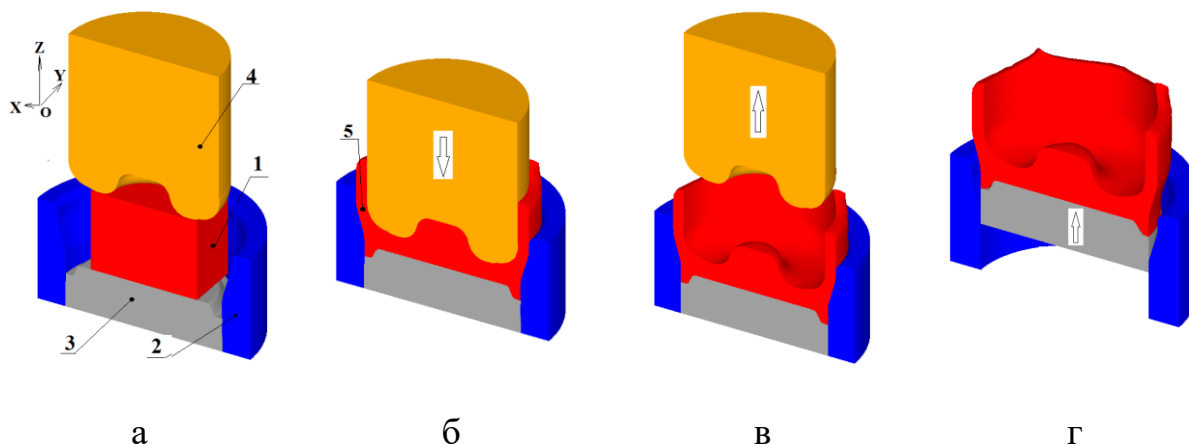


Рисунок 2.8. Розрахункові схеми при отриманні напівфабрикату із заготовки квадратної форми: а - на початку видавлювання; б - в кінці видавлювання; в - після вилучення пуансона із напівфабрикату; г - після виштовхування напівфабрикату із матриці

Для моделювання МСЕ процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою було використано зі сталі 15 заготовку квадратного перерізу з розмірами сторін 75x75 мм та висотою 55,6 мм, розмір по діагоналі такої заготовки відповідає діаметру заготовки круглого перерізу наведеної вище.

Для отримання вихідної заготовки обрано прокат сталевий гарячекатаний квадратний згідно ГОСТ 2591-88.

Розрахунок процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу проводився в програмі DEFORM 3D. Параметри для проведення розрахунку було задано такі ж як і для процесу видавлювання із заготовки круглого перерізу. Варто зазначити, що використання початкової заготовки квадратного перерізу замість заготовки круглого перерізу аргументується тим, що при нарізанні мірних заготовок на стрічкопильному верстаті витрати металу при нарізанні заготовок із прутка квадратного перерізу менші ніж при нарізанні заготовок з прутка круглого перерізу. Також полегшується центрування заготовки квадратного перерізу в робочій зоні штампу.

Порівнюємо витрати матеріалу при нарізанні заготовок з круглого та квадратного прутка. Об'єм заготовки круглого перерізу $V_{кр.заг.}$ з діаметром 106 мм та висотою 35,5 мм (використовувалась в розділі 2.1) розраховуємо за формулою 2.1:

$$V_{кр.заг.} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_{кр.заг.} \quad (2.1)$$

де, D – діаметр заготовки круглого перерізу, мм;

$H_{кр.заг.}$ – висота заготовки круглого перерізу, мм.

$$V_{кр.заг.} = \frac{\pi \cdot 106^2 \cdot 35,5}{4} = 313278 \text{ мм}^3$$

Об'єм заготовки квадратного перерізу $V_{кв.заг.}$ з розмірами сторін 75x75 мм та висотою 55,6 мм розраховуємо за формулою 2.2:

$$V_{кв.заг.} = A \cdot B \cdot H_{кв.заг.} \quad (2.2)$$

де, A та B – розміри сторін заготовки квадратного перерізу, мм;

$H_{кв.заг.}$ – висота заготовки квадратного перерізу, мм.

$$V_{кв.заг.} = 75 \cdot 75 \cdot 55,6 = 312750 \text{ мм}^3$$

Як бачимо з проведених розрахунків об'єм таких заготовок майже однаковий. Розраховуємо витрати металу $V_{вutr.кр.заг.}$ при нарізанні мірних заготовок із прокату круглого перерізу за формулою 2.3:

$$V_{вutr.кр.заг.} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S_p \quad (2.3)$$

де, S_p – товщина різь, що відповідає товщині полотна пилки, мм (при розрахунках взято $S_p = 1$ мм).

$$V_{вutr.кр.заг.} = \frac{\pi \cdot 106^2}{4} \cdot 1 = 8824,7 \text{ мм}^3$$

Розраховуємо витрати металу $V_{вutr.кв.заг.}$ при нарізанні мірних заготовок із прокату квадратного перерізу за формулою 2.4:

$$V_{вutr.кв.заг.} = A \cdot B \cdot S_p \quad (2.4)$$

$$V_{вutr.кв.заг.} = 75 \cdot 75 \cdot 1 = 5625 \text{ мм}^3$$

Як видно з розрахунків об'єм металу, що йде у відхід при нарізанні заготовок квадратного перерізу значно менший ніж при нарізанні заготовок круглого перерізу. Розраховуємо економію металу $K_{\text{ек.мет.}}$ при нарізанні заготовок квадратного перерізу в порівнянні з нарізанням заготовок круглого перерізу за формулою 2.5:

$$K_{\text{ек.мет.}} = \frac{V_{\text{вitr.кр.заг.}} - V_{\text{вitr.кв.заг.}}}{V_{\text{вitr.кр.заг.}}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

$$K_{\text{ек.мет.}} = \frac{8824,7 - 5625}{8824,7} \cdot 100\% = 36,2\%$$

При виготовленні заготовок квадратного перерізу шляхом відрізання від сортового прокату квадратного перерізу на стрічкопилльному верстаті витрати металу в стружку на **36,2% менше** ніж при використанні вищенаведеного способу для отримання заготовок круглого перерізу шляхом відрізання від сортового прокату круглого перерізу.

2.2.2 Силіві режими процесу видавлювання порожнистого напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу

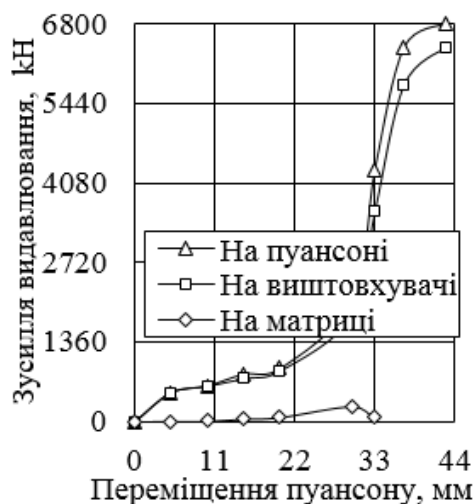


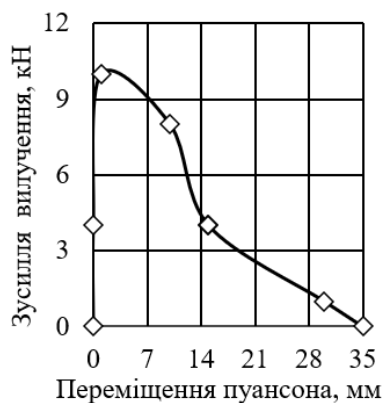
Рисунок 2.9. Залежності зусиль видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансона

Залежність зусиль гарячого зворотного видавлювання з роздачою напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу відображено на рис. 2.9. Аналізуючи дані, що наведено на рис. 2.9 можна побачити, що зусилля на пуансоні і виштовхувачі спочатку зростають повільно до переміщення пуансона на 30 мм, а потім відбувається інтенсивне збільшення зусиль до величин 6800 кН і 6400 кН відповідно в кінці видавлювання. Зростання зусиль в порівнянні з видавлюванням

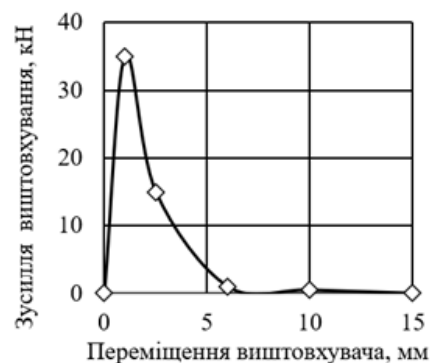
напівфабрикату із заготовки круглого перерізу пов'язано з центруванням

заготовки квадратної форми в матриці по діагоналях. При видавлюванні має місце течія металу по поверхні виштовхувача та формоутворення стінки відбувається здеформованим металом. Крім цього, вихідна заготовка квадратного перерізу має більшу висоту в порівнянні із заготовкою круглого перерізу і збільшується час формоутворення напівфабрикату, що приводить до охолодження здеформованого металу (рис 2.8б). Матриця в даному випадку сприймає менше зусилля, яке досягає максимального значення 260 кН. Зусилля на пуансоні необхідне для вибору пресового обладнання, а зусилля на виштовхувачі і матриці потрібне для проектування нижньої плити штампового оснащення. Таким чином, для отримання порожнистих виробів необхідної форми можна рекомендувати вихідні заготовки круглого перерізу.

На рис. 2.10 відображено залежність зусилля вилучення пуансона та зусилля виштовхування напівфабрикату від переміщення робочого інструмента. Зусилля вилучення досягає максимального величини на початку зворотного переміщення пуансона і складає 10 кН після видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу (рис.2.10а). На рис. 2.10б відображено залежність зусилля виштовхування напівфабрикату від переміщення виштовхувача. Найбільше значення зусилля виштовхування напівфабрикату складає 35 кН при переміщенні виштовхувача на 2 мм в напрямку вісі z (див. рис. 2.8а).



а



б

Рисунок 2.10. Залежність зусилля вилучення пуансона (рис. а) та зусилля виштовхування (рис. б) напівфабрикату від переміщення виштовхувача

Наведені величини зусиль необхідно враховувати при проектуванні пуансонотримачів та виштовхувачів у штамповому оснащенні.

2.2.3 Температурний розподіл напівфабрикату zdeформованого із заготовки квадратного перерізу

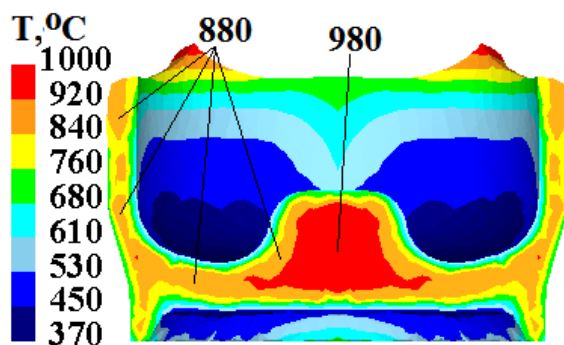


Рисунок 2.11. Розподіл температури в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу

На рис. 2.11 відображено розподіл температури в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу. Температура напівфабрикату у донній частині та у стінці знижується до $T = 880^{\circ}\text{C}$. Таким чином відкривається можливість виконання подальшого деформування стінки

напівфабрикату витягуванням з потоншенням в умовах гарячої деформації без проміжного підігріву.

2.2.4 Напружений стан та питомі зусилля напівфабрикату zdeформованого із заготовки квадратного перерізу

На рис. 2.12 відображено розподіл напружень у напівфабрикаті zdeформованого із заготовки квадратного перерізу.

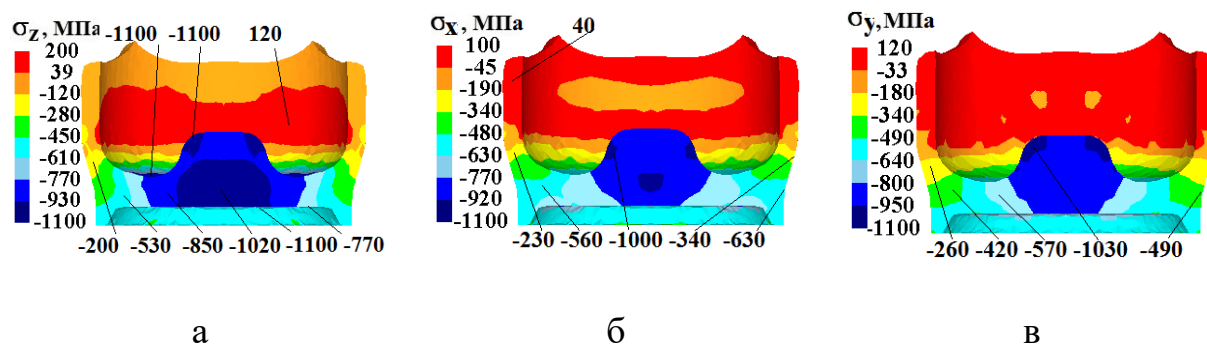


Рисунок 2.12. Розподіл напружень у напівфабрикаті zdeформованого із заготовки квадратного перерізу: а – напруження σ_z , б – напруження σ_x , в – напруження σ_y

Вигляд розподілів напружень практично однакові для видавлювання напівфабрикату із заготовок круглого (рис. 2.5) та квадратного (рис. 2.12) перерізів, але величини напружень відрізняються. Так як і для напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу для напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу у донній частині виникають стискаючі напруження, а у стінках ці напруження стають розтягувальними. У донній частині напівфабрикату у вказаних місцях напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -200$ МПа до $\sigma_z = -1020$ МПа (рис. 2.12а). Питомі зусилля на пуансоні досягають 1100 МПа, а на поверхні виштовхувача, що формує донну частину напівфабрикату вони змінюються у межах 770÷1100 МПа.

Напруження σ_x у донній частині напівфабрикату знаходяться у межах $\sigma_x = -230 \div -830$ МПа, у виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_x = -1000$ МПа, а на контактуючій поверхні матриці $\sigma_x = -630$ (рис. 2.12б) та приблизно таких величин сягають напруження σ_y - $\sigma_y = -260 \div -880$ МПа, $\sigma_y = -1030$ МПа та $\sigma_y = -490$ (рис. 2.12в).

2.2.5 Деформований стан напівфабрикату здеформованого із заготовки квадратного перерізу

На рис. 2.13 відображено розподіл компонент деформацій напівфабрикату здеформованого із заготовки круглого перерізу.

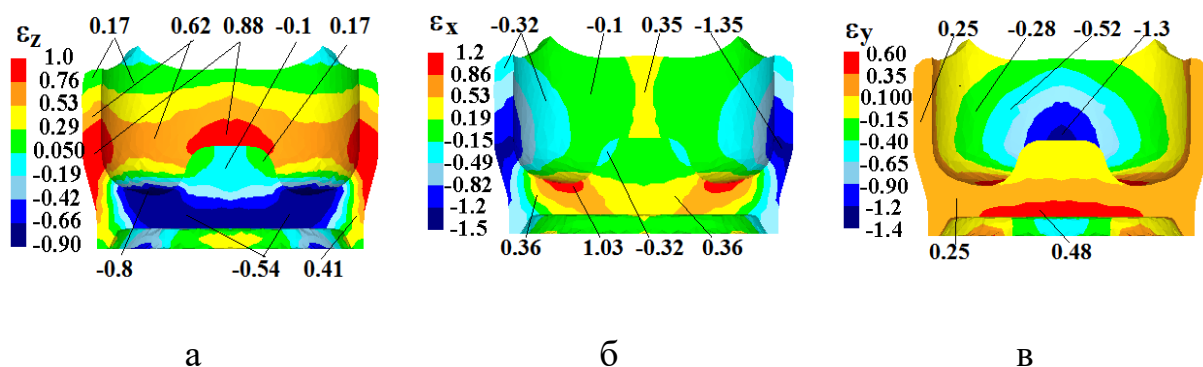


Рисунок 2.13. Розподіл компонент деформацій у напівфабрикаті здеформованого із заготовки квадратного перерізу: а – напруження ε_z , б – напруження ε_x , в – напруження ε_y

Порівнюючи компонент деформацій напівфабрикату отриманого із заготовки круглого (рис. 2.6) та квадратного перерізу (рис. 2.13) для останнього має місце збільшення компонент деформацій. Як і для напівфабрикату отриманого із заготовки круглого перерізу у напівфабрикаті отриманого із заготовки квадратного перерізу деформації ε_z у донних частинах виробів стискаючі, а по висоті стінки – розтягувальні. У донній частині напівфабрикату стискаючі деформації ε_z в області під торцем пуансона мають величину $\varepsilon_z = -0,8$ решта об'єму цієї частини $\varepsilon_z = -0,54$ (рис. 2.13а). В області переходу стінки у донну частину отримано $\varepsilon_z = 0,88$ з подальшим зменшенням до $\varepsilon_z = 0,17$ в зоні торцю стінки.

Розтягувальні деформації ε_x виникають у донних частинах виробів, а у стінках вони стають стискаючими. Після видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу такі деформації виникають в донній частині у межах $\varepsilon_x = 0,36 \div 1,03$, а у стінці $\varepsilon_x = -1,35 \div -0,32$ (рис. 2.13б).

Також розтягувальні деформації ε_y виникають у донних частинах виробів та знаходяться у межах $\varepsilon_y = 0,25 \div 0,48$ (рис. 2.13в).

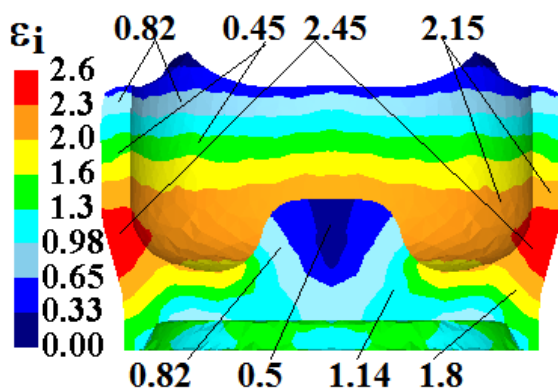


Рисунок 2.14. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратної форми

На рис. 2.14 показано розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу. У донній частині напівфабрикату отримано $\varepsilon_i = 1,14 \div 1,8$, а по висоті стінки ці деформації змінюються $\varepsilon_i = 2,45$ до $1,8$ $\varepsilon_i = 0,82$.

Порівнюючи отримані дані інтенсивності деформацій напівфабрикату отриманого із заготовки круглого (рис. 2.7) та квадратного перерізу (рис. 2.14) видно, що використання заготовок квадратного перерізу приводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією при

видавлюванні порожнистих виробів. Однак при формоутворенні напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу в зоні верхнього торцю має місце формоутворення чотирьох виступів, які утворюються внаслідок зворотної течії матеріалу заготовки з вершин заготовки квадратного перерізу, що негативно впливає на подальші операції витягування з потоншенням (необхідна більша величина ходу обладнання, ризик втрати стійкості у стінці виробу та проблеми зі зняттям напівфабрикату з інструмента). Тобто для подальших операцій витягування з потоншенням необхідно вводити проміжну операцію підрізання верхнього торцю, що є неприпустимим в умовах крупносерійного та масового виробництва (витрати на додатковий відхід матеріалу та на час підрізання торцю). Тому прийнято рішення перед операцією гарячого зворотного видавлювання з роздачою ввести операцію гарячого осаджування усіх вершин заготовки квадратного перерізу.

2.3 Гаряче осаджування заготовки квадратного перерізу

2.3.1 Розрахункова схема процесу гарячого осаджування напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого осаджування напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу, яку відображено на рис. 2.15. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу гарячого осаджування, а праворуч - в кінці осаджування. Заготовка 1 встановлюється на виштовхувач 2 з центруванням по матриці 3. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні пуансона 4 на задану відстань зі швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 5. Після зворотного ходу пуансона 4 напівфабрикат 5 виштовхується із матриці 3 за допомогою виштовхувача 2.

Для моделювання МСЕ процесу гарячого осаджування було використано ту ж заготовку, що використовувалась для процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою (без попереднього осаджування) – квадрат сталевий гарячекатаний 75x75 мм згідно ГОСТ 2591-88, матеріал

пуансона 25 мм і сягає максимальних значень 220 кН в кінці процесу осаджування.

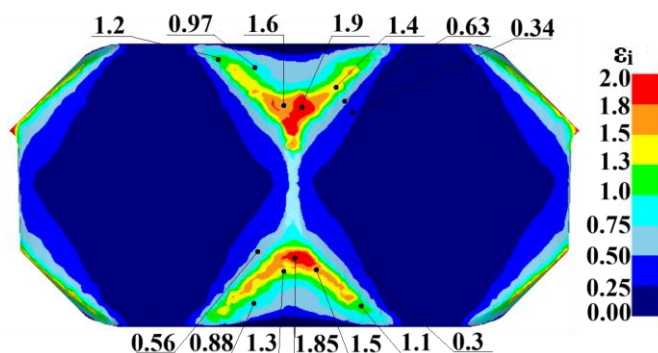


Рисунок 2.17. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці осаджування

На рис. 2.17 показано розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці осаджування. Максимальні значення ε_i в зоні де пуансон та матриця осаджували заготовку найбільше $\varepsilon_i = 1.6 \div 1.9$. По мірі зменшення величини осаджування значення ε_i у

напівфабрикаті зменшується від $\varepsilon_i = 1.4$ до $\varepsilon_i = 0.3$.

2.3.3 Температурний розподіл осаджування напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу

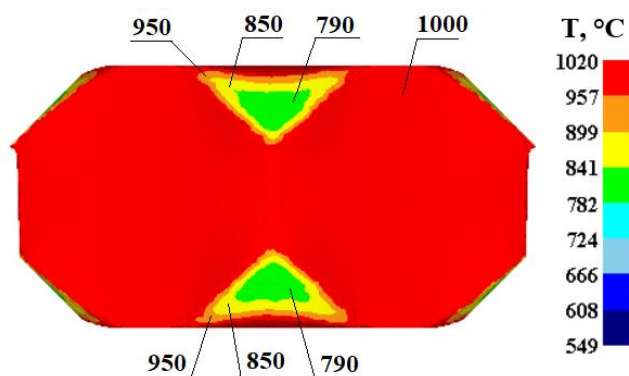


Рисунок 2.18. Розподіл температури в кінці осадження напівфабрикату із заготовки квадратної форми (вигляд спереду на ребро напівфабрикату)

На рис. 2.18 відображено розподіл температури в кінці осаджування напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу. Температура напівфабрикату у місці контакту з деформуючим інструментом $T = 790 - 950^\circ\text{C}$. Температура основного об'єму напівфабрикату майже не змінилась $T = 980 - 1000^\circ\text{C}$. То ж наступний перехід гарячого

зворотного видавлювання з роздачою можна виконувати в умовах гарячої деформації без проміжного підігріву.

2.4 Гаряче зворотне видавлювання з роздачою порожнистого виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

2.4.1 Розрахункова схема процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого виробу здеформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

Розрахункові схеми в розрізі по площині ZOX при отриманні виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу наведено на рис. 2.19. Схему на початку видавлювання показано на рис. 2.19а. Осаджений напівфабрикат 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. Процес деформування виконується пуансоном 4, при опусканні якого отримується напівфабрикат 5 із виступами на донній частині зі сторони порожнини та на нижньому торці (рис. 2.19б). Необхідно відмітити, що формоутворення виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу, дає змогу уникнути утворень виступів на верхньому торці стінки (рис. 2.11). Це дає змогу значно зекономити час та витрати матеріалу у відхід, оскільки не потрібно вводити операцію підрізання верхнього торцю виробу для подальших операцій витягування з потоншенням. При зворотному

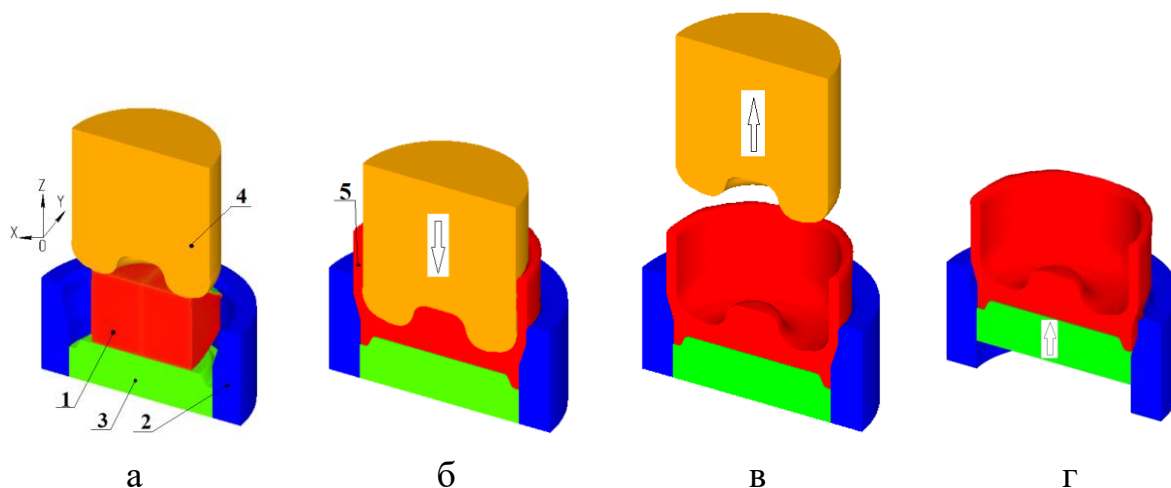


Рисунок 2.19. Розрахункові схеми при отриманні виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратної форми: а - на початку

видавлювання; б - в кінці видавлювання;

в - після вилучення пуансона із виробу; г - після виштовхування виробу із матриці

переміщенні пуансона 4 відбувається вилучення його із виробу 5, який залишається в матриці 2 (рис. 2.19в). Виштовхування виробу 5 із матриці 2 відбувається при переміщенні виштовхувача 3 (рис. 2.19г).

Розрахунок процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистого виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу проводився в програмі DEFORM 3D. Параметри для проведення розрахунку було задано такі ж як і для процесу видавлювання із заготовки квадратного перерізу без попереднього осаджування.

2.4.2 Силіві режими процесу видавлювання порожнистого виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

Залежність зусиль гарячого зворотного видавлювання з роздачою виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу відображено на рис. 2.20. Аналізуючи дані, що наведено на рис. 2.20 можна



Рисунок 2.20. Залежності зусиль видавлювання виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратної форми на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансона

побачити, що зусилля на пуансоні і виштовхувачі спочатку зростають повільно до переміщення пуансона 22 мм, а потім відбувається інтенсивне збільшення зусиль до величин 3800 кН і 3600 кН відповідно в кінці видавлювання. Матриця сприймає менше зусилля, яке досягає максимального значення 380 кН. Зусилля вилучення пуансона та зусилля виштовхування виробу порівняно

із процесом видавлювання виробу без попереднього осаджування (рис. 2.10) за величиною максимальних значень не змінились.

2.4.3 Температурний розподіл виробу здеформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

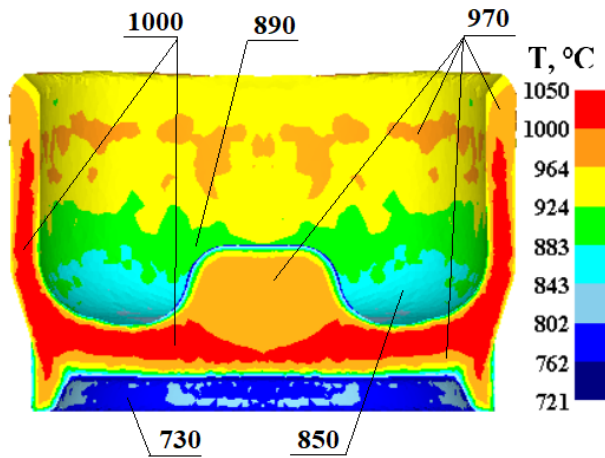


Рисунок 2.21. Розподіл температури в кінці видавлювання напівфабрикату із заготовки квадратної форми

На рис. 2.21 відображено розподіл температури в кінці видавлювання виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу. Температура виробу у донній частині та у стінці до $T = 970 \div 1000^\circ\text{C}$. В зоні контакту із виштовхувачем температура виробу $T = 730^\circ\text{C}$. Це означає, що можливо виконувати подальше деформування стінки виробу

витягуванням з потоншенням в умовах гарячої деформації без проміжного підігріву.

2.4.4 Напружений стан та питомі зусилля виробу здеформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

На рис. 2.22 відображено розподіл напружень у виробі здеформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратної форми.

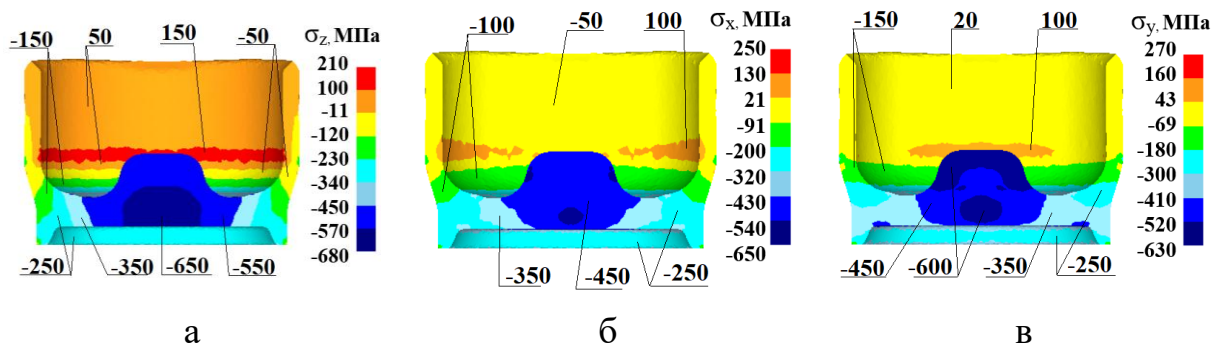


Рисунок 2.22. Розподіл напружень у виробі здеформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу: а – напруження σ_z , б – напруження σ_x , в – напруження σ_y

У донній частині виробу у вказаних місцях напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -200$ МПа до $\sigma_z = -650$ МПа (рис. 2.22а). Питомі зусилля на пуансоні досягають 550 МПа, а на поверхні виштовхувача, що формує донну частину напівфабрикату вони змінюються у межах $-250 \div -650$ МПа.

Напруження σ_x у донній частині напівфабрикату знаходяться у межах $\sigma_x = -250 \div -450$ МПа, у виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_x = -450$ МПа, а на контактуючій поверхні матриці $\sigma_x = -100$ (рис. 2.22б) та приблизно таких величин сягають напруження σ_y - $\sigma_y = -250 \div -600$ МПа, $\sigma_y = -600$ МПа та $\sigma_y = 100$ МПа (рис. 2.22в).

2.4.5 Деформований стан виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

На рис. 2.23 відображено розподіл компонент деформацій виробу zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу.

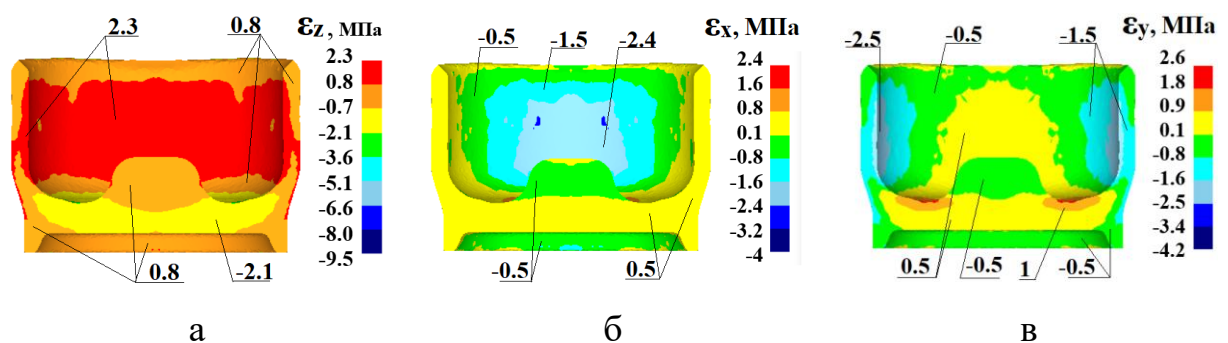


Рисунок 2.23. Розподіл компонент деформацій у виробі zdeформованого із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу:

а – напруження ε_z , б – напруження ε_x , в – напруження ε_y

Аналізуючи рис. 2.23 можна побачити, що деформації ε_z у донних частинах виробів як стискаючі так і розтягувальні, а по висоті стінки – розтягувальні. У донній частині виробу деформації ε_z в області під торцем пуансона мають величину $\varepsilon_z = 0,8$ – розтягувальні та $\varepsilon_z = -2,1$ - стискаючі (рис. 2.23а). В області переходу стінки у донну частину отримано $\varepsilon_z = 2,3$ з подальшим зменшенням до $\varepsilon_z = 0,8$ в зоні торцю стінки.

Деформації ε_x у стінці стискачі та знаходяться в межах $\varepsilon_x = -0,5 \div -2,4$, а у донній частині діють як розтягувальні так і стискачі деформації ε_x та однакові за величиною $\varepsilon_x = \pm 0,5$ (рис. 2.23б).

Деформації ε_y у донній частині виробу як стискаючі та і розтягувальні, стискаючі $\varepsilon_y = -0,5$, а розтягувальні $\varepsilon_y = 0,5 \div 1$. У стінці деформації ε_y – стискаючі та знаходяться в межах $\varepsilon_y = -0,5 \div -2,5$ (рис. 2.23в).

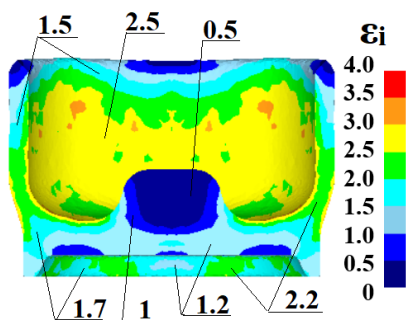


Рисунок 2.24. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці видавлювання виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу

На рис. 2.24 показано розподіл інтенсивності деформацій ε_i в кінці видавлювання виробу із попередньо осаджуваного напівфабрикату квадратного перерізу. У донній частині виробу отримано $\varepsilon_i = 0,5 \div 2,2$, а по висоті стінки ці деформації змінюються від $\varepsilon_i = 1,5$ до $\varepsilon_i = 2,5$.

Моделювання МСЕ дозволило встановити параметри для проектування технології гарячого штампування порожнистих виробів із заготовок круглого і квадратного перерізу: зусилля видавлювання і виштовхування – для вибору пресового обладнання, питомі зусилля – для проектування штампового оснащення, форму і розміри виробів та

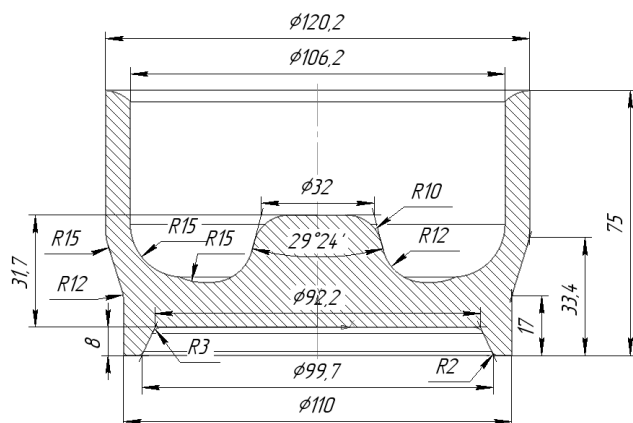


Рисунок 2.25. Форма та розміри напівфабрикату отриманого гарячим зворотним видавлюванням з роздачою

пропрацювання структури металу гарячою деформацією – для оцінки якості виробів.

На рис. 2.25 відображено форму та розміри напівфабрикату отриманого гарячим зворотним видавлюванням з роздачою.

2.5 Теоретичний аналіз процесів гарячого формоутворення порожнистих виробів за допомогою аналітичних розрахунків

2.5.1 Опис основних аналітичних методів дослідження

Основними аналітичними методами дослідження процесів обробки металів тиском вважають: метод верхньої оцінки, інженерний метод та метод балансу потужностей.

2.5.1.1 Метод верхньої оцінки (МВО) відноситься до енергетичних методів теоретичного аналізу процесів обробки металів тиском (ОМТ) і заснований на законі збереження енергії. МВО в основному використовують для теоретичного аналізу плоских і вісесиметричних задач ОМТ. Крім визначення зусиль і питомих зусиль деформування метод дозволяє виконати оптимізацію геометричної форми деформуючого інструменту для отримання мінімального зусилля деформування.

Якщо заготовку поділити на ряд жорстких об'ємів, які не деформуються, і вважати, що пластична деформація проходить за рахунок зміщення цих об'ємів та зсуву між ними, тоді рівняння балансу потужностей в процесі формоутворення виробу буде мати вигляд (формула 2.1):

$$N_{\text{ПР}} = N_T + N_3, \quad (2.1)$$

де: $N_{\text{ПР}}$ - потужність пресу для виконання операції ОМТ; N_T - потужність, яка витрачається на подолання тертя між об'ємами, що зміщуються на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструмента; N_3 - потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву між вказаними об'ємами [188].

2.5.1.2 Сутність інженерного методу (ІМ) для аналізу процесів ОМТ полягає в спільному вирішенні диференційних рівнянь рівноваги з умовою пластичності. Диференційні рівняння рівноваги (ДРР) в декартових координатах (x, y, z) для деформування заготовки довільної форми мають вигляд (формула 2.2) [188]:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

2.5.1.3 Метод балансу потужностей відносять до енергетичних методів теоретичного аналізу процесів ОМТ. В процесах ОМТ потужність зовнішніх сил N_{3C} , які прикладаються до заготовки, витрачається на потужність для подолання сил опору деформування N_D та потужність на подолання сил тертя N_T частинок металу на контактуючій поверхні з деформуючим інструментом. Тоді рівняння балансу потужностей в будь-якому процесі ОМТ має вигляд (формула 2.3) [188]:

$$N_{3C} = N_D + N_T \quad (2.3)$$

2.6 Висновки

1 Описано схеми процесів гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистих виробів із заготовок круглого і квадратного перерізу.

2 За допомогою МСЕ проведено моделювання процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою порожнистих виробів із заготовок круглого і квадратного перерізу. Для заготовок квадратного перерізу введено додаткову операцію гаряче осаджування щоб уникнути утворення виступів на верхньому торці напівфабрикату отриманого внаслідок операції гарячого зворотного видавлювання з роздачою.

3 Встановлено, що при отриманні заготовок із прутка квадратного перерізу витрати металу у відхід на 36,2% менші у порівнянні з отриманням заготовок із прутка круглого перерізу.

4 Встановлено зусилля осаджування та видавлювання, вилучення пуансонів із напівфабрикатів та виштовхування виробів із матриць. Зусилля видавлювання при використанні заготовки круглого перерізу на 16% менше від зусилля видавлювання із заготовки квадратного перерізу.

5 У металі донних частинах і стінках виробів виявлено напружений стан і питомі зусилля на деформуючому інструменті, а також деформований стан після видавлювання. Використання заготовки квадратного перерізу в

порівнянні із заготовкою круглого перерізу, забезпечує більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією у донних частинах і стінках виробів.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ ПОРОЖНИСТОГО ВИРОБУ

3.1 Аналітичні розрахунки процесу витягування з потоншенням

В залежності від співвідношення висоти і діаметру виробу, що витягується, а також від відносної товщини заготовки процес витягування може бути виконано за одну або декілька операцій. Необхідно, щоб витягування було виконано з як можна найменшою кількістю операцій та з як можна більшим ступенем деформації E , без застосування проміжного відпалу [31].

Ступінь деформації E при витягуванні циліндричних деталей може бути виражена одним із наступних показників (формула 3.1):

$$K = \frac{D}{d}, \quad (3.1)$$

де, K – ступінь витягування;

D – діаметр заготовки, мм;

d – діаметр деталі, мм.

Коефіцієнт витягування m можна визначити за формулою 3.2:

$$m = \frac{d}{D} = \frac{1}{K}, \quad (3.2)$$

Як видно ступінь витягування K величина взаємо обернена коефіцієнту витягування m , відповідно чим менший коефіцієнт витягування тим більша ступінь деформації E .

Однак в даному випадку попередні розрахунки ступеня деформації E варто виконувати не по формулам (3.1) та (3.2), а по величині зменшення товщини стінки яка може бути виражена формулою 3.3 [31]:

$$E = \frac{(S_{n-1} - S_n)}{S_{n-1}}, \quad (3.3)$$

де, S_{n-1} – товщина стінки до операції витягування з потоншенням, мм;

S_n – товщина стінки після операції витягування з потоншенням, мм.

Так як і у випадку із формулами (3.1) та (3.2) також є величина взаємо обернена до ступеня деформації – коефіцієнт витягування з потоншенням $m_{\text{пот}}$, який розраховують за формулою 3.4 [2]:

$$m_{\text{пот}} = \frac{S_n}{S_{n-1}}, \quad (3.4)$$

Оскільки перша та друга операції витягування з потоншенням виконуються в умовах гарячої деформації, необхідно враховувати коефіцієнт температурного розширення (КТР) матеріалу [189]. Тобто після витягування напівфабрикату через другу матрицю слідуватиме відпал та подальше охолодження отриманого виробу. КТР матеріалу виробу згідно [189] становить 1,5%, що необхідно враховувати в подальших розрахунках.

Враховуючи вищенаведене виконуємо попередні розрахунки процесу витягування з потоншенням порожнистого виробу. Вихідні дані – напівфабрикат, який отримано після операції гарячого зворотного видавлювання з роздачою із товщиною стінки $S_{\text{ст.заг}} = 7$ мм та зовнішнім діаметром $D_{\text{заг}} = 121,4$ мм. Для операції витягування через дві послідовно розташовані матриці назначаємо діаметр пуансону з врахуванням КТР $D_{\text{п1;2}} = 107,76$ мм. Діаметр першої матриці назначаємо з врахуванням КТР $D_{\text{м1}} = 112 \cdot 1,015 = 113,68$ мм та діаметр другої матриці з врахуванням КТР $D_{\text{м2}} = 110 \cdot 1,015 = 111,65$ мм. Витягування з потоншенням через третю матрицю виконується на холодну тому і розміри назначаємо ті, які необхідно отримати, діаметр пуансону для 3-го витягування назначаємо дещо меншим в порівнянні із холодними розмірами пуансону для 1-го та 2-го витягування, щоб при послідуочій операції витягування пуансон зайшов з невеликим зазором в напівфабрикат, тому діаметр пуансону для 3-го витягування $D_{\text{п3}} = 106$ мм, а діаметр матриці $D_{\text{м3}} = 109$ мм.

Розраховуємо товщину стінки, яку буде отримано внаслідок витягування з потоншенням через першу матрицю за формулою [3.5]:

$$S_{\text{ст1}} = (D_{\text{м1}} - D_{\text{п1;2}})/2, \quad (3.5)$$

де, $S_{\text{ст1}}$ - товщина стінки після 1-го витягування з потоншенням.

$$S_{\text{ст1}} = (113,68 \text{ мм} - 107,76 \text{ мм})/2 = 2,96 \text{ мм}$$

Згідно формули 3.4 виконуємо розрахунок коефіцієнту витягування з потоншенням:

$$m_{\text{пот1}} = \frac{S_{\text{ст1}}}{S_{\text{ст.заг}}} = \frac{2,96}{7} = 0,42$$

Порівнюємо отриманий коефіцієнт 0,42 з рекомендованим в довідковій літературі [2] значення найменшого коефіцієнту витягування з потоншенням на першій операції – 0,75. При холодних процесах витягування з потоншенням гарантовано відбудеться руйнування матеріалу, оскільки $0,42 < 0,75$, але в нашому випадку витягування через першу матрицю проходить в умовах гарячої деформації, матеріал більш пластичний, тому для моделювання процесу витягування через першу матрицю задаємось коефіцієнтом 0,42.

Розраховуємо товщину стінки, яку буде отримано внаслідок витягування з потоншенням через другу матрицю за формулою 3.5:

$$S_{\text{ст2}} = D_{\text{м2}} - D_{\text{п1;2}} = (111,65 \text{ мм} - 107,76 \text{ мм})/2 = 1,945 \text{ мм}$$

Згідно формули 3.4 виконуємо розрахунок коефіцієнту витягування з потоншенням:

$$m_{\text{пот2}} = \frac{S_{\text{ст2}}}{S_{\text{ст1}}} = \frac{1,945}{2,96} = 0,65$$

Порівнюємо отриманий коефіцієнт 0,65 з рекомендованим в довідковій літературі [2] значення найменшого коефіцієнту витягування з потоншенням на послідовуючих операціях – 0,65. Оскільки $0,65 = 0,65$, орієнтовно руйнування при витягуванні з потоншенням через другу матрицю не відбудеться.

Розраховуємо товщину стінки, яку буде отримано внаслідок витягування з потоншенням через другу матрицю за формулою 3.5:

$$S_{\text{ст3}} = D_{\text{м3}} - D_{\text{п3}} = (109 \text{ мм} - 106 \text{ мм})/2 = 1,5 \text{ мм}$$

Згідно формули 3.4 виконуємо розрахунок коефіцієнту витягування з потоншенням:

$$m_{\text{пот3}} = \frac{S_{\text{ст3}}}{S_{\text{ст2}}} = \frac{1,5}{1,945} = 0,77$$

Порівнюємо отриманий коефіцієнт 0,77 з рекомендованим в довідковій літературі [2] значення найменшого коефіцієнту витягування з потоншенням на послідуєчих операціях – 0,65. Оскільки $0,77 > 0,65$, орієнтовно руйнування при витягуванні з потоншенням через третю матрицю не відбудеться.

Отже, аналітичні розрахунки процесу витягування з потоншенням вказують на те, що руйнування при визначених розмірах робочого інструмента не відбудеться (окрім витягування через першу матрицю, оскільки процес деформування проходить в гарячому стані, був прийнятий коефіцієнт витягування 0,42 як допустимий) тож можемо переходити до чисельних розрахунків за допомогою MCE в програмному комплексі DEFORM 3D, де можна більш точно спрогнозувати характер формоутворення виробу та оцінити критерій руйнування.

3.2 Гаряче витягування з потоншенням порожнистого виробу через дві послідовно розташовані матриці

3.2.1 Розрахункова схема процесу гарячого витягування з потоншенням порожнистого виробу через дві послідовно розташовані матриці

Розрахункову схему процесу гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці наведено на рис. 3.1.

Спосіб отримання виробу через дві послідовно розташовані матриці полягає в наступному: заготовка 1 встановлюється сформованою на попередній операції гарячого зворотного видавлювання з роздачою конусною частиною (рис. 2.18б) у першу матрицю 2 спираючись на її відповідну конусну частину. Перша матриця 2 встановлена на першій обоймі 3, що слугує для правильного підбору висоти між першою матрицею 2 та другою матрицею 4.

Друга матриця 4 встановлена на другій обоймі 5. Процес витягування з потоншення відбувається за рахунок переміщення пуансону 6 зусиллям P зі швидкістю V вниз через дві послідовно розташовані матриці.

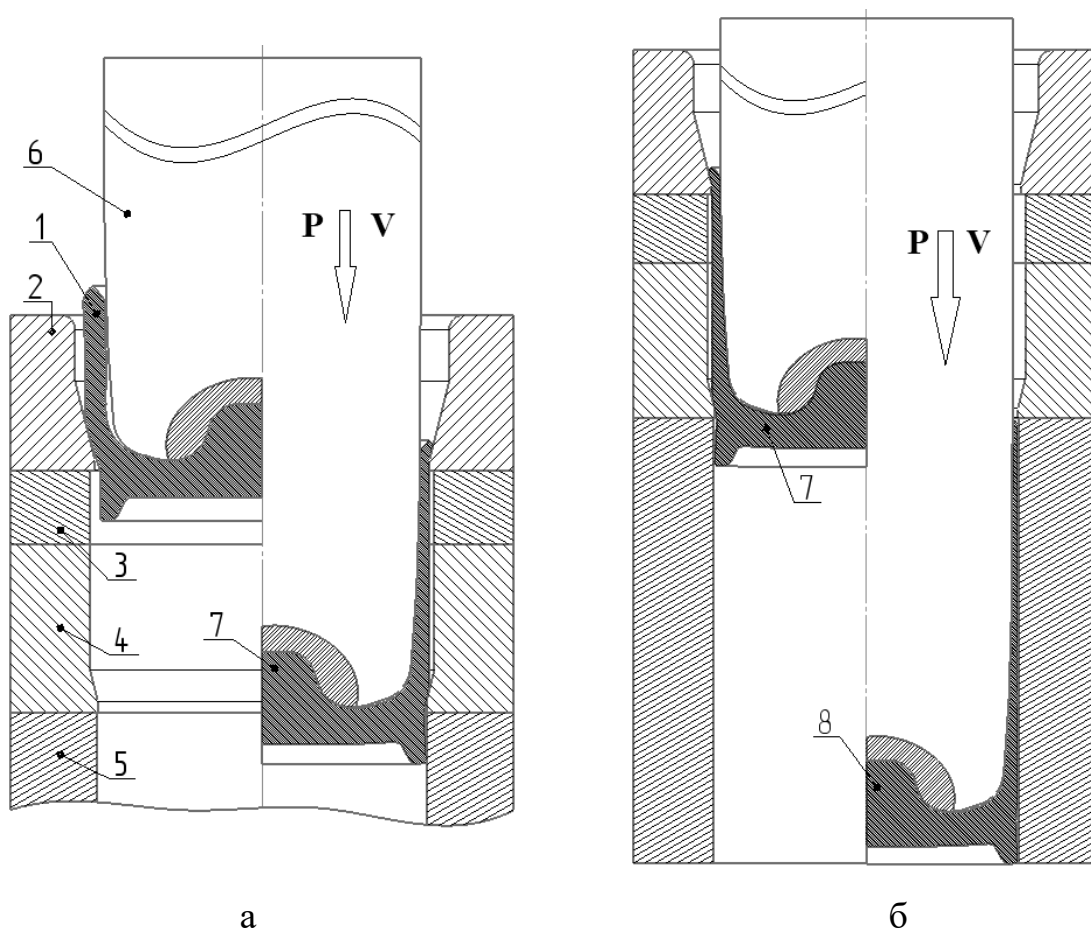


Рисунок 3.1. Схема витягування з потоншення через дві послідовно розташовані матриці: 1 – заготовка, 2 – перша матриця, 3 – перша обойма, 4 – друга матриця, 5 – друга обойма, 6 – пуансон, 7 – напівфабрикат після витягування через першу матрицю, 8 – виріб

Висоту першої обойми 3 підібрано таким чином, щоб сумарне зусилля деформування через першу матрицю 2 та другу матрицю 4 не перевищувало зусилля деформування через першу матрицю 2. В кінці процесу витягування з потоншення через першу матрицю 2 утворюється напівфабрикат 7 (рис. 3.1а). Напівфабрикат 7, який отримано витягуванням з потоншення через першу матрицю 2 деформується пуансоном 6 через другу матрицю 4 внаслідок чого формується виріб 8 (рис. 3.1б). Виріб 8 знімається з пуансону 6 при зворотному його переміщенні знімачем.

Для проведення розрахунків МСЕ використовувалась програма DEFORM 3D. Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: швидкість переміщення пуансона $V = 40$ мм/с., фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,3$, початкова температура заготовки відповідала температурі наприкінці процесу гарячого зворотного видавлювання з роздачою (рис. 2.20) отриманого напівфабрикату.

3.2.2 Силві режими процесу гарячого та напівгарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці

На рис. 3.2 відображено залежність зусилля витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці від переміщення пуансона.

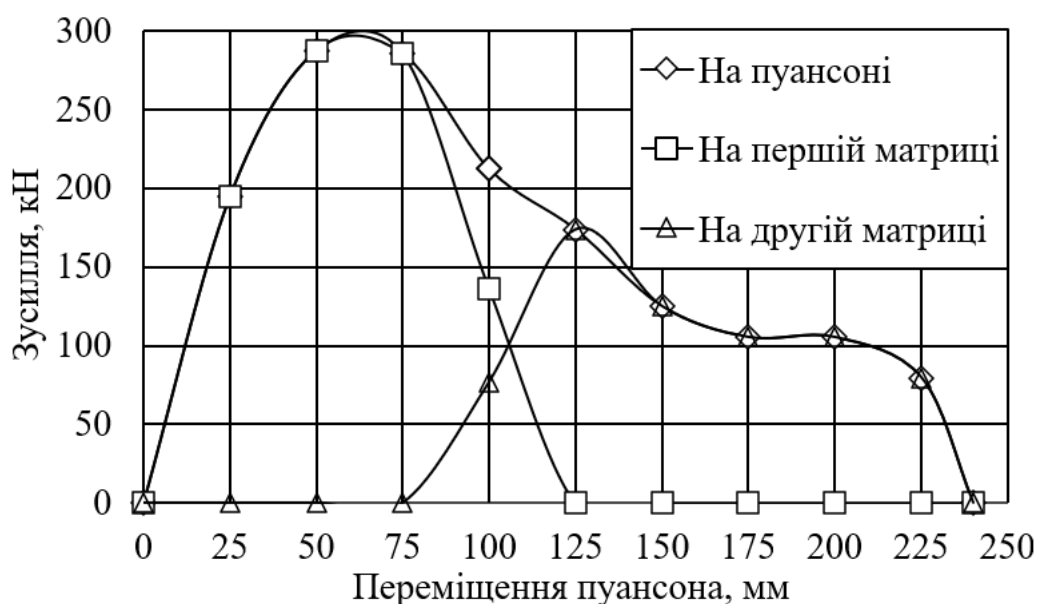


Рис. 3.2. Залежність зусилля витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці від переміщення пуансона

На першій стадії деформування при переміщенні пуансона на 60 мм відбувається різке зростання зусилля на пуансоні та першій матриці до величини 287,2 кН, з поступовим зменшенням при переміщенні 75 мм до 285,2 кН, після чого зусилля, що сприймає матриця різко зменшується і при переміщенні пуансона 125 мм сягає нульових значень. При переміщенні пуансона 75 мм починається процес витягування з потоншенням через другу

матрицю. Максимальне зусилля, що сприймає друга матриця – 124,8 кН при переміщенні пуансона на 125 мм, пуансон сприймає таке ж зусилля. Далі зусилля, що сприймає пуансон та друга матриця стають однаковими за величиною та поступово зменшуються доки не сягають нульових значень при переміщенні пуансона 240 мм – кінець процесу витягування з потоншенням. Варто зазначити, що у діапазоні переміщення пуансона від 150 мм до 200 мм зусилля деформування на пуансоні та другій матриці стає стабільним та знаходиться в межах 120...100 кН, що вказує на рівномірність процесу потоншення стінки.

3.2.3 Оцінка критерію руйнування процесу гарячого витягування з потоншенням порожнистого виробу

На рис. 3.3 відображено коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L при витягуванні з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці

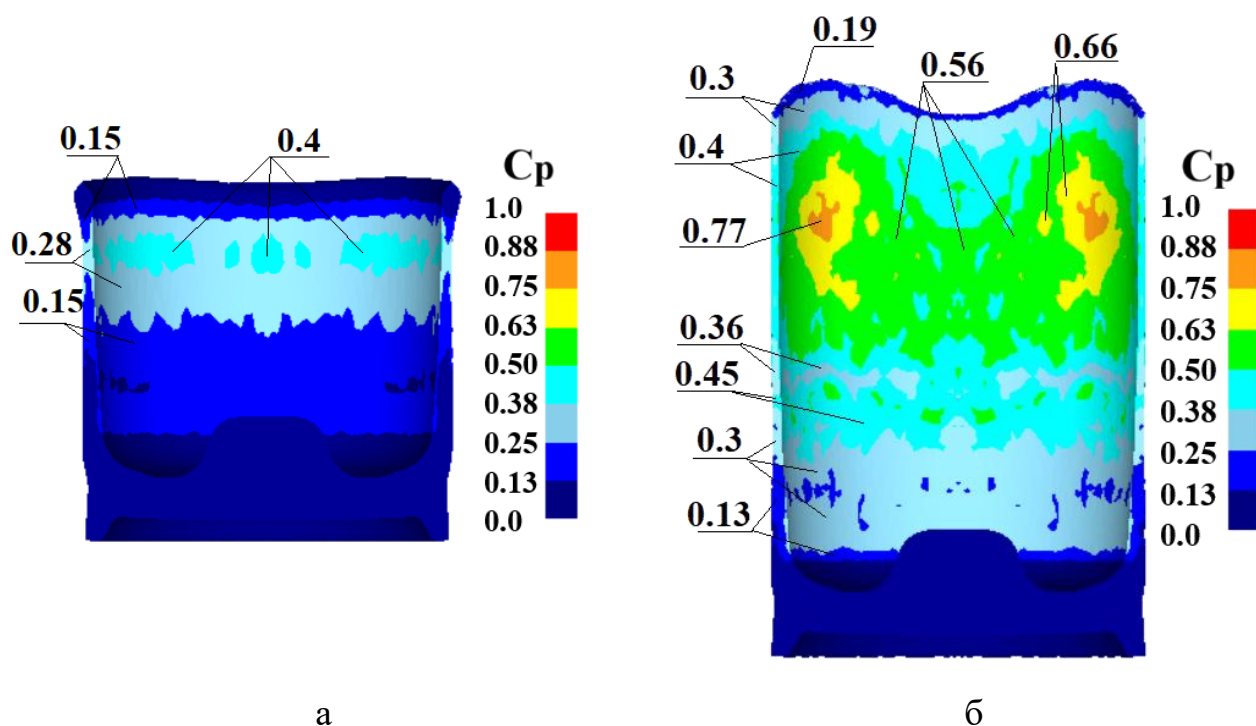


Рисунок 3.3. Коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L при витягуванні з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці: а – наприкінці витягування з потоншенням через першу матрицю, б - – наприкінці витягування з потоншенням через другу матрицю

Наприкінці процесу витягування з потоншенням через першу матрицю найбільший коефіцієнт критерію руйнування у стінці напівфабрикату сягає значення 0,4 у вказаному місці (рис. 3.3а), а в інших місцях дещо менший та знаходиться в межах $0.15 \div 0.28$.

Наприкінці процесу витягування з потоншенням через другу матрицю коефіцієнт критерію руйнування сягає дещо більших значень, від придонної частини до середини висоти у стінці виробу $0.13 \div 0.45$, однак в деяких місцях стінки виробу ці значення сягають 0.56, 0.66 та 0.77. Така нерівномірність розподілу критерію руйнування пов'язана з тим, що початковою заготовкою був пруток квадратного перерізу, вершини якого було осаджено з подальшим зворотним видавлюванням з роздачою, внаслідок чого матеріал заготовки квадратного перерізу більше зміцнювався ближче до ребр у зв'язку з нерівномірним розподілом інтенсивності деформацій (рис. 2.23), також це можна спостерігати по утворенню виступів (рис. 3.3б). Цей дефект буде виправлено за допомогою проміжного відпалу та подальшого підрізання верхнього торця. Ближче до верхнього торця виробу у стінці величина критерію руйнування знаходиться в межах $0.4 \div 0.19$. При розрахунках варто орієнтуватись на граничний коефіцієнт критерію руйнування з величиною 0.8, оскільки при досягненні величини 1 відбувається руйнування матеріалу виробу, а показник 0.8 дає 20% запасу до моменту руйнування.

3.2.4 Температурний розподіл порожнистого виробу

На рис. 3.3 наведено розподіл температури в напівфабрикаті після витягування з потоншенням через першу матрицю. Температура напівфабрикату у донній частині та у зоні переходу донної частини в стінку $T = 805^{\circ}\text{C}$. По висоті стінки від донної частини до верхнього торця температура дещо менша $T = 750 \div 650^{\circ}\text{C}$. На внутрішній поверхні напівфабрикату зі сторони порожнини на радіусній частині матеріал охолоджується найбільше $T = 530^{\circ}\text{C}$.

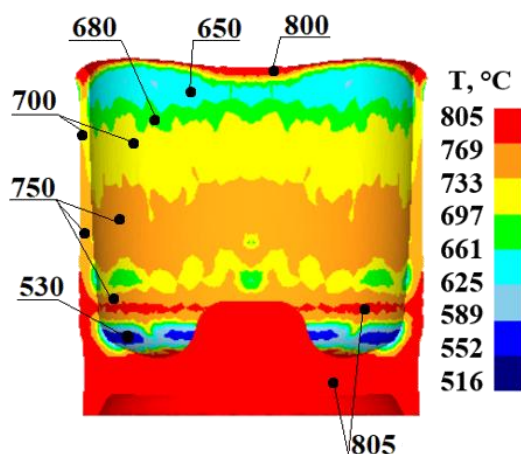


Рисунок 3.3. Розподіл температури напівфабрикату після витягування з потоншенням через першу матрицю

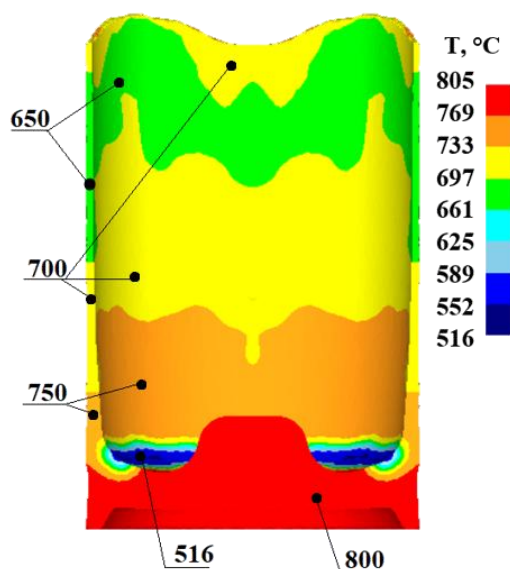


Рисунок 3.4. Розподіл температури виробу після витягування з потоншенням через другу матрицю

На рис. 3.4 відображено розподіл температури виробу після витягування з потоншенням через другу матрицю. Температура виробу у донній частині $T = 800^{\circ}\text{C}$. По висоті стінки від донної частини до верхнього торця температура зменшується та лежить у межах $T = 750 \div 650^{\circ}\text{C}$.

Найбільше охолодження спостерігається на внутрішній поверхні виробу на радіусній частині $T = 516^{\circ}\text{C}$.

Отже, як видно з рисунків 3.3 та 3.4 температура процесу витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці знаходиться у межах $T = 516 \div 805^{\circ}\text{C}$. Згідно [192] неповна гаряча деформація протікає в температурному інтервалі $(0,5 \div 0,7)T_{\text{пл}}$, а неповна холодна $(0,3 \div 0,5)T_{\text{пл}}$. Для сталей

$T_{\text{пл}} = 1450 \div 1520^{\circ}\text{C}$. При неповній гарячій деформації процес рекристалізації і знеміцнення відбуваються неповністю, структура матеріалу рекристалізована та деформована, а при неповній холодній деформації відбувається часткове знеміцнення в результаті повернення, що викликано розігрівом через вихід тепла в процесі деформування (визначення процесів дано С. І. Губкіним).

Процес деформування стінки при витягуванні через першу матрицю $(650 \div 800^\circ\text{C})/1500^\circ\text{C} = 0,43 \div 0,53$ – неповна холодна та неповна гаряча деформація.

Процес деформування стінки при витягуванні через другу матрицю $(650 \div 750^\circ\text{C})/1500^\circ\text{C} = 0,43 \div 0,5$ – неповна холодна деформація.

3.2.5 Напружений стан та питомі зусилля порожнистого виробу здеформованого через дві послідовно розташовані матриці

На рис. 3.5 наведено розподіл напружень у напівфабрикаті після витягування з потоншенням через першу матрицю. У донній частині напівфабрикату напруження σ_z складають майже нульових значень, оскільки у донній частині процес деформування не відбувається. У стінці напівфабрикату напруження σ_z – розтягувальні та сягають значень $30 \div 100$ МПа. Напруження σ_x мають знакозмінний характер як і напруження σ_y , що пов'язано з нерівномірністю попередніх операцій деформування. Напруження σ_x в придонній частині сягають $\sigma_x = 10 \div 17$ МПа, від придонної частини до середини стінки – розтягувальні $\sigma_x = 33 \div 44$ МПа, а ближче до верхнього торця напівфабрикату стискаючі $\sigma_x = -44 \div -130$ МПа.

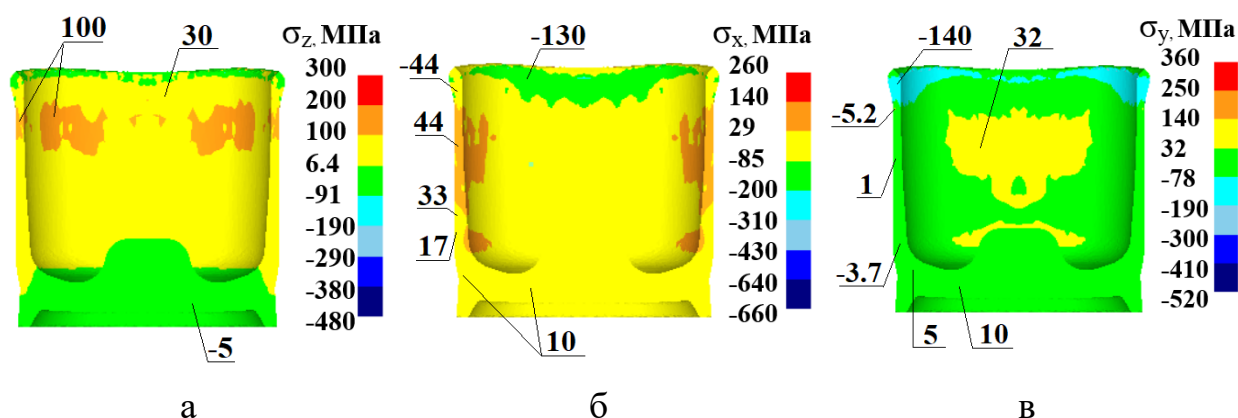


Рисунок 3.5. Розподіл напружень у напівфабрикаті після витягування з потоншенням через першу матрицю: а – напруження σ_z , б – напруження σ_x , в – напруження σ_y

Напруження σ_y у донній частині розтягувальні $\sigma_y = 5 \div 10$ МПа, на радіусному переході від придонної частини в стінку напівфабрикату стискаючі

$\sigma_y = -3,7$, в середній частині виробу у стінці розтягувальні $\sigma_y = 1 \div 32$ МПа, а ближче до верхнього торця стискаючі $\sigma_y = -5,2 \div -140$ МПа. По максимальним абсолютним величинам напружень σ_x і σ_y на контактуючих поверхнях призначають кількість бандажів для матриць. Призначаємо один бандаж для першої матриці згідно рекомендацій [190, ст. 210].

На рис. 3.6 наведено розподіл напружень у виробі після витягування з потоншенням через другу матрицю. Встановлено, що при переміщенні пуансона 150 мм діє найбільше зусилля процесу витягування з потоншенням через другу матрицю, а отже і значення напружень, що виникають на контактуючій поверхні матриці з виробом показані саме при найбільшому зусиллі.

Максимальне значення напруження $\sigma_z = 140$ МПа – розтягувальне напруження (рис.3.6а).

Напруження σ_x та σ_y працюють на стиск та сягають значень $\sigma_x = -180$ МПа (рис. 3.6б) та $\sigma_y = -150$ МПа (рис. 3.6в). Призначаємо один бандаж для другої матриці згідно рекомендацій [190, ст. 210].

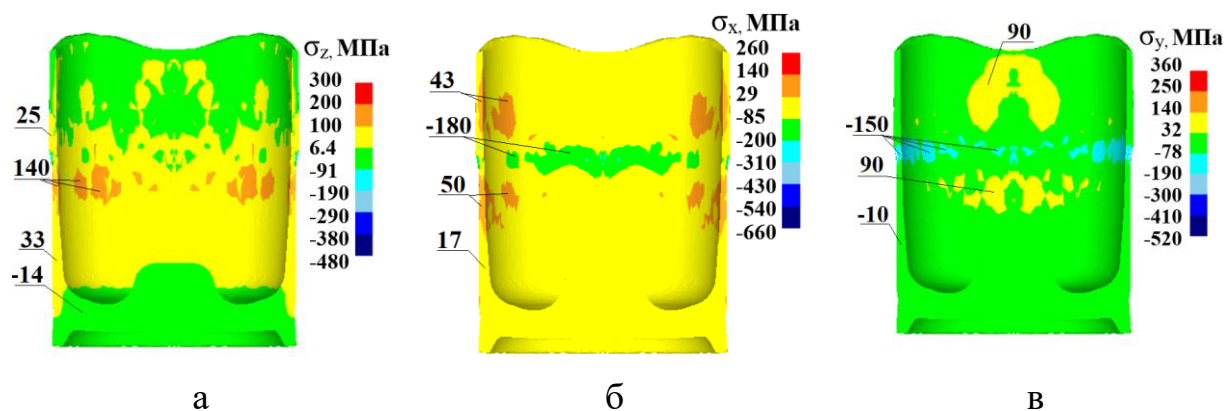


Рисунок 3.6. Розподіл напружень у виробі при переміщенні пуансона 150 мм витягування з потоншенням через другу матрицю: а – напруження σ_z , б – напруження σ_x , в – напруження σ_y

На рис. 3.7 наведено розподіл інтенсивності напружень σ_i в кінці витягування через першу матрицю та при переміщенні пуансона 150 мм - витягування через другу матрицю.

Розподіл інтенсивності напружень наприкінці витягування з потоншенням у донній частині $\sigma_i = 16$ МПа, по мірі переходу від радіусної частини напівфабрикату у стінку значення $\sigma_i = 40$ МПа, по мірі збільшення висоти напівфабрикату напруження збільшуються з $\sigma_i = 75$ МПа – середина висоти напівфабрикату до $\sigma_i = 150$ МПа – зона верхнього торця (рис. 3.7а).

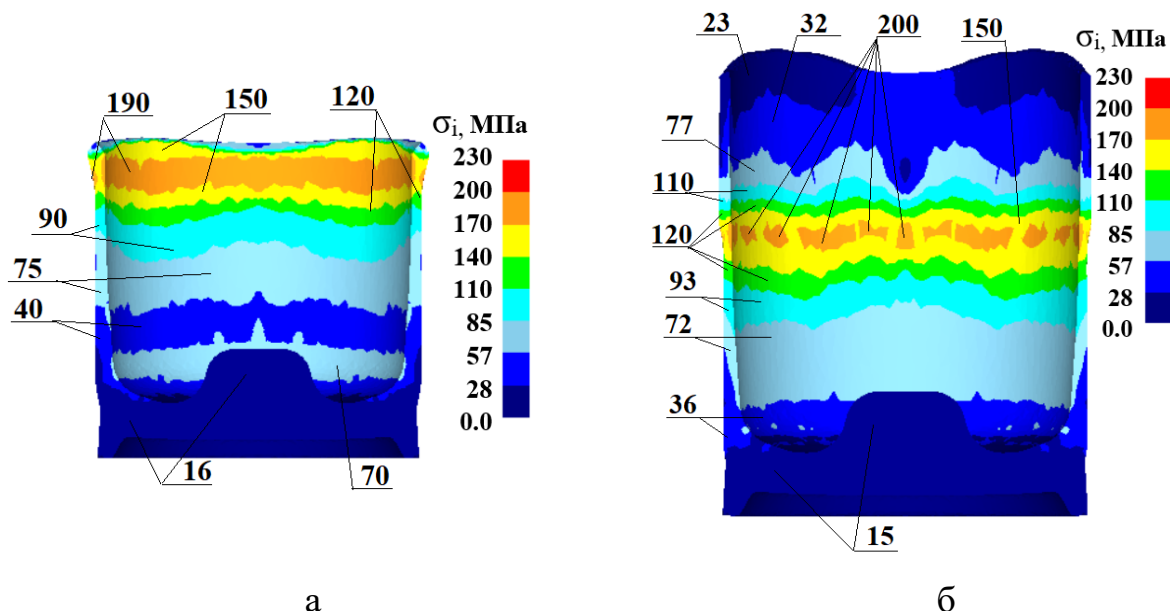


Рисунок 3.7. Розподіл інтенсивності напружень σ_i : а – наприкінці витягування з потоншенням через першу матрицю, б - – при переміщенні пуансона 150 мм

Значення інтенсивності напружень при найбільшому зусиллі витягування з потоншенням через другу матрицю дещо більші порівняно з витягуванням через першу матрицю, оскільки розрахунковий коефіцієнт потоншення нижчий на 0.19, а відповідно ступінь деформації вищий. В донній частині $\sigma_i = 15$ МПа, в зоні радіусного переходу дна в стінку $\sigma_i = 36$ МПа, з подальшим збільшенням до $\sigma_i = 150 \div 200$ МПа – зона контакту напівфабрикату з матрицею при найбільшому зусиллі витягування через другу матрицю, далі з поступовим зменшенням від $\sigma_i = 110$ до $\sigma_i = 23$ МПа в сторону верхнього торця напівфабрикату.

3.2.6 Деформований стан порожнистого виробу zdeформованого через дві послідовно розташовані матриці

Деформований стан виробу було визначено в кінці процесу витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці. На рис. 3.8

зображено розподіл осьових деформацій ε_z у виробі наприкінці процесу витягування з потоншенням.

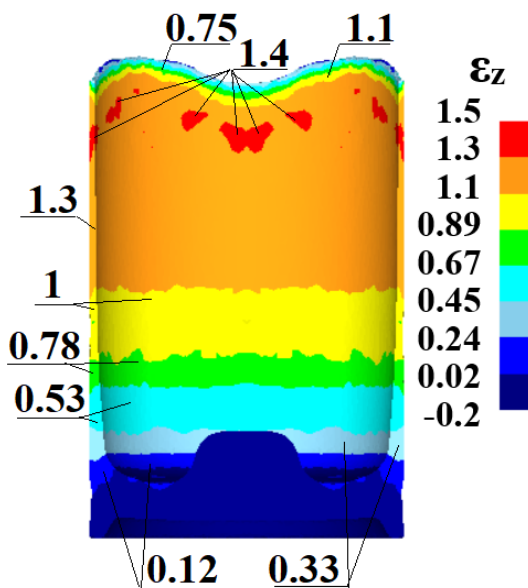


Рисунок 3.8. Розподіл осьових деформацій у виробі після витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці

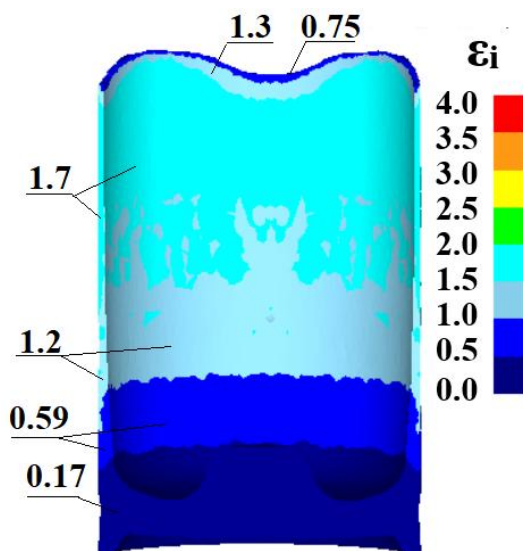


Рисунок 3.9. Розподіл інтенсивності деформацій у виробі після витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці

Найменші значення ε_z знаходяться в донній частині $\varepsilon_z = 0.12$. В зоні радіусного переходу донної частини виробу у стінку значення $\varepsilon_z = 0.33$ і далі до середини висоти виробу ε_z зростає до величини $\varepsilon_z = 1$. Від середини виробу в сторону верхнього торця $\varepsilon_z = 1.3$. В певних місцях у зоні верхнього торця $\varepsilon_z = 1.4$, а наприкінці торця $\varepsilon_z = 0.75 \div 1.1$. Варто зазначити, що весь об'єм виробу має додатні значення ε_z , а це означає, що ε_z розтягувальні.

На рис. 3.9 наведено розподіл інтенсивності деформацій ε_i у виробі наприкінці процесу витягування з потоншенням. У донній частині виробу $\varepsilon_i = 0.17$, від зони радіусного переходу у стінку виробу до середини висоти виробу $\varepsilon_i = 0.59 \div 1.2$. Від середини висоти виробу до верхнього торця основний об'єм матеріалу виробу має $\varepsilon_i = 1.7$ і лише незначна частина має $\varepsilon_i = 0.75 \div 1.3$ на верхньому торці виробу.

На рис. 3.10 відображено форму та розміри отриманого виробу після

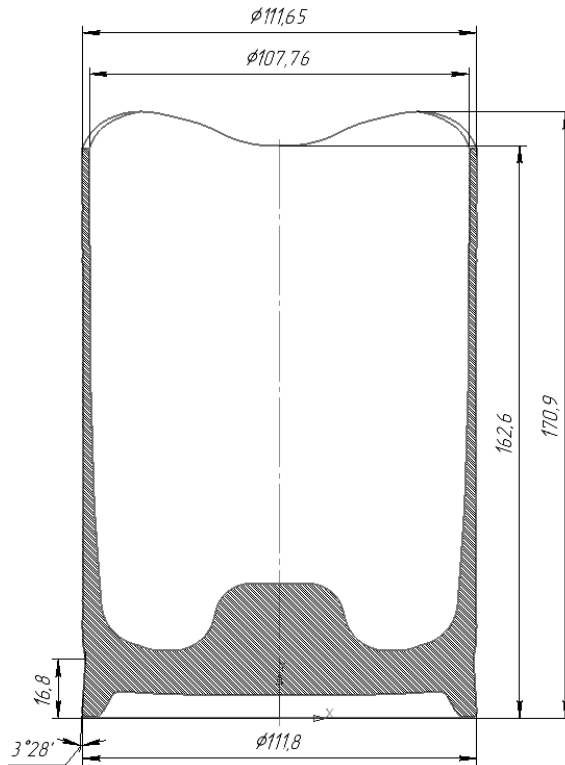


Рисунок 3.10. Форма та розміри отриманого виробу

витягування через дві послідовно розташовані матриці.

В результаті проведених розрахунків МСЕ було виявлено, що нижній торець виробу після витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці роздає (вплив значного розтягувального зусилля), тобто збільшується діаметр нижнього торця виробу, що унеможливорює виконати наступний перехід холодного витягування з потоншенням через одну матрицю, оскільки неможливо

чітко встановити отриманий виріб його конусною частиною на відповідній конусній частині матриці.

3.3 Вирівнювання донної частини отриманого виробу після операції витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці

3.3.1 Розрахункова схема процесу калібрування донної частини напівфабрикату

На рис. 3.11 відображено розрахункову схему процесу калібрування нижнього виступу напівфабрикату. Заготовка 1 встановлюється на оправці 2. Процес калібрування відбувається за рахунок переміщення матриці 3 із зусиллям P та швидкістю V до низу внаслідок чого вирівнюється виступ у донній частині напівфабрикату для подальшої операції витягування з потоншенням.

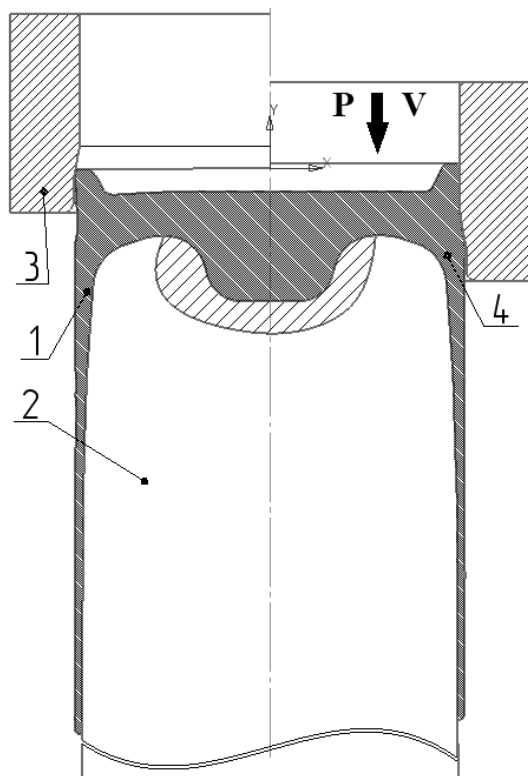


Рисунок 3.11. Розрахункова схема процесу вирівнювання нижнього виступу напівфабрикату

3.3.2 Силкові режими процесу вирівнювання донної частини напівфабрикату

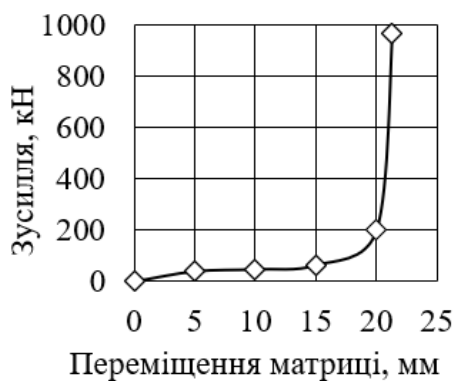


Рис. 3.12. Залежність зусилля вирівнювання від переміщення матриці

Для проведення розрахунку МСЕ було задано наступні дані: фактор тертя на контактуючих поверхнях враховано по Зібелю $\mu=0,3$, швидкість переміщення матриці 40 мм/с, температура така ж як у виробу, що отримано гарячим витягуванням з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці (рис. 3.4).

На рис. 3.12 відображено залежність зусилля вирівнювання від переміщення матриці. Аналізуючи приведені дані видно, що до переміщення матриці 20 мм зусилля вирівнювання зростає поступово та сягає 200 кН, при подальшому переміщенні матриці до 21,3 мм зусилля вирівнювання різко зростає та сягає 964 кН.

3.3.3 Напружений стан та питомі зусилля процесу вирівнювання нижнього виступу напівфабрикату

На рис. 3.13 відображено розподіл напружень напівфабрикату в кінці процесу вирівнювання донної частини.

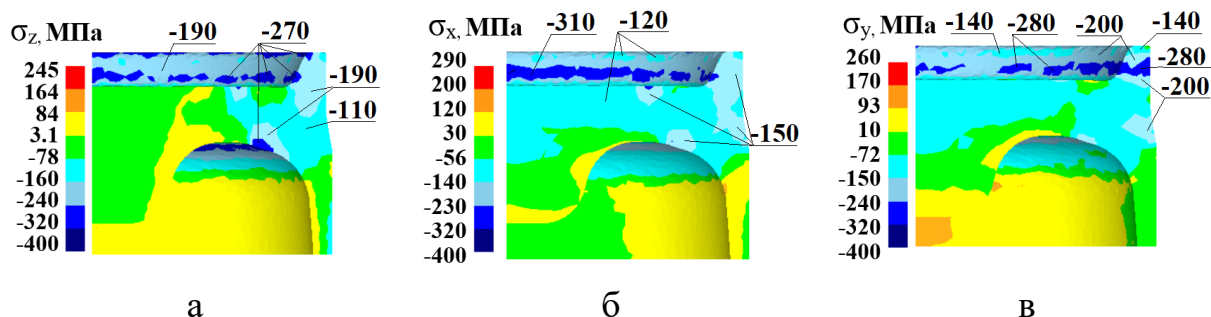


Рисунок 3.13. Розподіл напружень напівфабрикату в кінці процесу вирівнювання донної частини: а – напруження σ_z , б – напруження σ_x , в – напруження σ_y

Напруження σ_z від’ємні отже виникають осьові напруження стиску. Найбільша величина $\sigma_z = -270$ МПа у виділеній зоні контакту оправки з напівфабрикатом (рис. 3.13а) та в зоні внутрішнього радіусного переходу від дна до виступу.

Напруження σ_x в зоні контакту з матрицею стискаючі та за величиною $\sigma_x = -150$ МПа. В донній частині напівфабрикату та у виділених місцях $\sigma_x = -120$ МПа, а в зоні внутрішнього радіусного переходу від дна до виступу сягають найбільших за величиною значень - $\sigma_x = -310$ МПа (рис. 3.13б).

Напруження σ_y також стискаючі. В зоні контакту напівфабрикату з матрицею $\sigma_y = -200 \div -280$ МПа, також $\sigma_y = -280$ МПа в зоні радіусного переходу (рис. 3.13в) від дна до виступу напівфабрикату та в зоні контакту виступу з матрицею.

Питомі зусилля на поверхні оправки досягають 270 МПа, а на контактуючій поверхні матриці із напівфабрикатом 280 МПа.

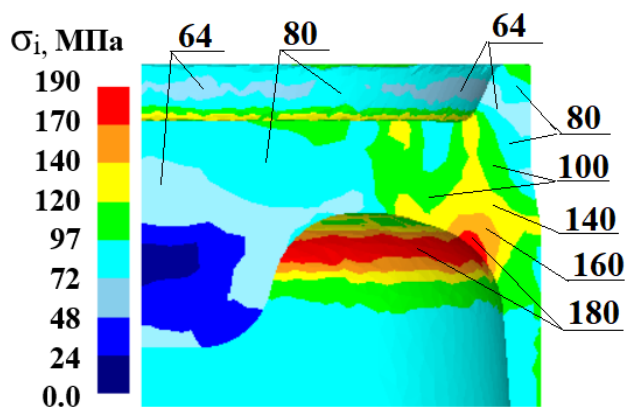


Рисунок 3.14. Розподіл інтенсивності
напружень σ_i

сягають $\sigma_i = 160 \div 180$ МПа.

3.3.4 Деформований стан напівфабрикату в кінці процесу вирівнювання нижнього виступу напівфабрикату

На рис. 3.15 відображено розподіл деформацій напівфабрикату після вирівнювання нижнього виступу.

За розподілом деформацій можна оцінити пропрацювання структури матеріалу пластичною деформацією.

В зоні контакту оправки з напівфабрикатом осьовий розподіл деформації $\varepsilon_z = -2.3$. В зоні донного виступу ε_z має знаковзмінний характер від $\varepsilon_z = -0.2$ до $\varepsilon_z = 0.7$. У стінці напівфабрикату значення $\varepsilon_z = 1.4$ накопичені після

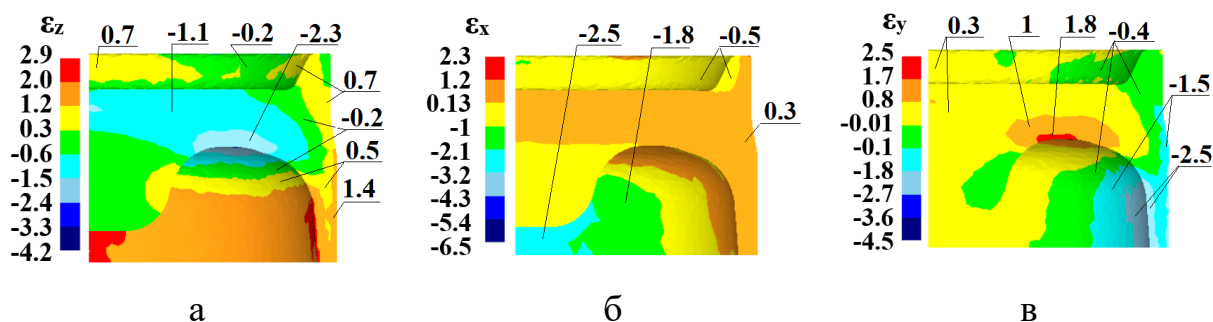


Рисунок 3.15. Розподіл деформацій напівфабрикату після вирівнювання нижнього виступу: а – деформації ε_z , б – деформації ε_x , в – деформації ε_y операції витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці, а в зоні контакту матриці з напівфабрикатом $\varepsilon_z = 0.5$ (рис. 3.15а).

Деформації $\varepsilon_x = -1.8$ та $\varepsilon_x = -2.5$ (рис. 3.15б) це накопичені деформації з попереднього переходу витягування з потоншенням, так само і деформації у вказаних місцях $\varepsilon_y = -1.5$ та $\varepsilon_y = -2.5$. В зоні контакту матриці з напівфабрикатом $\varepsilon_x = 0.3$, а в зоні радіусного переходу від донної частини у виступ $\varepsilon_x = -0.5$ (рис. 3.15б).

Деформації ε_y в зоні контакту оправки з напівфабрикатом сягають $\varepsilon_y = 1 \div 1.8$, а в зоні донного виступу мають знакозмінний характер $\varepsilon_y = 0.3$ та $\varepsilon_y = -0.4$ (рис. 3.15в).

На рис. 3.16 відображено розподіл інтенсивності деформацій.

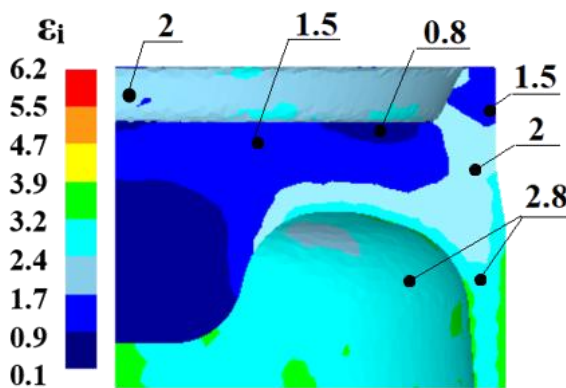


Рисунок 3.16. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i

накопичена інтенсивність деформацій внаслідок попередньої операції витягування з потоншенням.

В зоні донного виступу на внутрішній поверхні значення інтенсивності деформацій $\varepsilon_i = 2$. В донній частині переважний об'єм матеріалу має $\varepsilon_i = 1.5$. На контактуючій поверхні матриці з напівфабрикатом в зоні виступу $\varepsilon_i = 1.5$, а в зоні радіусного переходу у стінку $\varepsilon_i = 2$. Значення $\varepsilon_i = 2.8$ це

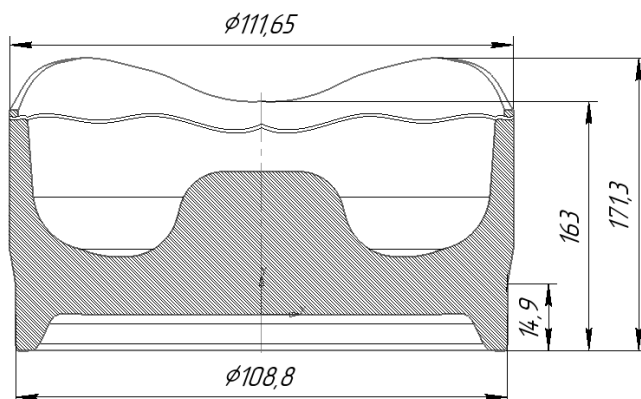


Рисунок 3.17. Форма та розміри напівфабрикату після операції вирівнювання донного виступу

На рис. 3.17 відображено форму та розміри напівфабрикату після операції вирівнювання донного виступу. Як видно вдалось досягнути вирівнювання донного виступу та діаметр 108,8 мм цілком задовольняє для наступного переходу витягування з потоншенням через

одну матрицю, що має діаметр ведучого пояса 109 мм.

3.4 Холодне витягування з потоншенням порожнистого вісесиметричного виробу через одну матрицю

3.4.1 Розрахункова схема процесу холодного витягування з потоншенням через третю матрицю

Варто зазначити, що після операції калібрування донної частини було імітовано відпал напівфабрикату по висоті стінки (це можна зробити заново згенерувавши сітку напівфабрикату, який отримано після операції вирівнювання донного виступу), а також виконано підрізання верхнього торцю напівфабрикату. Внаслідок чого після відпалу було знято залишкові напруження у стінці виробу, а після підрізання верхнього торцю заготовка набула вісесиметричної форми. Тому подальші розрахунки проводимо в циліндричній системі координат з використанням програми DEFORM 2D.

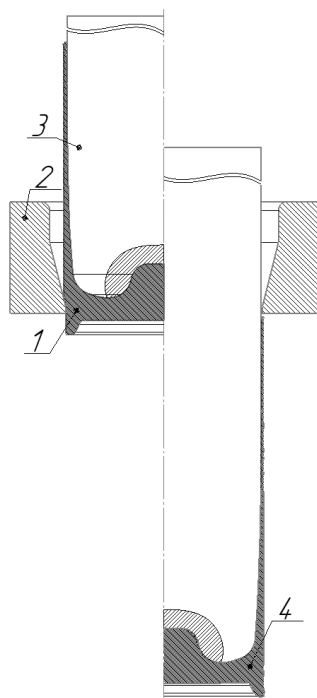


Рисунок 3.18. Розрахункова схема процесу холодного витягування з потоншенням через третю матрицю: 1- заготовка; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 - виріб

Розрахункову схему процесу холодного витягування з потоншенням через одну матрицю наведено на рис. 3.18. Зліва від вісі симетрії відображено вихідне положення, справа – кінцеве. Заготовка 1 встановлюється в робочий отвір матриці 2 спираючись своєю конусною частиною на відповідну конусну частину матриці 2. Процес витягування з потоншенням відбувається за рахунок переміщення до низу пуансона 3 протягуючи заготовку 1 через ведучий поясок матриці 2 з

діаметром 109 мм потоншуючи стінку заготовки 1 внаслідок чого утворюється виріб 4. Процес знімання виробу 4 з пуансона 3 здійснюється знімачем при зворотному ході пуансона 3.

3.4.2 Зусилля та питомі зусилля процесу витягування з потоншенням через одну матрицю

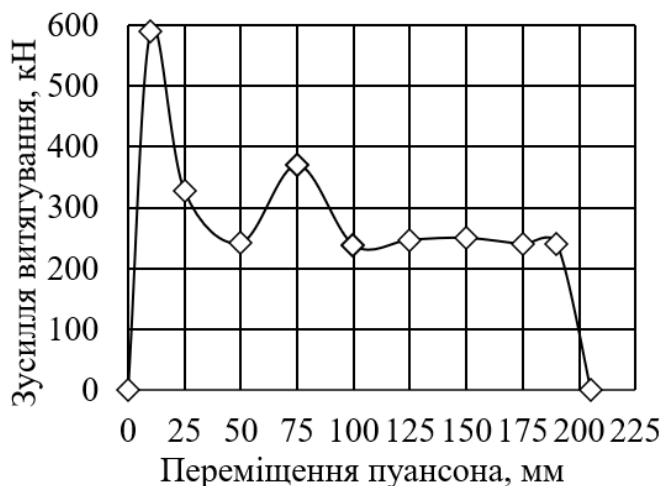


Рисунок 3.19. Графік залежності зусилля витягування з потоншенням через одну матрицю від переміщення пуансона

На рис. 3.19 відображено залежність зусилля витягування з потоншенням через одну матрицю від переміщення пуансона. Розглядаючи дані на рис. 3.19 можна спостерігати різкий ріст зусилля витягування на самому початку процесу витягування з потоншенням 590 кН до переміщення пуансона 17 мм.

Це пояснюється тим, що в силу геометрії товщина стінки заготовки в придонній частині значно більша ніж на верхньому торці заготовки і відповідно ступінь деформації більший, а отже і зусилля деформування необхідно вище. До переміщення пуансона 50 мм зусилля витягування зменшується до 242 кН, а при переміщенні пуансона 75 мм знову різке підвищення зусилля до 370 кН, оскільки відбувається накопичення металу в силу змінної товщини стінки. При переміщенні пуансона 100 мм зусилля процесу витягування з потоншенням устатковується і складає 250 кН до переміщення пуансона 190 мм, після чого відбувається різке зменшення зусилля і при переміщенні пуансона 205 мм сягає нульових значень.

Питомі зусилля при витягуванні з потоншенням можна визначити за величиною нормальних напружень у місці контакту напівфабрикату з деформуючим інструментом при максимальному зусиллі деформування.

На рис. 3.20 відображено розподіл нормальних напружень на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі деформування. Розміри по осях наведено в міліметрах.

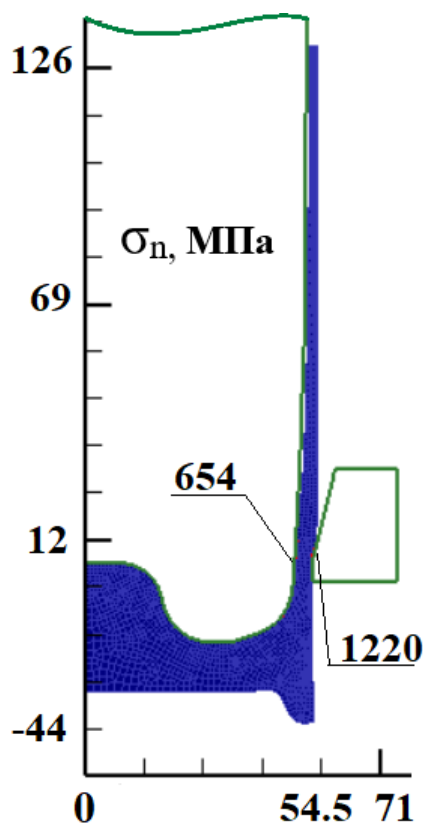


Рисунок 3.20. Розподіл нормальних напружень

Розглядаючи приведені дані на рис. 3.20 можна побачити, що при максимальному зусиллі витягування з потоншенням на пуансоні у вказаному місці виникають нормальні напруження з величиною $\sigma_n = 654$ МПа, а на матриці на радіусному переході від калібруючого пояса в конусну частину $\sigma_n = 1220$ МПа. Відповідно при конструюванні штампового оснащення необхідно буде використовувати однобандажну матрицю.

3.4.3 Напружено-деформований стан виробу

На рис. 3.21 відображено розподіл напружень напівфабрикату при максимальному зусиллі деформування.

В основному осьові напруження σ_z мають додатні значення тобто працюють на розтяг. В зоні близькій до контакту напівфабрикату із матрицею значення $\sigma_z = 364 \div 565$ МПа, а після протягування через калібруючий пояс $\sigma_z = 300$ МПа. Зі сторони контакту напівфабрикату із пуансоном у виділеній зоні стискаючі $\sigma_z = -125 \div -630$ МПа, а в зоні контакту навпроти калібруючого пояса матриці вже діють розтягуювальні $\sigma_z = 500$ МПа (рис. 3.21a).

Радіальні напруження σ_r працюють на стиск оскільки при процесі витягування з потоншенням відбувається зменшення діаметру заготовки, що супроводжується стискаючими $\sigma_r = -950$ МПа в зоні контакту напівфабрикату

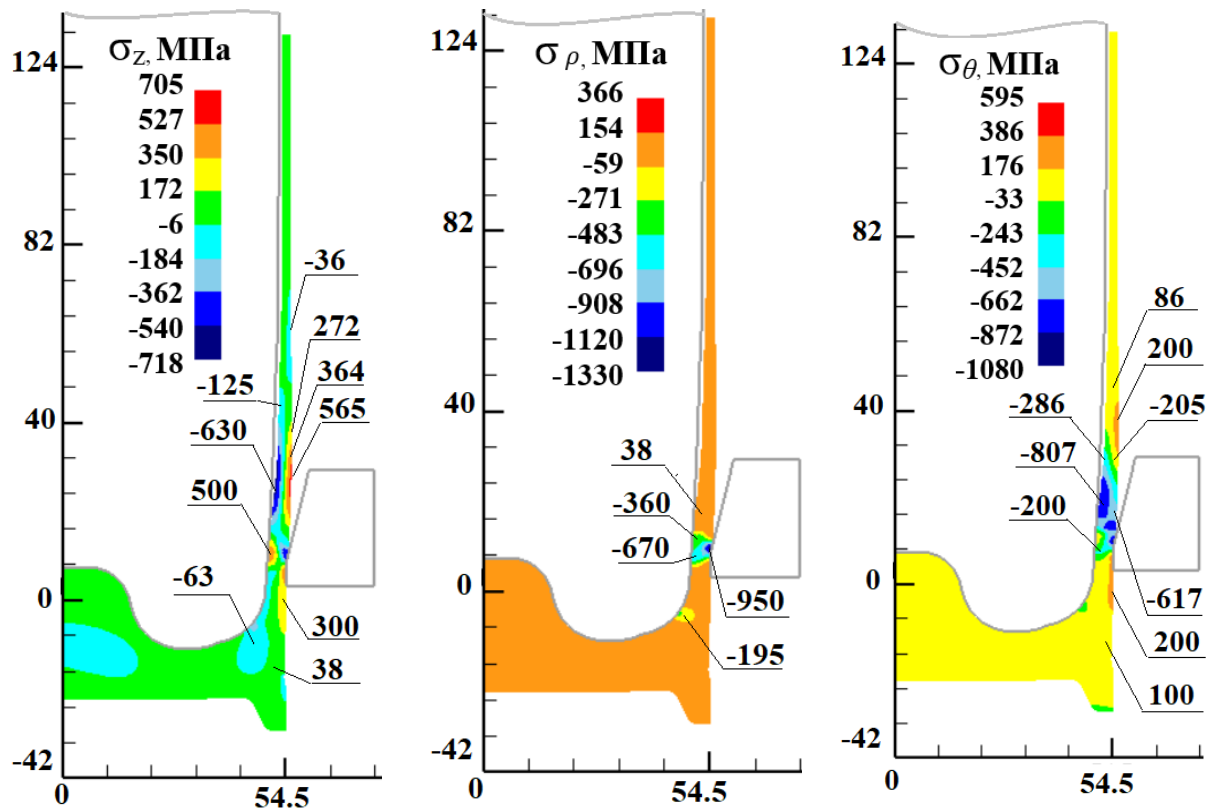


Рисунок 3.21. Розподіл напружень напівфабрикату при максимальному зусиллі деформування а – напруження σ_z , б – напруження σ_ρ , в – напруження σ_θ

з матрицею та $\sigma_\rho = -670$ МПа в зоні контакту напівфабрикату з пуансоном (рис. 3.21б).

На рис. 3.21в відображено окружний розподіл напружень σ_θ при. До контакту матеріалу напівфабрикату із матрицею у вказаному місці розтягувальні $\sigma_\theta = 86 \div 200$ МПа, в зоні контакту матеріалу напівфабрикату із матрицею та пуансоном напруження стають стискаючими $\sigma_\theta = -617$ МПа та $\sigma_\theta = -807$ відповідно, а після протягування напівфабрикату через калібруючий поясок матриці $\sigma_\theta = 100 \div 200$ МПа, тобто працюють на розтяг.

На рис. 3.22 наведено розподіл інтенсивності напружень σ_i . В зоні контакту матеріалу напівфабрикату із пуансоном та матрицею спостерігається найбільше значення $\sigma_i = 700 \div 810$ МПа. В зоні де матеріал напівфабрикату ще не контактує із матрицею $\sigma_i = 183 \div 600$ МПа.

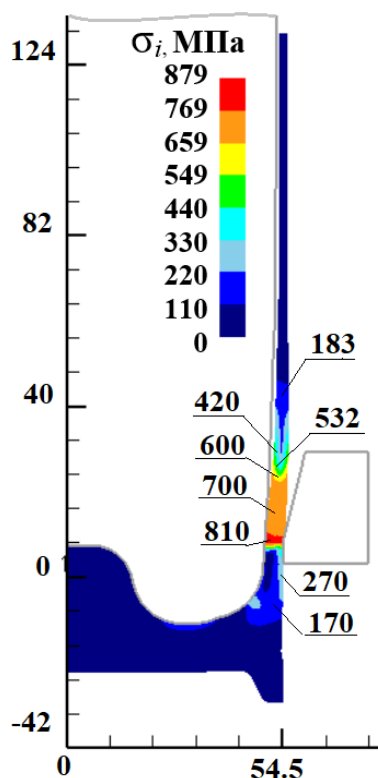


Рисунок 3.22. Розподіл інтенсивності напружень

Після протягування матеріалу напівфабрикату через ведучий поясок матриці значення σ_i знижуються до величин $\sigma_i = 170 \div 270$ МПа.

На рис. 3.23 відображено деформований стан виробу дані наведено після повного протягування матеріалу напівфабрикату через калібруючий поясок матриці.

Розподіл осьових деформацій ε_z відображено на рис. 3.23а. В донній частині виробу на радіусному переході дна в стінку $\varepsilon_z = 0.08$ та поступово збільшується до середини висоти виробу до величини $\varepsilon_z = 0.45$. Від середини висоти

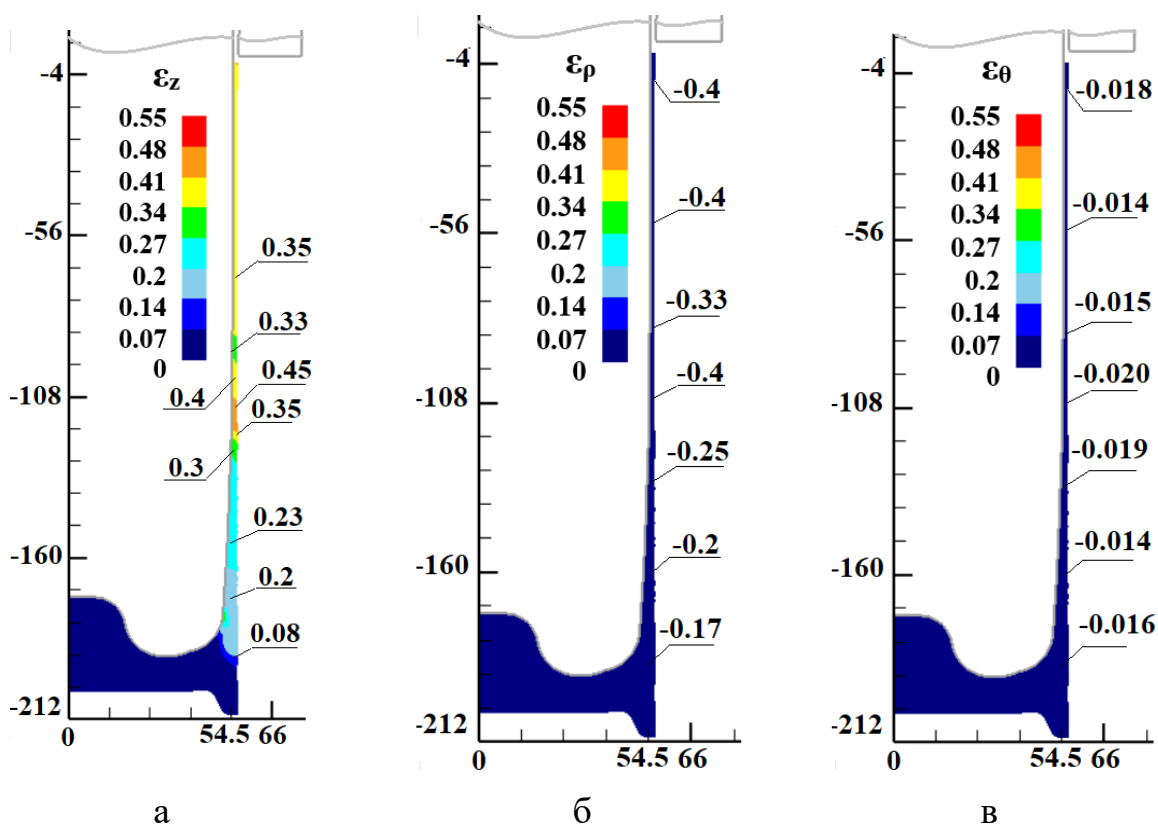


Рисунок 3.23. Розподіл деформацій виробу: а – деформації ε_z , б – деформації ε_r , в – деформації ε_θ

виробу до верхнього торцю $\varepsilon_z = 0.33 \div 0.35$.

На радісному переході донної частини в стінку радіальні деформації ε_r найменші за величиною $\varepsilon_r = -0.17$. Від радіусного переходу до середини висоти виробу у стінці $\varepsilon_r = -0.2 \div -0.4$ і від середини висоти виробу до верхнього торцю $\varepsilon_r = -0.4$ (рис 3.23б).

Тангенціальний розподіл деформацій сягає майже нульових значень. По всій висоті виробу ε_θ знаходиться в межах $\varepsilon_\theta = -0.014 \div -0.020$ (рис. 3.23в).

На рис. 3.24 відображено розподіл інтенсивності деформацій отриманого виробу.

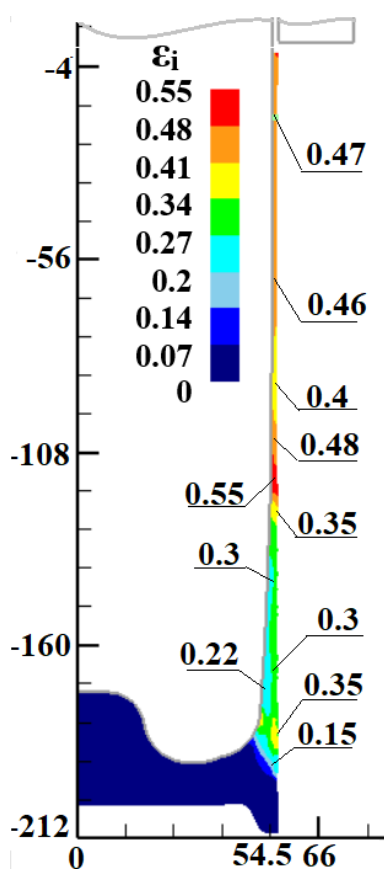


Рисунок 3.24. Розподіл інтенсивності деформацій

Пропрацювання структури матеріалу спостерігається в зоні по середині висоти отриманого виробу $\varepsilon_i = 0.55$. Дещо менша за величиною $\varepsilon_i = 0.48 \div 0.4$ в зоні стінки від середини висоти виробу до верхнього торцю.

Найменше пропрацювання пластичною деформацією виробу у зоні радіусного переходу донної частини у стінку $\varepsilon_i = 0.15$ з подальшим збільшенням до середини стінки $\varepsilon_i = 0.22 \div 0.35$.

Проаналізовано запас пластичності матеріалу після витягування через третю матрицю. На рис. 3.25 відображено розподіл критерію руйнування C_p по висоті стінки отриманого виробу.

Розглядаючи рис. 3.25 видно, що максимальне значення $C_p = 0.25$ в зоні радіусного переходу донної частини в стінку в зоні контакту виробу з пуансоном. По висоті стінки максимальне значення $C_p = 0.16$. Тобто запас пластичності матеріалу виробу після холодного витягування через одну матрицю складає 75%.

На рис. 3.25 відображено форму та габаритні розміри отриманого виробу після витягування через одну матрицю.

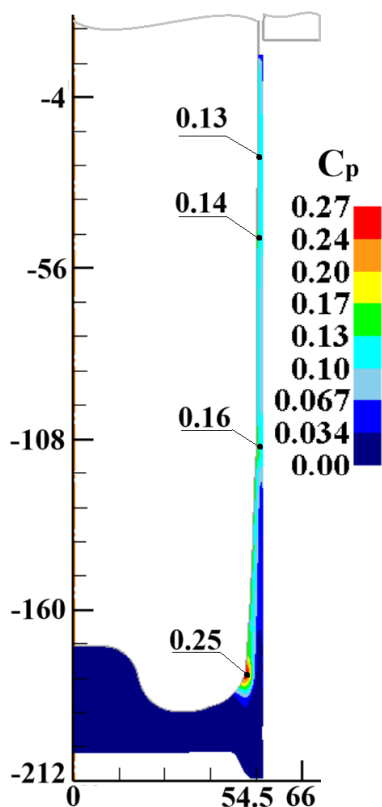


Рисунок 3.25. Коефіцієнт критерію руйнування C_p Normalized C&L після холодного витягування з потоншенням через одну матрицю

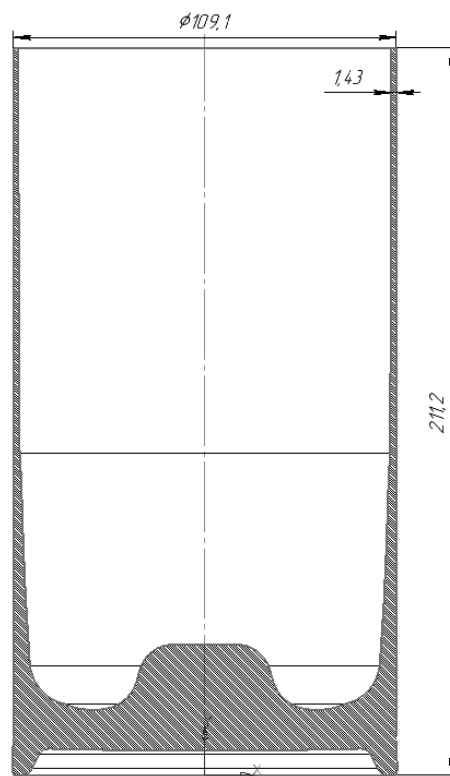


Рисунок 3.26. Форма та габаритні розміри виробу отриманого після холодного витягування через одну матрицю

3.5 Висновки

1 Проведено аналітичні розрахунки переходів процесу витягування з потоншенням порожнистого вісесиметричного виробу. Встановлено, що отримати заданий виріб можливо при протягуванні заготовки через три матриці (перший перехід – гаряче та напівгаряче витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці після чого необхідно здійснити відпал стінки напівфабрикату та другий перехід – холодне витягування з потоншенням через одну матрицю). Встановлено, що процес деформування стінки при витягуванні через першу матрицю відбувається в умовах неповної

холодної та неповна гаряча деформація, а витягування через другу матрицю в умовах неповної холодної деформації.

2 За допомогою МСЕ створені моделі та проведено розрахунковий аналіз процесу гарячого та напівгарячого витягування з потоншенням порожнистого виробу через дві послідовно розташовані матриці. Встановлено силові режими процесу, питомі зусилля на робочому інструменті, напружений та деформований стан, максимальне значення критерію руйнування. Відображено форму та розміри отриманого напівфабрикату. Максимальне зусилля витягування через дві послідовно розташовані матриці – 287,2 кН. Критерій руйнування досяг значень 0,77 в стінці гільзи.

3 Введено додаткову операцію калібрування донної частини, оскільки встановлено, що після операції витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці нижній торець напівфабрикату роздає внаслідок чого не можливо виконувати наступний перехід витягування з потоншенням. Встановлено зусилля деформування, питомі зусилля на робочому інструменті, напружений та деформований стан. Відображено форму та розміри отриманого напівфабрикату. Зусилля калібрування 964 кН, питомі зусилля на поверхні оправки досягають 270 МПа, а на контактуючій поверхні матриці із напівфабрикатом 280 МПа.

4 За допомогою МСЕ створено модель та проведено розрахунковий аналіз процесу холодного витягування з потоншенням через одну матрицю. Встановлено зусилля процесу, питомі зусилля на робочому інструменті, напружений та деформований стан. Проаналізовано критерій руйнування. Відображено форму та розміри отриманого напівфабрикату. Максимальне зусилля витягування 590 кН. Максимальні питомі зусилля на пуансоні 654 МПа, а на матриці 1220 МПа. Найбільше значення інтенсивності деформацій в стінці виробу 0.55. Максимальне значення критерію руйнування 0.25 на переході стінки у донну частину виробу.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ОБТИСКУ І ОСАДЖУВАННЯ

4.1 Схема процесу обтиску і осаджування порожнистого напівфабрикату

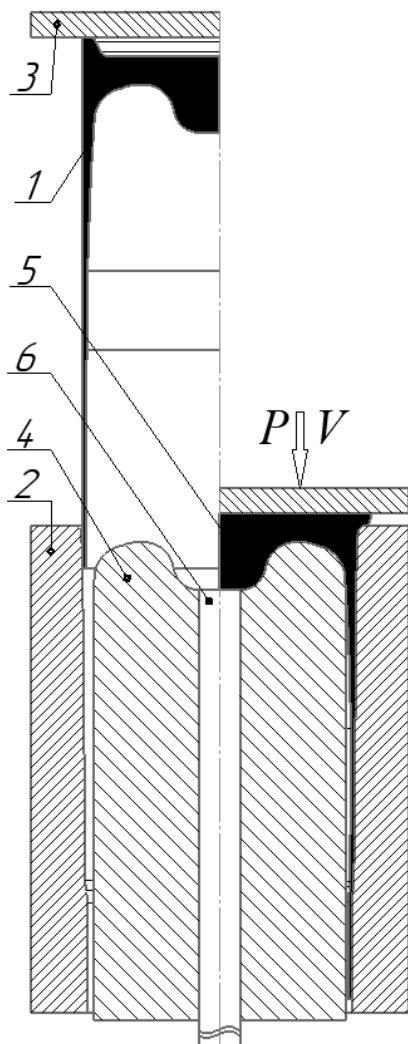


Рисунок 4.1. Схема процесу обтиску і осаджування порожнистого напівфабрикату: 1 – заготовка; 2 – матриця; 3 – плита; 4 – оправка; 5 – напівфабрикат; 6 – виштовхувач

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему обтиску і осаджування порожнистого напівфабрикату, яку відображено на рис. 4.1. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу обтиску і осаджування, а праворуч – в кінці вказаного процесу. Заготовка 1 встановлюється в матриці 2. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні плити 3 на задану відстань зі швидкістю V . Процес обтиску відбувається до контакту внутрішньої порожнини нижнього торцю заготовки 1 з оправкою 4, далі починається процес осаджування нижнього торцю заготовки, внаслідок чого утворюється напівфабрикат 5. Після піднімання плити 3 за допомогою виштовхувача 6 відбувається вилучення напівфабрикату 5 із матриці 2.

Вихідною заготовкою є напівфабрикат, що отримано після холодного витягування через одну матрицю (рис. 3.26).

Моделювання за допомогою МСЕ процесу обтиску і осаджування було

проведено в програмі DEFORM 2D. Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: швидкість переміщення пуансона $V = 5$ мм/с, фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,12$. Перед процесом обтиску і осаджування було виконано

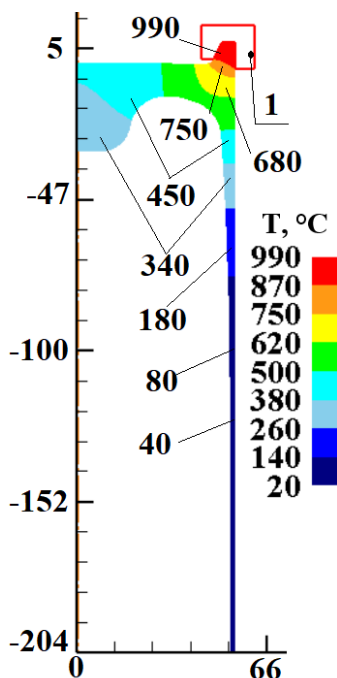


Рисунок 4.2. Схема нагріву нижнього виступу заготовки та розподіл температури в кінці нагріву

розігрів нижнього виступу заготовки. Для цього було спроектовано інструмент позиція 1 (рис. 4.2), що повторює форму нижнього виступу по зовнішньому контуру та задано температуру цьому інструменту $T = 1000^{\circ}\text{C}$. Було задано час необхідний для розігріву виступу. Розподіл температури заготовки перед операцією обтиск і осаджування відображено на рис. 4.2. Нижній виступ після нагріву має $T = 750 \div 990^{\circ}\text{C}$, донна частина має $T = 680 \div 750^{\circ}\text{C}$, виступ зі сторони порожнини $T = 450^{\circ}\text{C}$, а по висоті стінки температура змінюється від $T = 450^{\circ}\text{C}$ (зона радіусного переходу донної частини в стінку) до $T = 40^{\circ}\text{C}$ (середня частина стінки заготовки), далі

температура виробу поволі зменшується до кімнатної температури 20°C , яку було задано в програмі DEFORM 2D.

Розрахункові схеми процесу обтиску та осаджування відображено на рис. 4.3. Схема на початку обтиску та осаджування відображено на рис. 4.3а. Заготовка 1 встановлюється та центрується в циліндричній частині матриці 2. Процес обтиску та осаджування здійснюється плитою 3. Оправка 4 відіграє роль обмежувача руху заготовки вертикально вниз, тобто в момент дотику внутрішнього виступу заготовки до оправки 4 закінчується процес обтиску та починається процес осаджування. Внаслідок заданого переміщення вниз плити 3 утворюється напівфабрикат 6. Виштовхування напівфабрикату 6 здійснюється виштовхувачем 5.

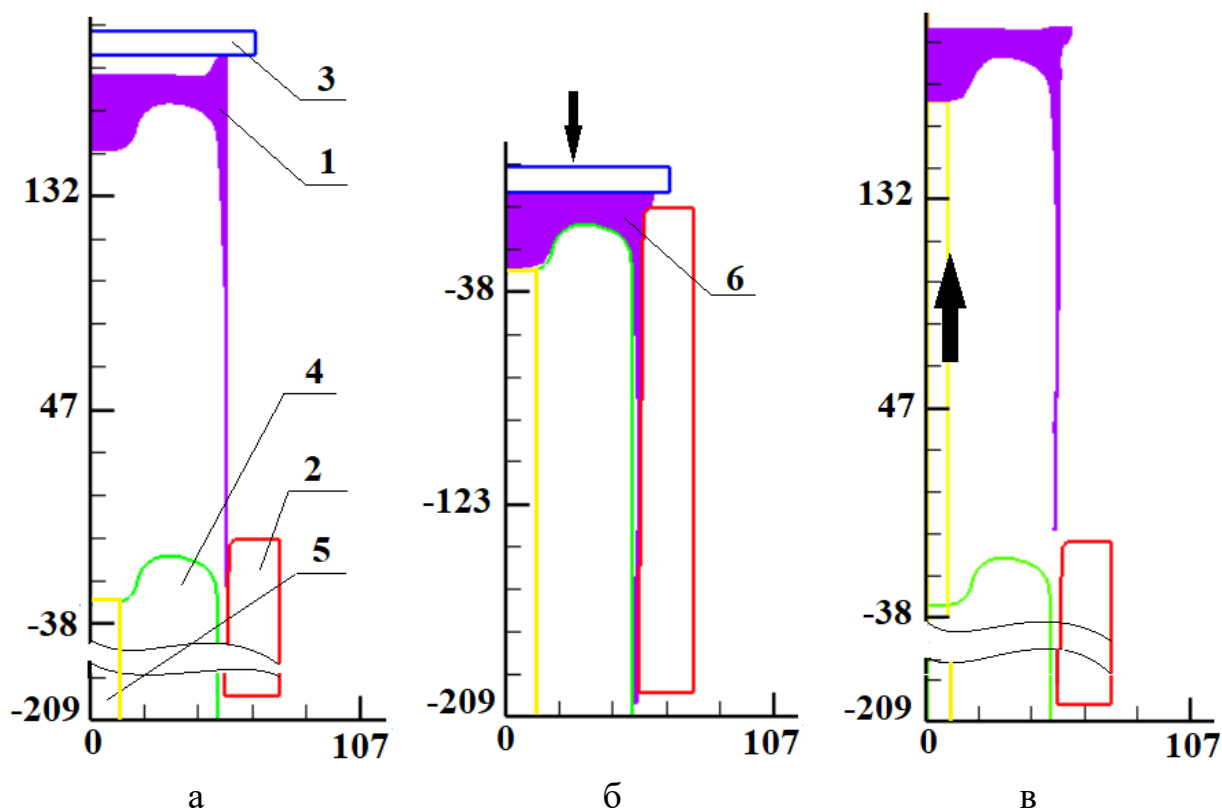


Рисунок 4.3. Розрахункові схеми процесу обтиску та осаджування: а – на початку; б – в кінці; в – після виштовхування напівфабрикату із матриці

4.2 Силкові режими та питомі зусилля процесу обтиску та осаджування



Рисунок 4.4. Залежність зусилля обтиску та осаджування від переміщення плити

Залежність зусилля обтиску та осаджування відображено на рис. 4.4. Розглядаючи рис. 4.4 можна побачити, що зусилля поступово збільшується до величини 440 кН при переміщенні плити 56 мм, після чого зусилля різко зменшується до 73,7 кН при переміщенні плити 65,2 мм.

Далі зусилля знову поступово зростає до 226 кН при переміщенні плити 179 мм. Після чого відбувається різке зростання зусилля до 2730 кН (процес

осаджування виступу) при переміщенні плити 186 мм (кінець процесу обтиску та осаджування).



Рисунок 4.5. Залежність зусилля виштовхування напівфабрикату від переміщення виштовхувача

Залежність зусилля виштовхування напівфабрикату від переміщення виштовхувача відображено на рис. 4.5. Зусилля виштовхування сягає максимальних значень 157 кН при переміщенні виштовхувача 1 мм, після чого поступово зменшується до 2,6 кН при переміщенні виштовхувача 34,3 мм. При подальшому переміщенні виштовхувача до

висоти, що забезпечить виймання сформованого напівфабрикату з робочої зони (210 мм), зусилля виштовхування сягає майже нульових значень (на рис. 4.5 не відображено).

На рис. 4.6 показано розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях напівфабрикату з інструментом. Для зручності аналізу значень нормальних напружень напівфабрикат було поділено на дві частини. В зоні контакту плити з напівфабрикатом максимальне значення $\sigma_n = 1830$ МПа (зона осаджування виступу) з подальшим зменшенням до $\sigma_n = 419$ МПа (рис. 4.6а). На оправці у місці придонної циліндричної частини максимальне значення $\sigma_n = 1380$ МПа, а в зоні контакту з дном напівфабрикату $\sigma_n = 703 \div 729$ МПа (рис. 4.6а). На контактуючій поверхні матриці із напівфабрикатом максимальне значення $\sigma_n = 2410$ МПа на радіусній поверхні матриці, на конусній частині матриці в зоні контакту з придонною частиною напівфабрикату $\sigma_n = 1110$ МПа, у зоні контакту стінки напівфабрикату із матрицею від 41 мм до 140 мм значення нормальних напружень лежать в межах $\sigma_n = 29 \div 323$ МПа (рис. 4.6а та 4.6б). На висоті 147 мм знаходиться радіусний перехід, де діаметр

напівфабрикату більш інтенсивно зменшується (формоутворення дульця гільзи), в цій зоні величина $\sigma_n = 525 \div 728$ МПа, нижче в зоні циліндричної частини матриці $\sigma_n = 142$ МПа.

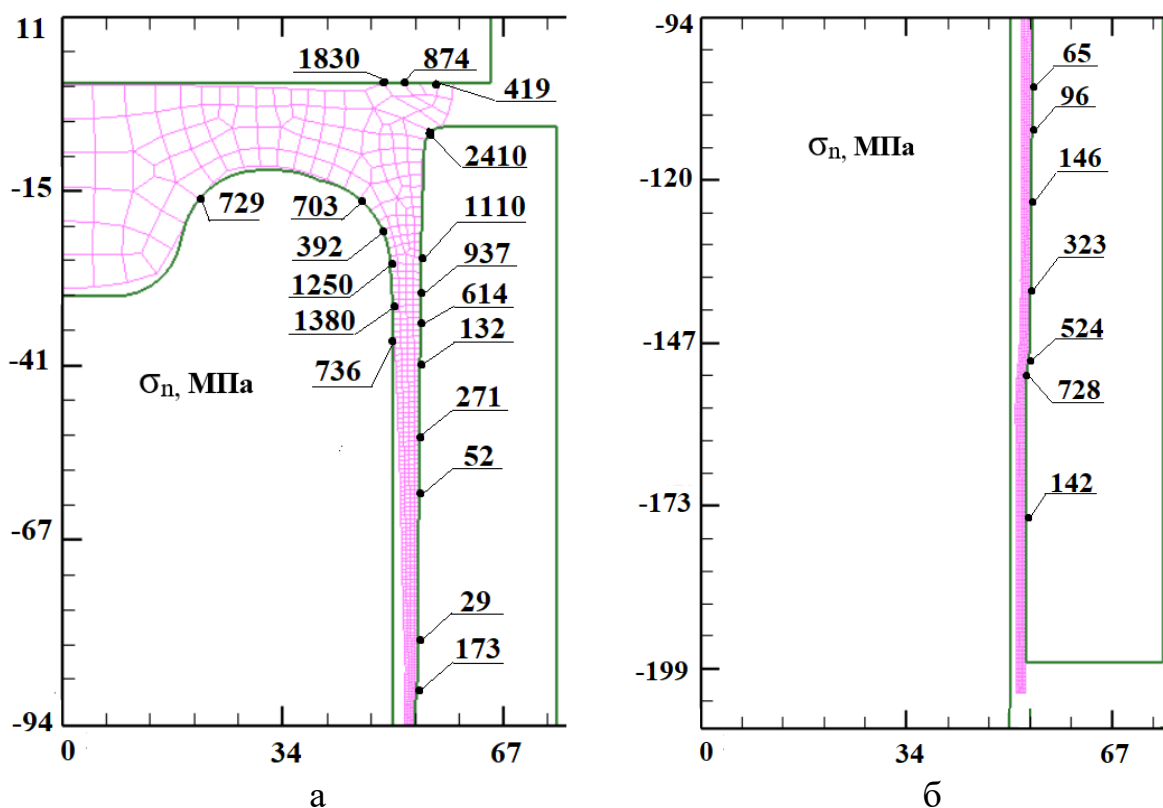


Рисунок 4.6. Розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях напівфабрикату з інструментом: а – нижня частина; б – верхня частина.

Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено зеленими лініями

За допомогою визначення величин нормальних напружень на контактуючій зоні напівфабрикату із інструментом можна назначити матеріал інструменту, що забезпечить його стійкість.

4.3 Напружено-деформований стан процесу обтиску та осаджування

Розподіл напружень в осьовому напрямку відображено на рис. 4.7. У донній частині напівфабрикату (рис. 4.7а) ближче до вісі симетрії $\sigma_z = 100$ МПа – діють напруження розтягу. В зоні донної частини з найменшою товщиною напівфабрикату – $\sigma_z = -200$ МПа, тобто діють стискаючі напруження, ближче до стінки в придонній частині стискаючі напруження збільшуються до величини $\sigma_z = -500$ МПа, в зоні контакту напівфабрикату з радіусною частиною

матриці напруження стиску найбільші за величиною $\sigma_z = -900$ МПа, в зоні переходу донної частини в стінку $\sigma_z = -600$ МПа, далі по висоті стінки напруження $\sigma_z = -100$ МПа – стискаючі до радіусного переходу (рис. 4.7б). В зоні першого радіусного переходу на контактній поверхні напівфабрикату із матрицею $\sigma_z = 600$ МПа – розтягуючі напруження, а на внутрішній поверхні напівфабрикату в цьому ж місці $\sigma_z = -800$ МПа – стискаючі напруження. В зоні другого радіусного переходу в зоні контакту напівфабрикату із матрицею $\sigma_z = -800$ МПа – стискаючі напруження, а на внутрішній поверхні напівфабрикату $\sigma_z = 1000$ МПа – розтягуючі напруження. У верхній циліндричній частині напівфабрикату зі сторони порожнини $\sigma_z = -1000$ МПа, а на контактній поверхні з матрицею $\sigma_z = 600 \div 900$ МПа. Верхній торець напівфабрикату, що вже не контактує з деформуючим інструментом має стискаючі напруження $\sigma_z = -200$ МПа.

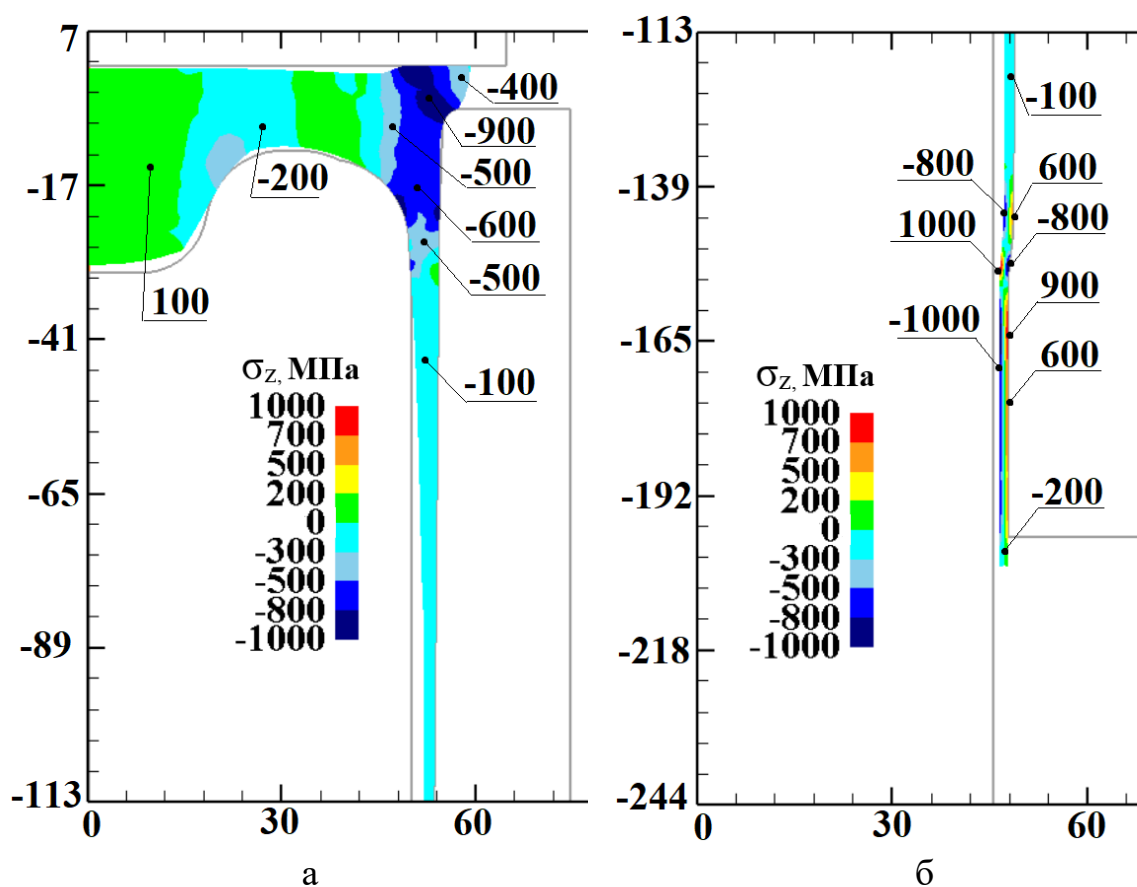


Рисунок 4.7. Розподіл осевих напружень у напівфабрикаті:

а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

На рис. 4.8 відображено розподіл радіальних напружень у напівфабрикаті. У певному місці донної частини напівфабрикату діють розтягуючі напруження $\sigma_r = 200 \div 420$ МПа (рис. 4.8а), по всьому іншому об'єму донної частини діють стискаючі напруження $\sigma_r = -20 \div -340$ МПа. В зоні контакту виступу напівфабрикату із матрицею $\sigma_r = -330 \div -480$ МПа – стискаючі напруження. Найбільші за величиною стискаючі напруження в радіальному напрямку виникають в придонній частині стінки напівфабрикату $\sigma_r = -1000$ МПа. По висоті стінки напівфабрикату діють порівняно незначні напруження $\sigma_r = -10 \div -15$ МПа. В зоні радіусного переходу з більшого на менший діаметр (рис. 4.8б) має місце незначне зростання стискаючих напружень $\sigma_r = -70$ МПа. По верхній циліндричній частині напівфабрикату діють незначні стискаючі напруження $\sigma_r = -10 \div -15$ МПа.

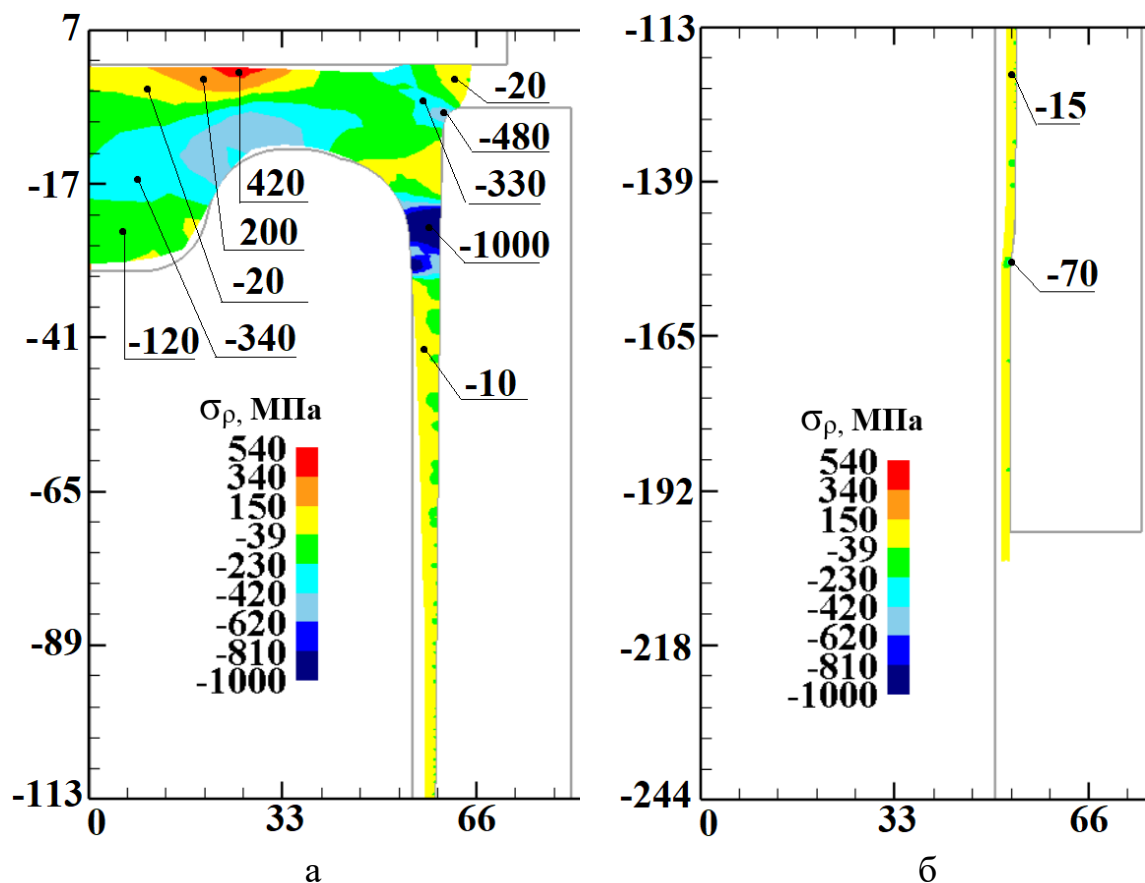


Рисунок 4.8. Розподіл радіальних напружень у напівфабрикаті:
а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

Розподіл тангенціальних напружень у напівфабрикаті відображено на рис. 4.9. Зона контакту напівфабрикату з плитою здебільшого має $\sigma_\theta=230$ МПа – розтягуючі напруження (рис. 4.9а). Середній шар напівфабрикату в донній частині має стискаючі напруження $\sigma_\theta=-80\div-310$ МПа. В донній частині ближче до матриці $\sigma_\theta=-500$ МПа – стискаючі напруження. Незначна зона формування виступу має додатні значення $\sigma_\theta=42\div250$ МПа – розтягуючі напруження. Основний об'єм стінки має стискаючі напруження $\sigma_\theta=-800\div-1000$ МПа. На першому радіусному переході в зоні контакту напівфабрикату із матрицею $\sigma_\theta=-540$ МПа, а на другому радіусному переході зі сторони порожнини $\sigma_\theta=-330$ МПа – стискаючі напруження (рис. 4.9б). У верхній циліндричній частині напівфабрикату в зоні контакту із матрицею $\sigma_\theta=350$ МПа – розтягуючі напруження, а зі сторони порожнини $\sigma_\theta=-250\div-460$ МПа – стискаючі. Верхня зона напівфабрикату $\sigma_\theta=800$ МПа.

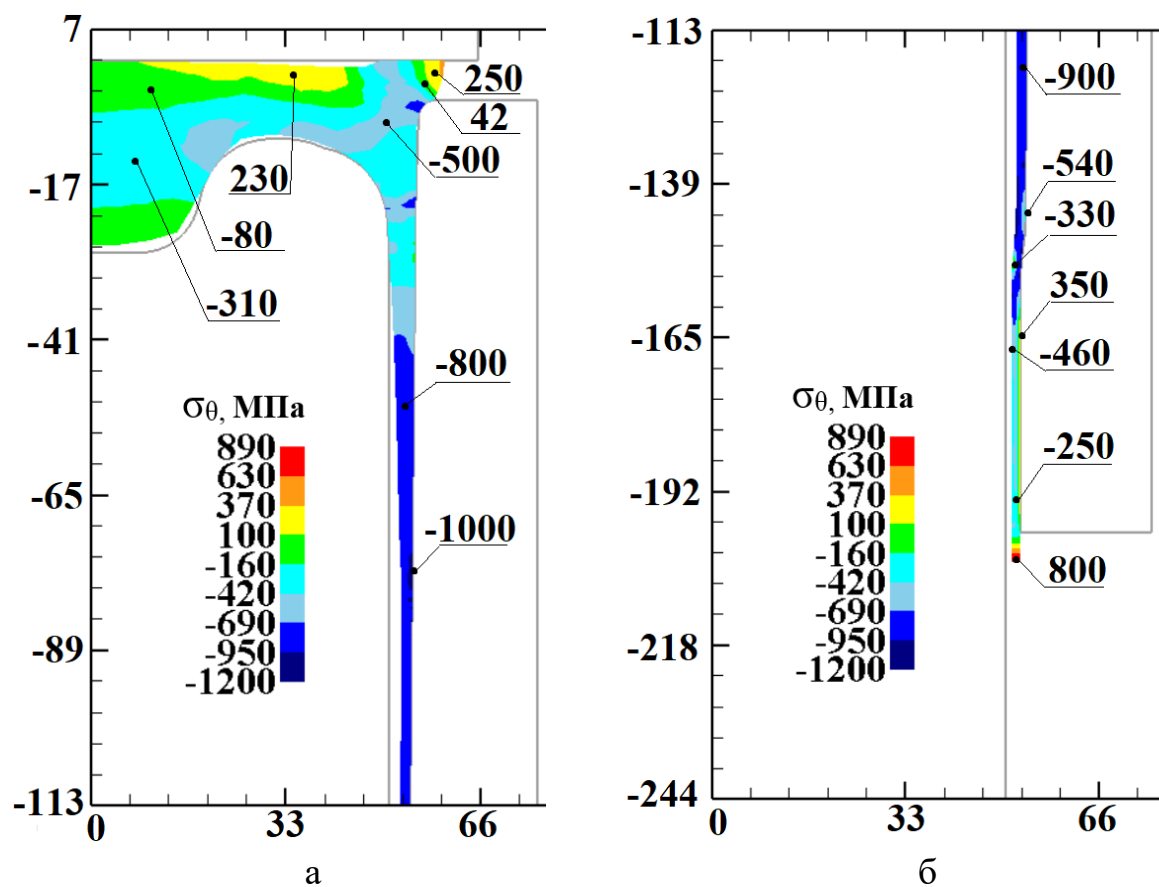


Рисунок 4.9. Розподіл тангенціальних напружень у напівфабрикаті:
а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в
міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

Розподіл інтенсивності напружень відображено на рис. 4.10. У донній частині напівфабрикату $\sigma_i=67\div430$ МПа, в зоні переходу донної частини в стінку $\sigma_i=450$ МПа, а в зоні формування виступу $\sigma_i=620$ МПа (рис. 4.10 а). Найбільші значення інтенсивності напружень знаходяться по висоті стінки напівфабрикату $\sigma_i=740\div870$ МПа. Нижче другого радіусного переходу значення інтенсивності напружень зменшуються від $\sigma_i=600$ МПа до $\sigma_i=210$ МПа (рис. 4.10б). Незначна зона верхнього торцю напівфабрикату має $\sigma_i=870$ МПа.

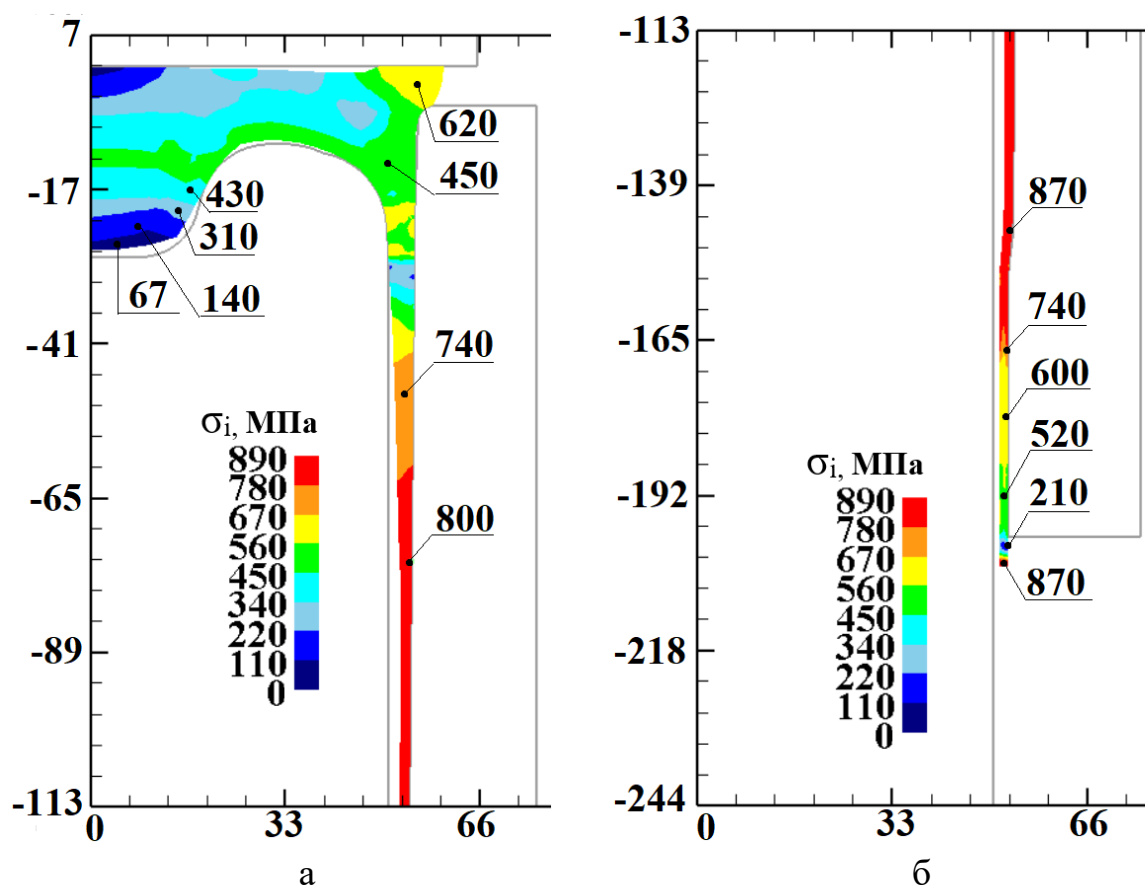


Рисунок 4.10. Розподіл інтенсивності напружень у напівфабрикаті:
а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в
міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

Розподіл деформацій в осьовому напрямку відображено на рис. 4.11. Загалом розподіл деформацій в осьовому напрямку мають додатні значення тобто деформації в осьовому напрямку розтягуючі. В донній частині напівфабрикату $\varepsilon_z=0.01$, в зоні радіусного переходу донної частини в стінку $\varepsilon_z=0.1$ (рис. 4.11а). Від радіусного переходу до середини висоту

напівфабрикату $\varepsilon_z = 0.18 \div 0.45$. Від середньої частини до першого радіусного переходу $\varepsilon_z = 0.35 \div 0.45$ (рис. 4.11б). Верхній торець напівфабрикату має значення $\varepsilon_z = 0.41$.

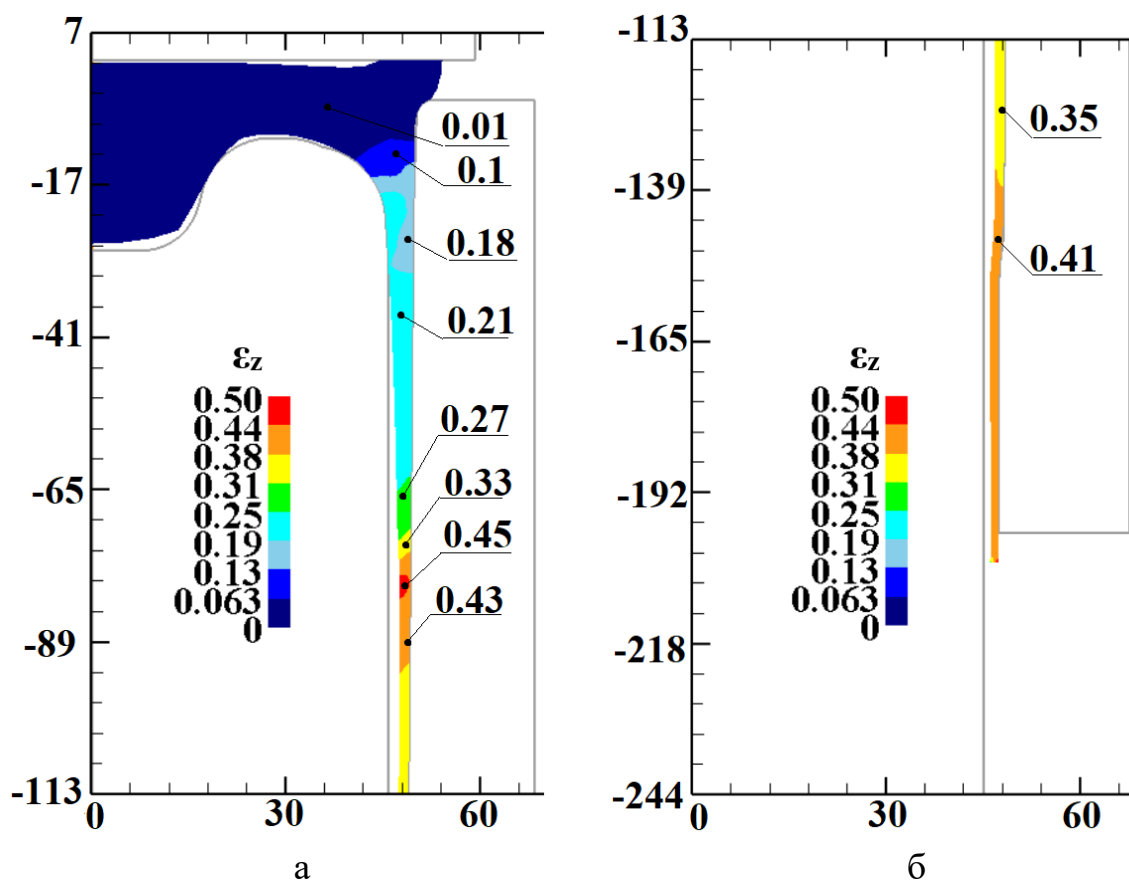


Рисунок 4.11. Розподіл осьових деформацій у напівфабрикаті:

а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

Розподіл радіальних деформацій у напівфабрикаті відображено на рис. 4.12. В радіальному напрямку радіальні деформації мають знакозмінний характер. В зоні формування виступу $\varepsilon_r = 0.1 \div 0.39$ – розтягуючі деформації (рис. 4.12а). Основний об'єм донної частини має незначні стискаючі деформації $\varepsilon_r = -0.01$. В зоні радіусного переходу дна в стінку напівфабрикату $\varepsilon_r = -0.09$ – стискаючі деформації. Від зони придонної частини стінки до середини висоти стінки $\varepsilon_r = -0.18 \div -0.43$ – стискаючі деформації збільшуються. Від середньої частини стінки напівфабрикату до верхнього торцю радіальні

деформації знаходяться в межах $\varepsilon_r = -0.32 \div -0.43$ – стискаючі деформації (рис. 4.126).

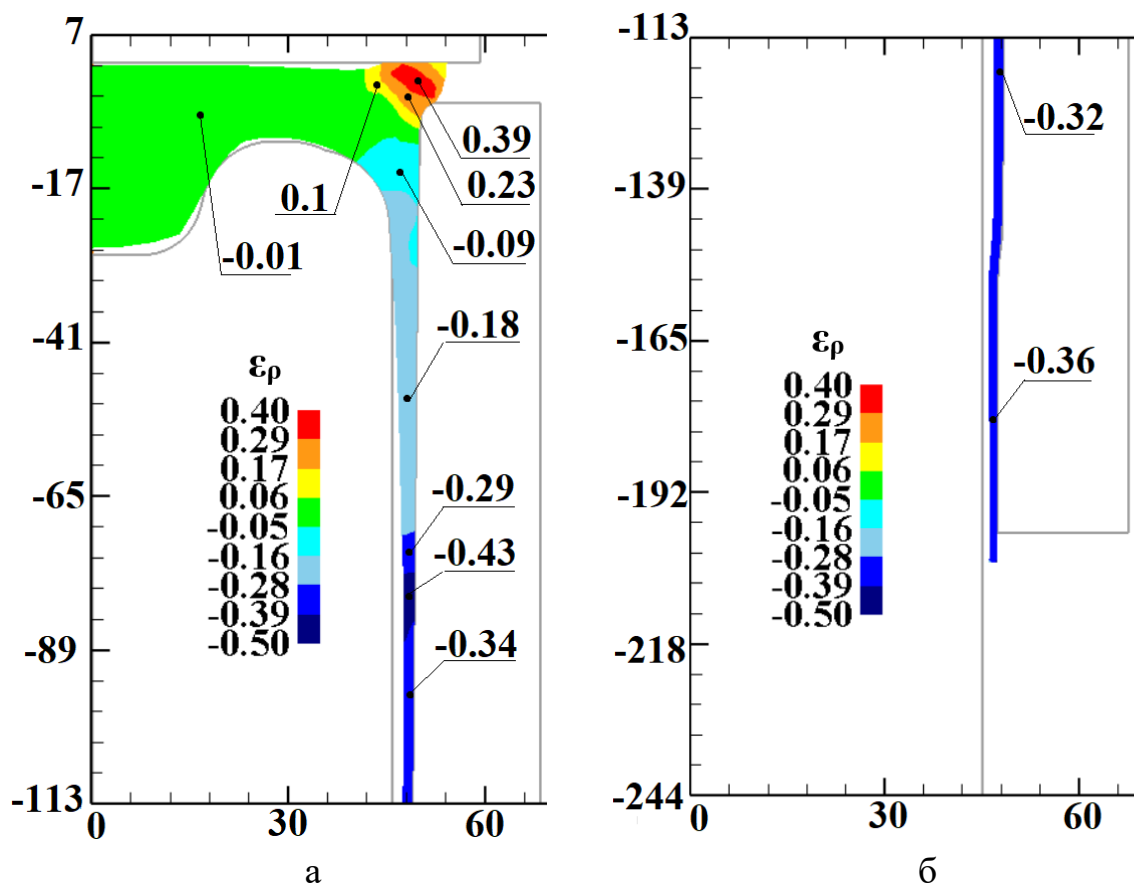


Рисунок 4.12 Розподіл радіальних деформацій у напівфабрикаті:
а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

На рис. 4.13 відображено розподіл тангенціальних деформацій у напівфабрикаті. В донній частині в зоні формування виступу $\varepsilon_\theta = 0.04 \div 0.09$ – розтягуючі деформації (рис. 4.13а). Від зони радіусного переходу донньої частини в стінку до зони першого радіусного переходу $\varepsilon_\theta = -0.01 \div -0.03$ – незначні стискаючі деформації (рис. 4.13а та 4.13б). Від зони другого радіусного переходу до верхньої частини напівфабрикату $\varepsilon_\theta = -0.05$ – стискаючі деформації. Тобто в донній частині напівфабрикату розтягуючі тангенціальні деформації, а по висоті стінки – стискаючі.

На рис. 4.14 відображено розподіл інтенсивності деформацій. За допомогою аналізу розподілу інтенсивності деформацій можна оцінити пропрацювання матеріалу напівфабрикату.

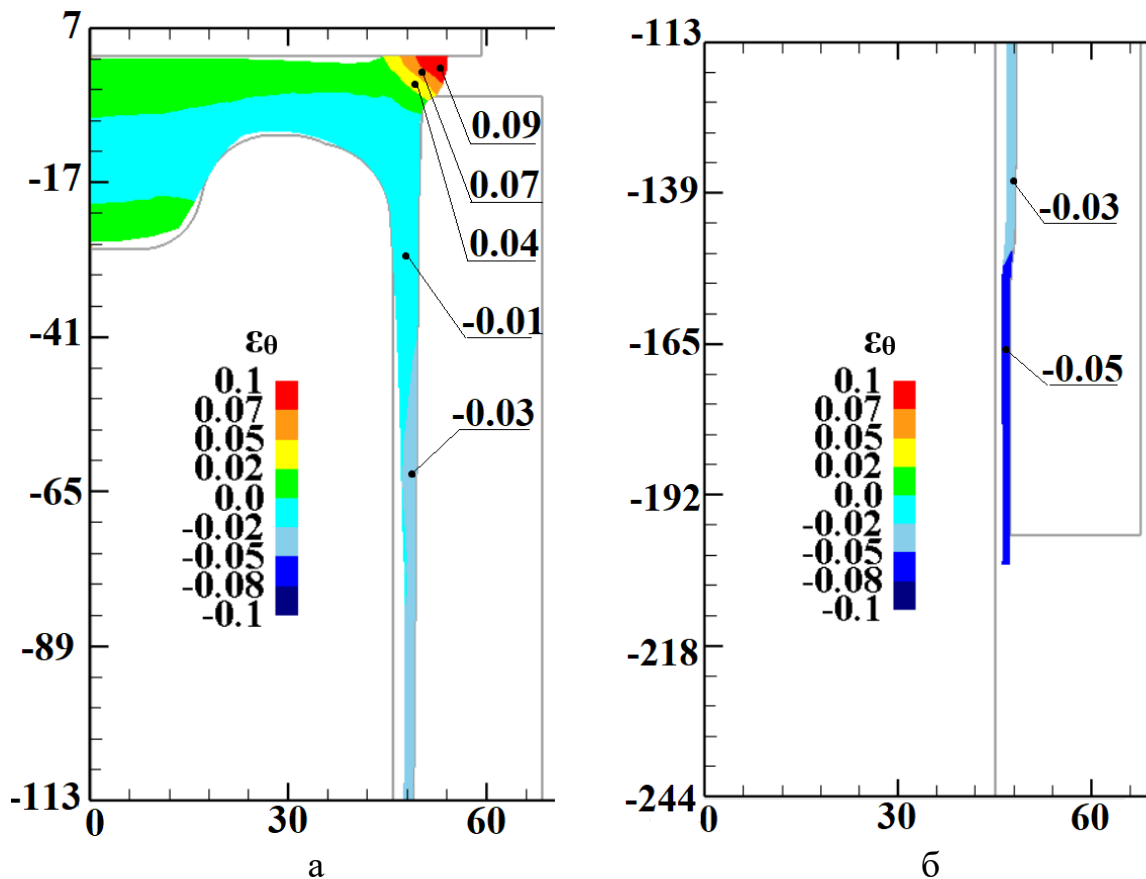


Рисунок 4.13. Розподіл тангенціальних деформацій у напівфабрикаті:
а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

Найбільше пропрацювання матеріалу пластичною деформацією відбувається в зоні формування виступу, оскільки тут значення інтенсивності деформацій найбільші за величиною $\epsilon_i=0.48\div0.66$ (рис. 4.14а). В зоні радіусного переходу донної частини в стінку значення дещо менші $\epsilon_i=0.31$, а до середини висоти стінки напівфабрикату збільшуються до величини $\epsilon_i=0.51$. Від середини висоти стінки до зони першого радісного переходу $\epsilon_i=0.41\div0.47$ (рис. 4.14а та 4.14б). Верхня частина стінки напівфабрикату відносно донної частини стінки має дещо краще пропрацювання пластичною деформацією $\epsilon_i=0.51$.

Також можна спостерігати, що на даній операції формоутворення напівфабрикату основний об'єм донної частини не опрацьовується пластиною деформацією. Це пов'язано з обмеженням руху деформуючого інструменту

(плити) для зменшення необхідного зусилля деформування і відповідно зменшення питомих зусиль, що сприймає деформуючий інструмент.

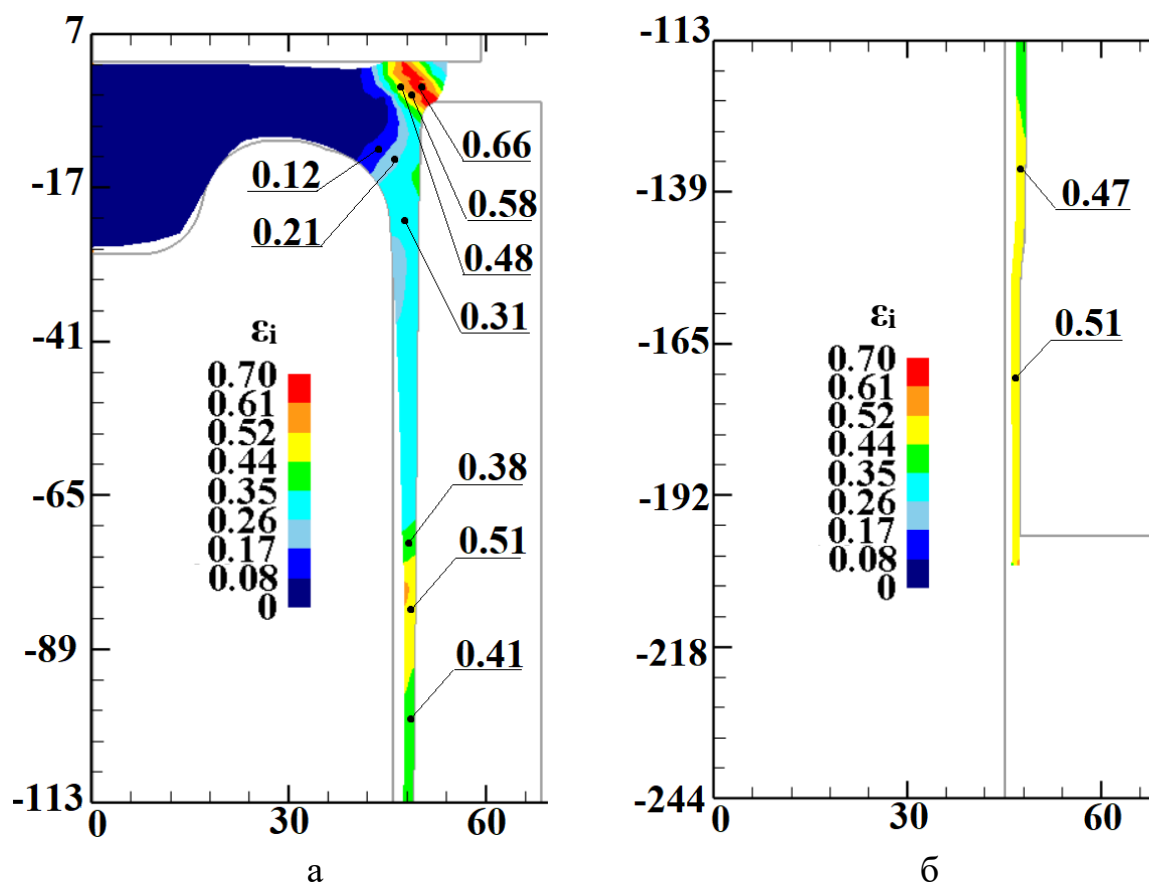


Рисунок 4.14. Розподіл інтенсивності деформацій у напівфабрикаті:
а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

4.4 Оцінка критерію руйнування процесу обтиску і осаджування

На рис. 4.15 відображено коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L при обтиску і осаджуванні. Найбільше за величиною значення критерію руйнування на контактуючій поверхні оправки з внутрішнім радіусом напівфабрикату 0.18 (рис. 4.15). В зоні формування виступу 0.07. По всій висоті стінки напівфабрикату значення критерію руйнування не перевищує 0.14. При розрахунках варто орієнтуватись на граничний коефіцієнт критерію руйнування з величиною 0.8, оскільки при досягненні величини 1 відбувається руйнування матеріалу виробу, а значення критерію руйнування 0.8 дає 20% запасу до моменту руйнування.

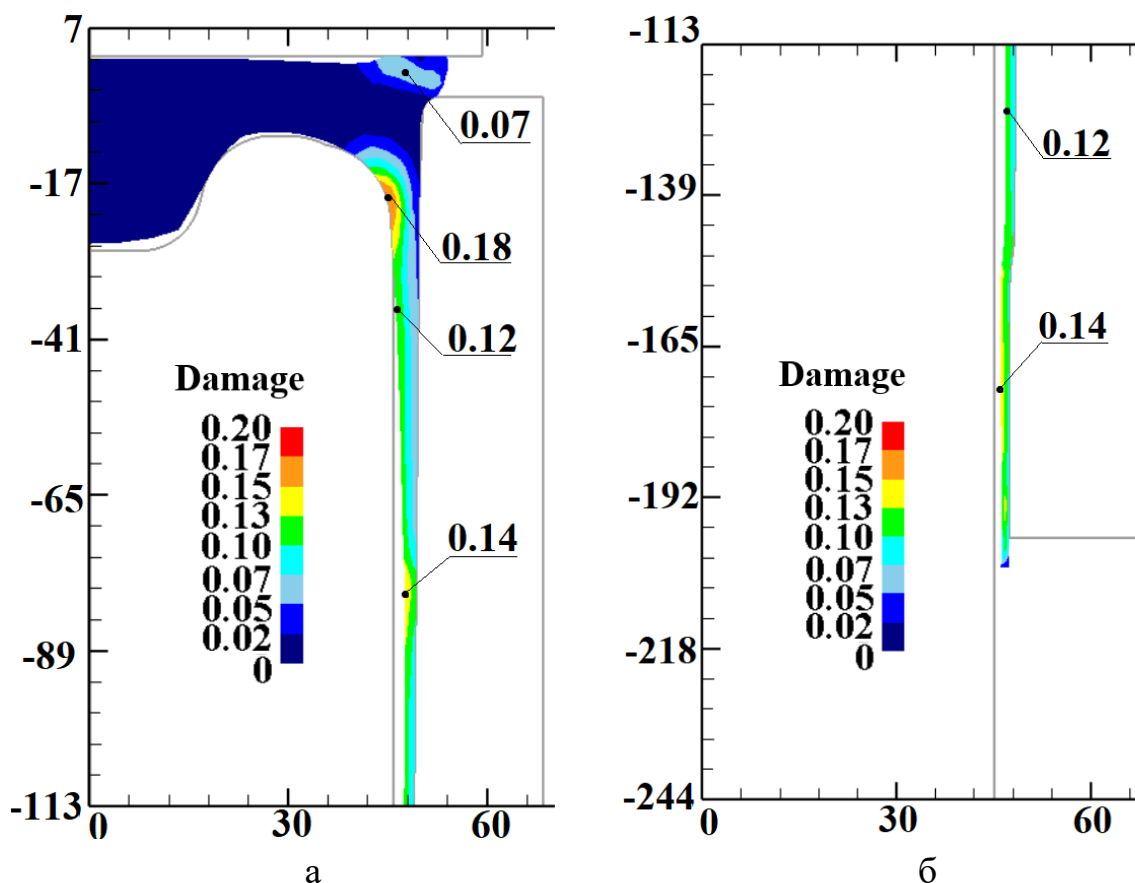


Рисунок 4.15. Коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L при обтиску та осаджуванні : а – нижня частина; б – верхня частина. Розміри по вісях наведено в міліметрах. Інструмент відображено сірими лініями

На рис. 4.16 відображено форму та розміри отриманого напівфабрикату після операції обтиску та осаджування.

Формоутворення готової деталі здійснюється шляхом токарно-фрезерної обробки, а саме підрізання нижнього торцю, формування виступу та отримання отвору з різьбою під капсуль-запальник (донна частина виробу), а також обрізання верхнього торцю.

4.5 Висновки

1 За допомогою MSE створено математичну модель та проведено розрахунковий аналіз процесу обтиску з одночасним осаджуванням порожнистого виробу.

2 Виявлено силові режими процесу та питомі зусилля на контактуючих поверхнях між напівфабрикатом та деформуючим інструментом, що допоможе у виборі пресового обладнання та проектуванні штампового

оснащення. Сформований виступ на попередніх операціях було підігріто до температури $T = 990^{\circ}\text{C}$, що дало незначне зусилля деформування 2730 кН. Зусилля виштовхування напівфабрикату 157 кН. Максимальні значення нормальних напружень (питомих зусиль) на поверхні плити 1830 МПа, на поверхні оправки 1380 МПа, а на поверхні матриці 2410 МПа.

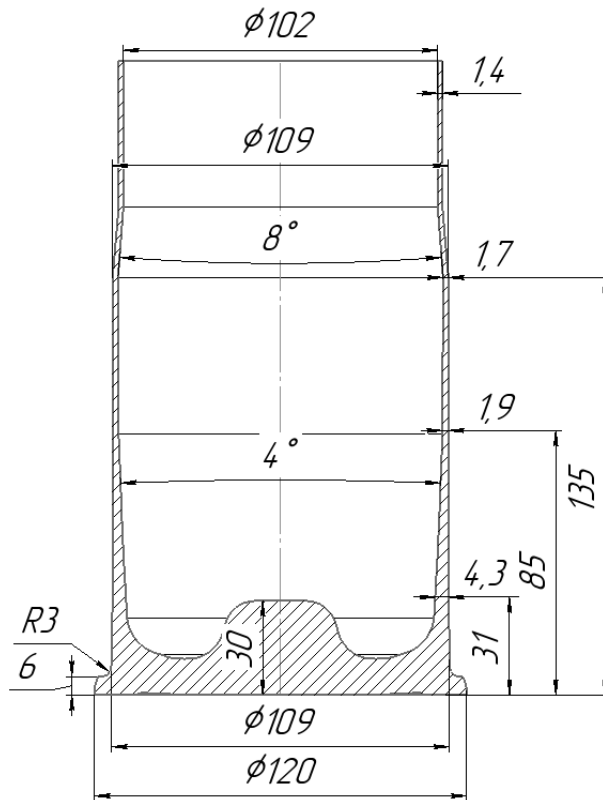


Рисунок 4.16. Форма та розміри
отриманого напівфабрикату

3 За допомогою моделювання визначено напружено-деформований стан у отриманому напівфабрикаті. Максимальні значення інтенсивності деформацій в зоні формування фланця – 0.66, в стінці де відбувалось обтиснення – 0.51.

4 За допомогою критерію руйнування Normalized C&L визначено ресурс пластичності отриманого напівфабрикату. Оскільки максимальне значення критерію руйнування Normalized C&L сягає 0.18, а

граничним значенням є 1 при якому відбудеться руйнування матеріалу, встановлено, що ресурс пластичності складає 0.82.

5 Встановлено кінцеву форму та розміри отриманого напівфабрикату.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГІЛЬЗИ ДЛЯ 125 мм ТАНКОВОГО ПОСТРІЛУ ІЗ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ

5.1 Форма та розміри готового виробу та визначення форми та розмірів вихідної заготовки

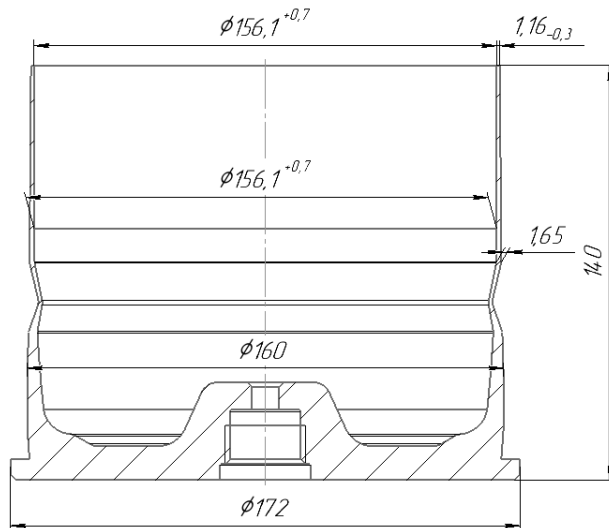


Рисунок 5.1. Форма та розміри
готового виробу

На рис. 5.1 зображено форму та розміри готового виробу. Матеріал виробу сталь марки 11ЮА. За допомогою умови рівності об'ємів готової деталі та вихідної заготовки $V_{\text{дет}}=V_{\text{заг}}$ можна визначити необхідний об'єм початкової заготовки. Об'єм готового виробу, що відображено на рис. 5.1 – $V_{\text{дет}}=464365,19 \text{ мм}^3$. Також при визначенні $V_{\text{заг}}$

необхідно врахувати об'єм металу, який буде втрачено внаслідок очищення проміжних напівфабрикатів від окалини після гарячого деформування, об'єм металу, що піде в стружку при торцюванні та отриманні отвору під капсуль-запальник. З врахуванням наведених даних було визначено форму та розміри вихідної заготовки. Вихідна заготовка – круг з діаметром 180 мм та висотою 24 мм. Об'єм такої заготовки $V_{\text{заг}}=610725,62 \text{ мм}^3$. Таку заготовку було



Рисунок 5.2. Фото отриманої
вихідної заготовки

отримано з листа товщиною $24^{+0,5} \text{ мм}$ шляхом розкрою ножицями гільйотини на смуги з подальшим вирізанням лазером заготовок з діаметром 180 мм. На рис. 5.2 відображено фото отриманої вихідної заготовки.

5.2 Операція гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату

5.2.1 Схема процесу гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату

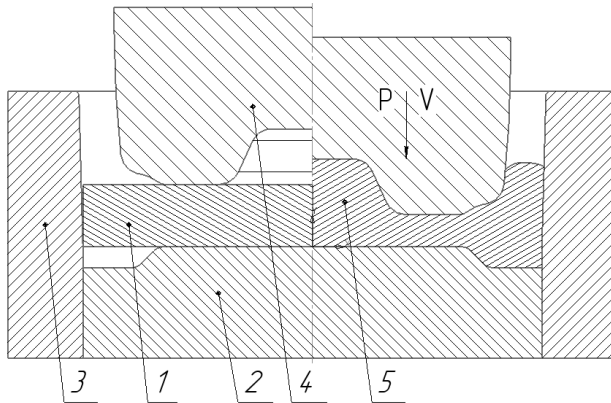


Рисунок 5.3. Схема процесу гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату: 1 – заготовка; 2 – виштовхувач; 3 – матриця; 4 – пуансон; 5 – напівфабрикат

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого зворотного видавлювання яку відображено на рис. 5.3. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу гарячого зворотного видавлювання а праворуч - в кінці видавлювання. Заготовка 1 встановлюється на виштовхувач 2 з центруванням в

матриці 3. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні пуансона 4 на задану відстань зі швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 5. Після вилучення пуансона 4 із напівфабрикату 5 виконується його виштовхування із матриці 3 за допомогою виштовхувача 2.

Для проведення розрахунків МСЕ використовувалась програма DEFORM. В програмі DEFORM матеріал марки Сталь 11ЮА або його аналог відсутній, тому було обрано найближчий схожий матеріал по кривим зміцнення – AISI-1015. Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: початкова температура заготовки $T = 900^{\circ}\text{C}$, швидкість переміщення пуансона $V = 16 \text{ мм/с}$ фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,3$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим інструментом – 5 N/sec/mm/C , глибина проникнення сітки – $0,25 \text{ мм}$. Задано пластичну модель матеріалу. Температура виштовхувача, матриці і пуансона – 150°C .

5.2.2 Зусилля деформування та питомі зусилля процесу зворотного видавлювання напівфабрикату



Рисунок 5.4. Залежність зусилля деформування від переміщення пуансона

поступово до величини 5,9 МН при переміщенні пуансона 8,9 мм після чого зусилля деформування різко зростає до 9,4 МН при переміщенні пуансона на 9,7 мм і при переміщенні пуансона на 12 мм (кінець процесу видавлювання) зусилля сягає 12,2 МН.

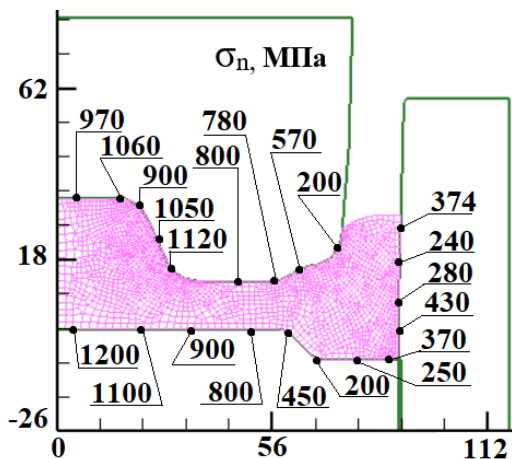


Рисунок 5.5. Розподіл нормальних напружень

зони контакту із придонною частиною напівфабрикату $\sigma_n=430$ МПа, а на поверхні виштовхувача ближче до вісі симетрії $\sigma_n=1200$ МПа.

Залежність зусилля гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату від переміщення пуансона відображено на рис. 5.4. Аналізуючи дані, що наведено на рис. 5.4 можна побачити, що на початку процесу видавлювання зусилля деформування різко зростає до величини 2 МН при переміщенні пуансона 0,4 мм. Далі зусилля деформування зростає

Для визначення матеріалу інструмента виявлено розподіл нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях заготовки та інструмента (рис. 5.5). Максимальні значення σ_n на поверхні пуансона сягає 1120 МПа на радіусному переході формування центрального виступу в плоску зону донної частини, на поверхні матриці в

5.2.3 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату

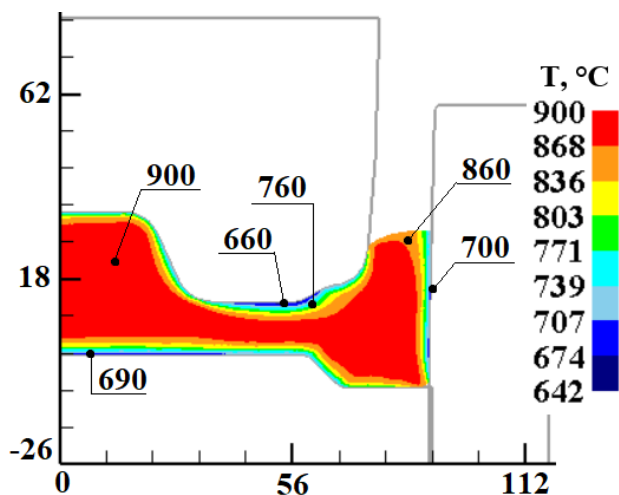


Рисунок 5.6. Розподіл температури напівфабрикату

На рис. 5.6 наведено розподіл температури в напівфабрикату в кінці процесу гарячого зворотного видавлювання. З рис. 5.6 можна побачити, що основний об'єм матеріалу сформованого напівфабрикату має температуру $T=900^{\circ}\text{C}$, а в зоні контакту напівфабрикату з пуансоном $T=660^{\circ}\text{C}$, з виштовхувачем $T=690^{\circ}\text{C}$, а з матрицею $T=700^{\circ}\text{C}$.

5.2.4 Напружено-деформований стан процесу гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату

Значення напружень у напівфабрикаті відображено при максимальному зусиллі деформування, яке спостерігається в кінці видавлювання.

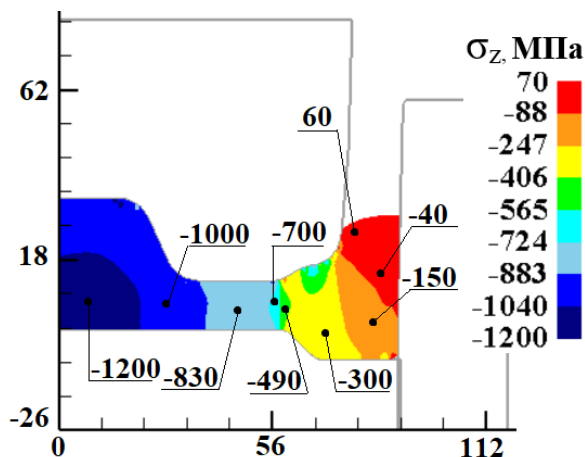


Рисунок 5.7. Розподіл осьових напружень у напівфабрикаті

На рис. 5.7 відображено розподіл осьових напружень σ_z . Додатні значення σ_z спостерігається на верхньому торці напівфабрикату між пуансоном та матрицею $\sigma_z=60$ МПа – розтягуючі напруження. По всьому іншому об'єму напівфабрикату значення σ_z – від'ємні тобто напруження стискаючі. В придонній частині

напівфабрикату ближчу до вісі симетрії $\sigma_z=-1200$ МПа, в зоні формування донної частини (де товщина напівфабрикату найменша) $\sigma_z=-830$ МПа, а ближче до зони контакту з матрицею $\sigma_z=-150$ МПа.

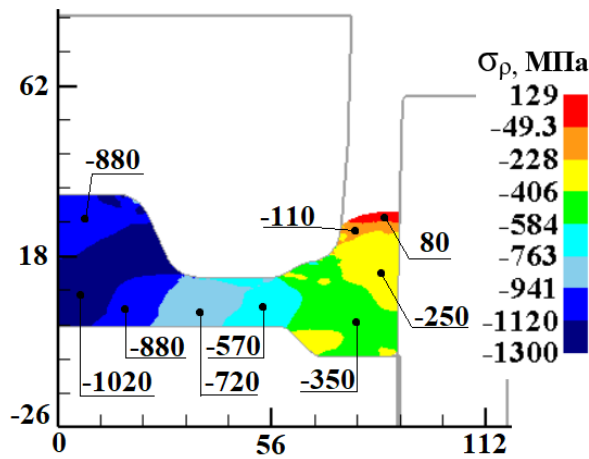


Рисунок 5.8. Розподіл радіальних напружень у напівфабрикаті

Розподіл радіальних напружень σ_ρ відображено на рис. 5.8. Тут також спостерігаються додатні значення $\sigma_\rho=80$ МПа в зоні верхнього виступу між пуансоном і матрицею тобто діють напруження розтягу. По всьому іншому об'єму матеріалу напівфабрикату діють стискаючі напруження. В зоні формування нижнього виступу $\sigma_\rho=-350$ МПа, в зоні формування донної частини (де товщина напівфабрикату найменша) $\sigma_\rho=-570\div-720$ МПа, а в зоні формування центрального виступу $\sigma_\rho=-880\div-1020$ МПа.

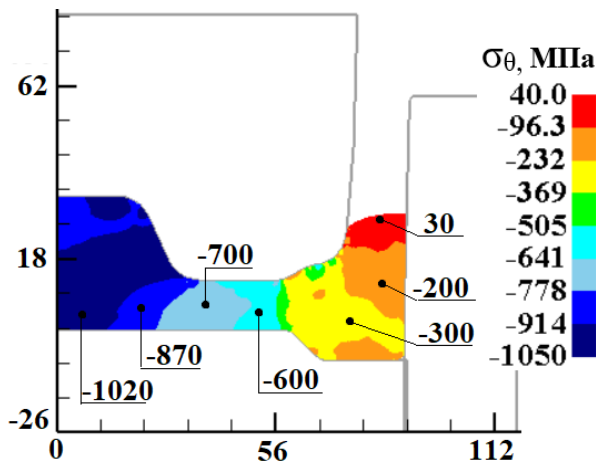


Рисунок 5.9. Розподіл окружних напружень у напівфабрикаті

Розподіл окружних напружень σ_θ відображено на рис. 5.9. Характер розподілу σ_θ схожий як і для σ_z і σ_ρ . В зоні верхнього виступу між пуансоном і матрицею $\sigma_\theta=30$ МПа – діють розтягуючі напруження. По всьому іншому об'єму матеріалу напівфабрикату діють стискаючі напруження. В зоні формування нижнього виступу $\sigma_\theta=-300$ МПа, в зоні формування донної частини (де товщина напівфабрикату найменша) $\sigma_\theta=-600\div-700$ МПа, а в зоні формування центрального виступу $\sigma_\theta=-870\div-1020$ МПа.

Розподіл інтенсивності напружень σ_i відображено на рис. 5.10.

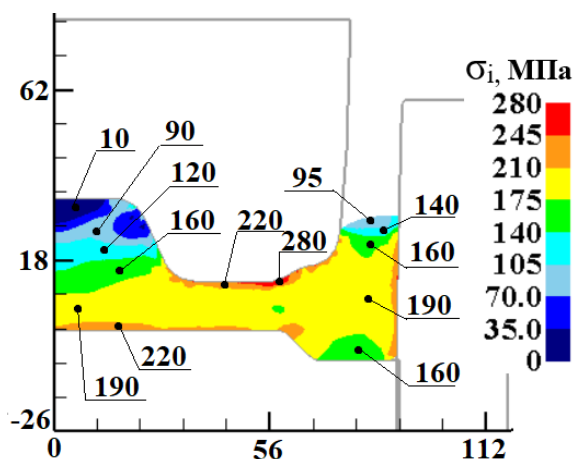


Рисунок 5.10. Розподіл інтенсивності напружень у напівфабрикаті

частина виступу під торцем пуансона $\sigma_i = 10$ МПа.

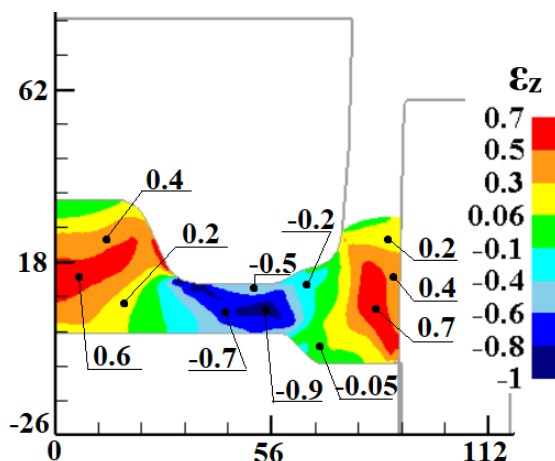


Рисунок 5.11. Розподіл осьових деформацій у напівфабрикаті

формування центрального виступу характеризується розтягуючими деформаціями їх значення лежить в межах $\varepsilon_z = 0.2 \div 0.4$ – нижня частина центрального виступу, $\varepsilon_z = 0.6$ середня частина центрального виступу та $\varepsilon_z = 0.2 \div 0.4$ – верхня частина центрального виступу.

Розподіл радіальних деформацій ε_r відображено на рис. 5.12. В зоні формування нижнього виступу $\varepsilon_r = -0.05 \div -0.2$ – стискаючі деформації. В зоні формування стінки напівфабрикату під подальше витягування $\varepsilon_r = -0.5 \div -0.8$ –

Найбільші значення σ_i спостерігаються в зоні контакту напівфабрикату з пуансоном $\sigma_i = 220 \div 280$ МПа та з виштовхувачем $\sigma_i = 220$ МПа. Переважна частина матеріалу напівфабрикату в донній частині має $\sigma_i = 190$ МПа, а в зоні центрального виступу $\sigma_i = 90 \div 160$ МПа і лиш незначна

На рис. 5.11 наведено розподіл осьових деформацій ε_z . Загалом у напівфабрикаті переважають додатні тобто розтягуючі деформації. В зоні формування виступу між пуансоном та матрицею $\varepsilon_z = 0.2 \div 0.7$ – розтягуючі деформації. В плоскій частині дна працюють стискаючі деформації $\varepsilon_z = -0.2 \div -0.9$. Зона

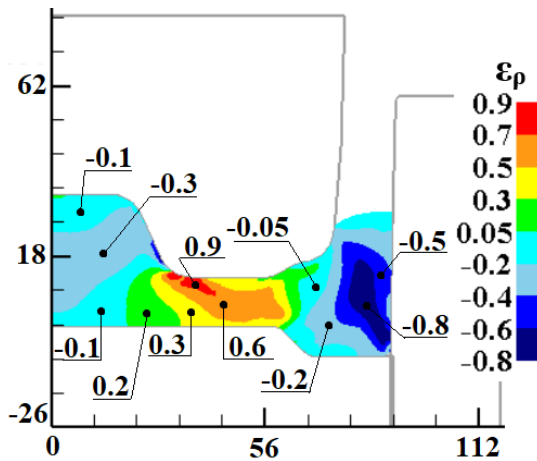


Рисунок 5.12. Розподіл радіальних деформацій у напівфабрикаті

розтягуючі деформації. Зона формування центрального виступу напівфабрикату характеризується стискаючими деформаціями і за величиною лежать в межах $\varepsilon_\rho = -0.1 \div -0.3$.

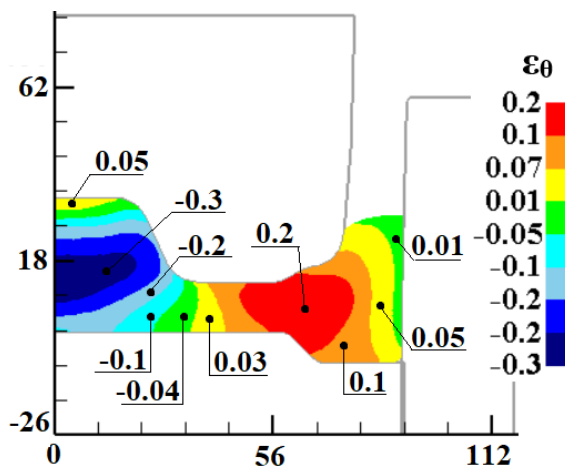


Рисунок 5.13. Розподіл окружних деформацій у напівфабрикаті

переважають стискаючі деформації $\varepsilon_\theta = -0.04 \div -0.2$ (придонна зона) та $\varepsilon_\theta = -0.3$ (центральна частина утвореного виступу). Ближче до зони контакту виступу з пуансоном деформації $\varepsilon_\theta = 0.05$ – розтягуючі.

За допомогою аналізу розподілу інтенсивності деформацій ε_i можна оцінити характер пропрацювання матеріалу напівфабрикату. На рис. 5.14 відображено такий розподіл. В зоні формування нижнього виступу

стискаючі деформації. В плоскій частині дна, де матеріал напівфабрикату має найменшу товщину $\varepsilon_\rho = 0.2 \div -0.6$ – розтягуючі деформації, а в зоні переходу плоского дна в конусну частину центрального виступу напівфабрикату (ближче до зони контакту з пуансоном) значення $\varepsilon_\rho = 0.9$ – діють найбільші

На рис. 5.13 показано розподіл окружних деформацій ε_θ . В зоні формування стінки напівфабрикату під подальше витягування значення $\varepsilon_\theta = 0.01 \div 0.05$ – розтягуючі деформації. В зоні формування плоскої донної частини $\varepsilon_\theta = 0.03 \div 0.2$ також діють розтягуючі деформації. В зоні формування центрального виступу

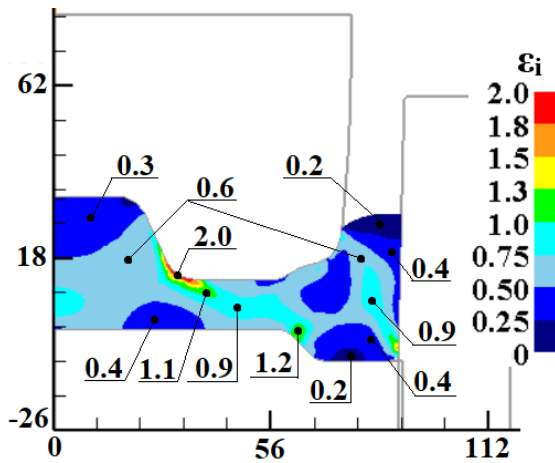


Рисунок 5.14. Розподіл інтенсивності деформацій у напівфабрикаті

напівфабрикату $\varepsilon_i=0.2\div 0.4$. Зона формування стінки під подальше витягування - $\varepsilon_i=0.4\div 0.9$, а зона верхнього торцю стінки - $\varepsilon_i=0.2$. Більш інтенсивне пропрацювання матеріалу напівфабрикату спостерігається в зоні радіусного переходу нижнього виступу в плоску частину дна $\varepsilon_i=1.2$, а максимальне значення $\varepsilon_i=2.0$ в зоні

переходу плоскої частини дна в конусну частину центрального виступу. Плоска частина дна має $\varepsilon_i=0.4\div 1.1$. Переважна частина об'єму центрального виступу має $\varepsilon_i=0.6$, а дещо менша частина об'єму (верхня частина центрального виступу, ближче до зони контакту з пуансоном $\varepsilon_i=0.3$).

З більшості проаналізованих джерел в першому розділі відомо, що небезпечні ділянки при операції гарячого формоутворення порожнистих виробів знаходяться в зоні радіусних переходів донної частини в стінку (відбувається утворення тріщин у вказаній зоні). На рис. 5.15 відображено

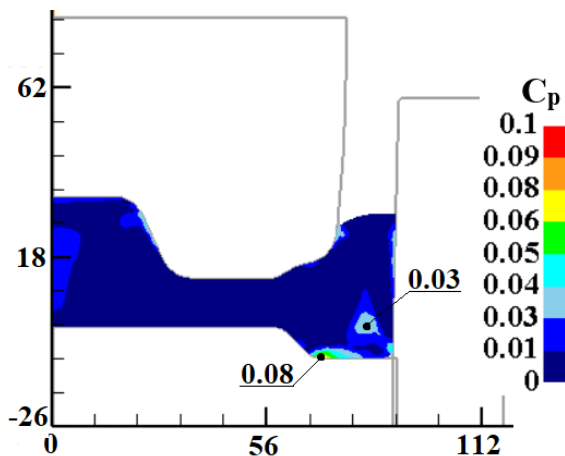


Рисунок 5.15. Коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L

розподіл коефіцієнту критерію руйнування Normalized C&L, C_p по об'єму напівфабрикату. Розглядаючи рис. 5.15 можна побачити, що максимальне значення $C_p=0.08$ в зоні формування нижнього виступу (граничним значенням є $C_p=0.8$ при якому запас пластичності матеріалу напівфабрикату до його

руйнування буде 20%).

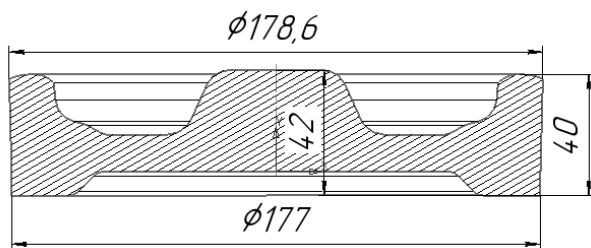


Рисунок 5.16. Форма та основні габаритні розміри напівфабрикату

Отриману форму та основні габаритні розміри напівфабрикату внаслідок операції гарячого зворотного видавлювання відображено на рис. 5.16.

5.2.5 Проектування штампового оснащення для операції гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату

Після отриманих результатів внаслідок розрахунків за допомогою МСЕ було спроектовано штампове оснащення для операції гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату. Креслення загального вигляду штампа і специфікація до креслення відображено в Додатку Б на рис. Б.1 і Б.2 відповідно.

Штамп для гарячого зворотного видавлювання складається з верхньої та нижньої частин. Пуансон 1 прикріплюється до верхньої плити 10 за допомогою пуансонотримача 8. Центрування пуансонотримача відносно верхньої плити здійснюється за допомогою штифтів 20, а фіксація за допомогою болтів 19. Нижня частина штампа складається з матриці 2, яка центрується по нижній плиті 9. В матриці 2 встановлено оправку 5 в якій встановлено виштовхувач 13. Між матрицею 2 та нижньою плитою 9 встановлено підкладну плиту 17. На матрицю 2 напресовано радіатор 3, який в свою чергу має штуцери 7 для забезпечення циркуляції води для охолодження матриці 2. Фіксація радіатора 3 здійснюється за допомогою фіксуючого кільця 4 та болтів 21. Фіксація матриці 2 здійснюється за допомогою притискного кільця 6 та болтів 18. Для точного направлення верхньої частини штампа відносно нижньої використовуються направляючі втулки 11, які встановлено у верхній плиті 10 і направляючі колонки 12, які встановлено в нижній плиті 9.

Опис роботи штампа. Перед встановленням розігрітої заготовки було здійснено нагрів деформуючого інструменту за допомогою газової горілки до температури 150°C. В процесі роботи штампа для охолодження матриці передбачено радіатор 3 зі встановленими на ньому штуцерами 7 до яких було підведено шланги для підводу та відводу води. Розігріта заготовка встановлюється в матрицю 2 на оправку 5. При опусканні верхньої плити 10 пуансон 1 деформує розігріту заготовку внаслідок чого утворюється напівфабрикат. Після того, як пуансон 1 опустивсь на задану висоту та сформував геометрію напівфабрикату відбувається зворотній хід верхньої плити 10 разом з пуансоном 1 напівфабрикат при цьому залишається в матриці 2. За допомогою ходу вгору виштовхувача 13 відбувається вилучення напівфабрикату із матриці 2. На рис. 5.17 відображено фото штампа для гарячого зворотного видавлювання який встановлено на пресі.

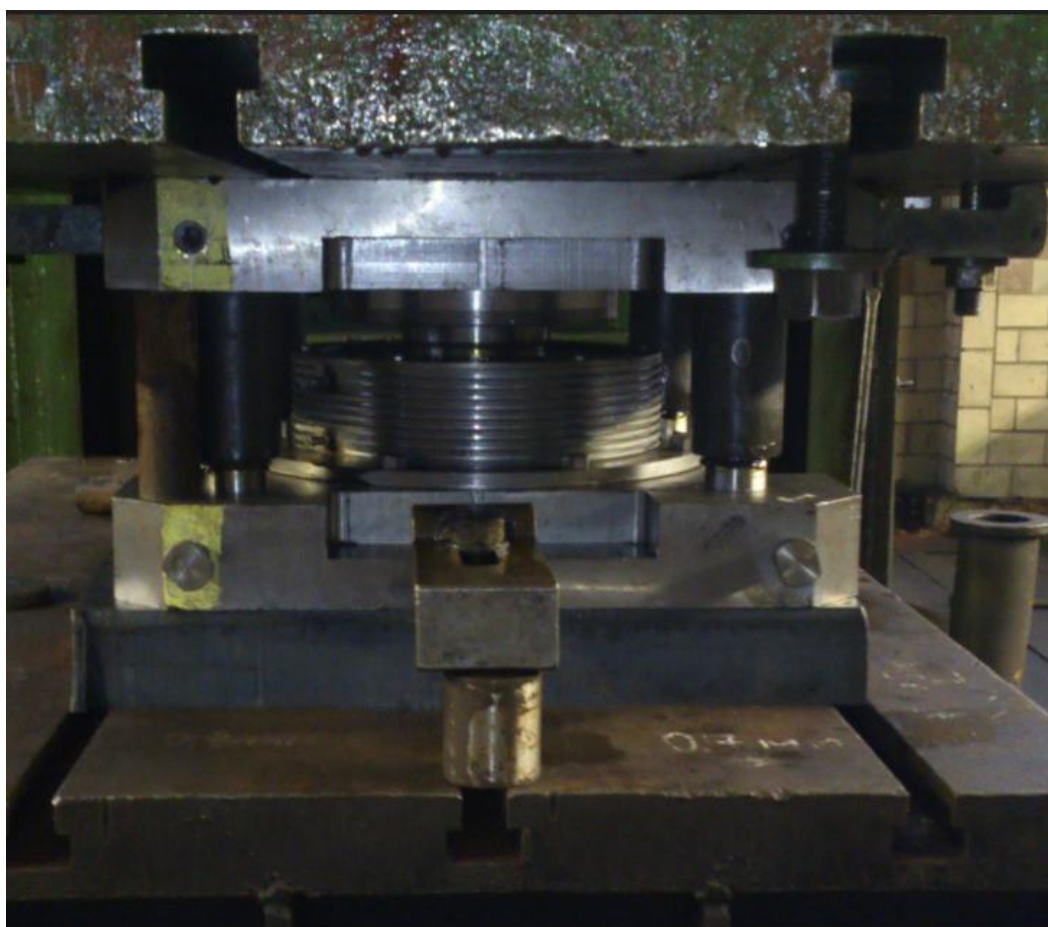


Рисунок 5.17. Фото штампа для гарячого зворотного видавлювання встановленого на пресі ПА198

На рис. 5.18 відображено фото форми отриманого напівфабрикату після проведення натурального експерименту.



Рисунок 5.18. Фото форми отриманого напівфабрикату після проведення натурального експерименту

Порівнюючи дані, які приведено на рис. 5.16 і рис. 5.18 можна побачити, що отримана геометрія напівфабрикату внаслідок розрахунків МСЕ (рис. 5.16) і отримана геометрія внаслідок натурального експерименту (рис. 5.18) досить добре збігаються.

5.3 Операція гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату

5.3.1 Схема процесу гарячого витягування з потоншенням

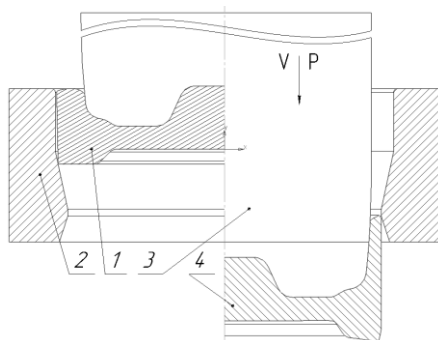


Рис. 5.19. Схема процесу гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату: 1 –заготовка; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 – напівфабрикат

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого витягування з потоншенням, яку відображено на рис. 5.19. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу гарячого витягування з потоншенням а праворуч - в кінці.

Заготовка 1 встановлюється на конусну частину і центрується по циліндричній частині матриці 2. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні пуансона 3 на задану відстань зі швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 4.

Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: початкова температура заготовки $T = 600^{\circ}\text{C}$, швидкість переміщення пуансона $V = 16 \text{ мм/с}$, фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,3$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим інструментом – 5 N/sec/mm/C , глибина проникнення сітки – $0,25 \text{ мм}$. Задано пластичну модель матеріалу. Температура матриці і пуансона – 150°C .

5.3.2 Зусилля деформування та питомі зусилля процесу гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату

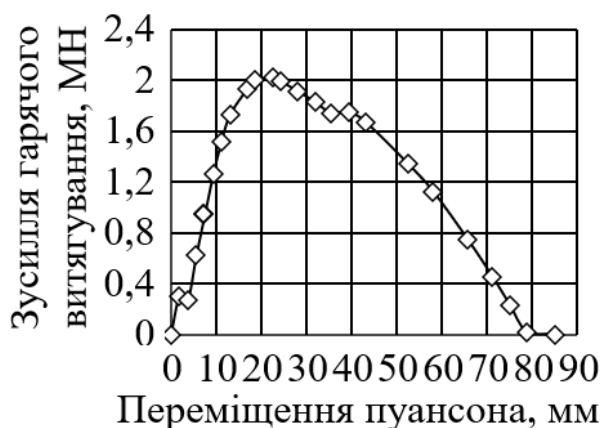


Рисунок 5.20. Залежність зусилля гарячого витягування з потоншенням від переміщення пуансона

Залежність зусилля гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату від переміщення пуансона відображено на рис. 5.20. Аналізуючи дані, що наведено на рис. 5.20 можна побачити, що на початку процесу витягування зусилля деформування різко зростає до величини 2 МН при переміщенні пуансона $18,7 \text{ мм}$. Далі зусилля витягування

поступово зменшується до величини $1,7 \text{ МН}$ при переміщенні пуансона $35,4 \text{ мм}$ після чого зусилля витягування різко зменшується і при переміщенні пуансона на $78,7 \text{ мм}$ сягає нульових значень (кінець процесу витягування).

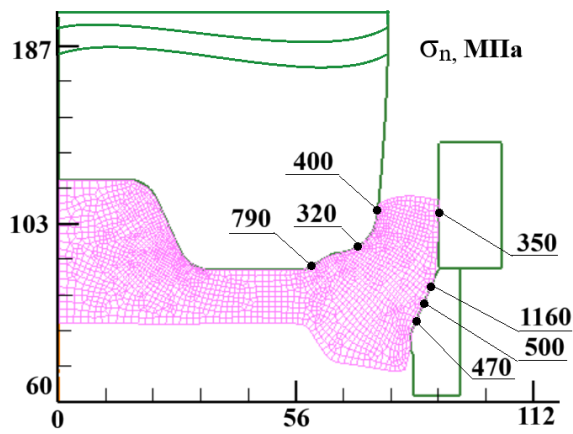


Рисунок 5.21. Розподіл нормальних напружень

Виявлено розподіл нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях заготовки та інструмента (рис. 5.21). Максимальні значення σ_n на поверхні пуансона складає 790 МПа на радіусному переході дна напівфабрикату в зовнішній спеціальний виступ, на поверхні матриці в зоні верхньої конусної частини $\sigma_n = 1160$ МПа.

5.3.3 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату

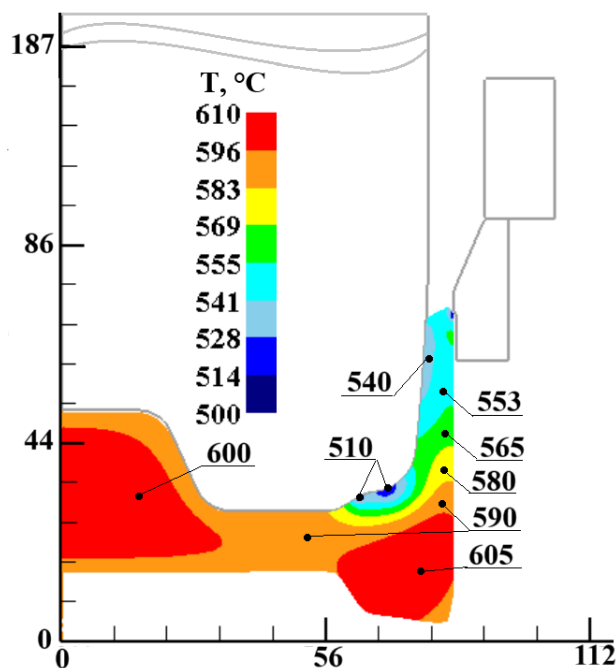


Рисунок 5.22. Розподіл температури напівфабрикату

На рис. 5.22 наведено розподіл температури напівфабрикату наприкінці процесу гарячого витягування з потоншенням. Розглядаючи рис. 5.22 можна побачити, що донна частина напівфабрикату має температуру $T = 590 \div 605^\circ\text{C}$. В зоні стінки температура дещо знижується $T = 580 \div 540^\circ\text{C}$ (оскільки матеріал одночасно контактує з пуансоном і матрицею). Найменша за

величиною температура припадає на незначну зону радіусів пуансона $T = 510^\circ\text{C}$. Тобто процес деформування стінки при гарячому витягуванні з потоншенням $(540 \div 580^\circ\text{C}) / 1500^\circ\text{C} = 0.36 \div 0.38$ – відбувається в умовах неповної холодної деформації.

5.3.4 Деформований стан напівфабрикату після операції гарячого витягування з потоншенням

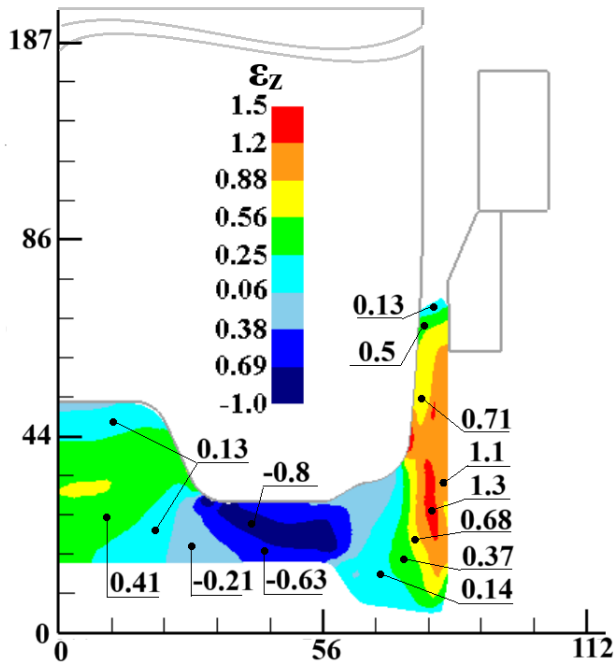


Рисунок 5.23. Розподіл осевих деформацій напівфабрикату

деформацій $\varepsilon_z = 1.1 \div 1.3$ – середня частина стінки, а ближче до верхнього

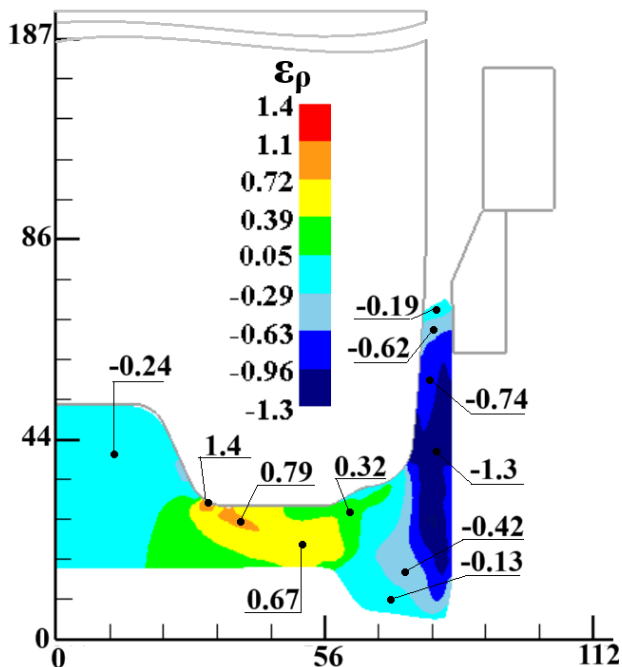


Рисунок 5.24. Розподіл радіальних деформацій у напівфабрикаті

На рис. 5.23 наведено розподіл осевих деформацій ε_z . Загалом у напівфабрикаті переважають додатні деформації – розтягуючі. В зоні центрального виступу $\varepsilon_z = 0.13 \div 0.41$ – розтягуючі деформації. В плоскій частині дна напівфабрикату працюють стисаючі деформації $\varepsilon_z = -0.21 \div -0.8$. У місці де матеріал найбільш zdeформований (зона формування стінки) виявлено найбільші значення розтягуючих деформацій $\varepsilon_z = 1.1 \div 1.3$ – середня частина стінки, а ближче до верхнього торцю стінки значення розтягуючих деформацій дещо менші $\varepsilon_z = 0.13 \div 0.71$. Зона нижнього торцю має $\varepsilon_z = 0.14$ – розтягуючі деформації.

Розподіл радіальних деформацій ε_ρ наведено на рис. 5.24. В зоні середньої частини стінки $\varepsilon_\rho = -1.3$ – максимальні стисаючі, в зоні верхнього торцю стінки $\varepsilon_\rho = -0.19 \div -0.74$ – стисаючі деформації, зона нижнього торцю має $\varepsilon_\rho = -0.13 \div -0.42$ – стисаючі

деформації. В зоні плоскої частини дна $\varepsilon_\rho = 0.32 \div -0.79$ – розтягуючі деформації. В зоні радіусного переходу плоскої донної частини в центральний

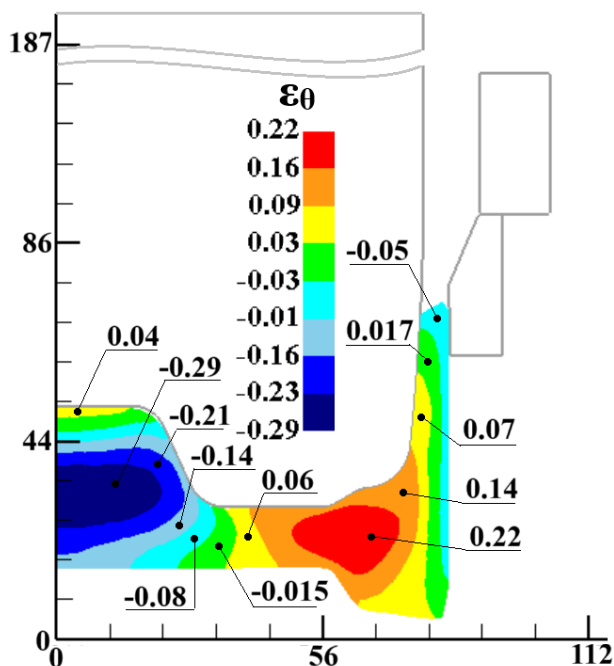


Рисунок 5.25. Розподіл окружних деформацій у напівфабрикаті

виступ $\varepsilon_\rho = 1.4$ – максимальні за величиною розтягуючі деформації. Зона центрального виступу має $\varepsilon_\rho = -0.24$ – стискаючі деформації.

На рис. 5.25 відображено розподіл окружних деформацій ε_θ . Частина стінки напівфабрикату, що контактувала з матрицею має $\varepsilon_\theta = -0.05$ – стискаючі деформації. Середина товщини стінки $\varepsilon_\theta = 0.017$ – незначні за величиною розтягуючі ε_θ . Середня частина стінки на контакті з пуансоном, а

також зона нижнього виступу має $\varepsilon_\theta = 0.07$. Плоска донна частина напівфабрикату має різні за знаком ε_θ . Від стінки до середини плоскої частини дна $\varepsilon_\theta = 0.06 \div 0.22$ – розтягуючі, а від середини плоскої частини дна до вісі симетрії $\varepsilon_\theta = -0.015 \div -0.29$ – стискаючі. Незначна зона верхнього торцю центрального виступу має додатні значення $\varepsilon_\theta = 0.04$ – розтягуючі.

За розподілом інтенсивності деформацій ε_i можна проаналізувати характер пропрацювання матеріалу напівфабрикату пластичною деформацією. На рис. 5.26 показано такий розподіл. Зона верхнього торцю стінки $\varepsilon_i = 0.51 \div 1.1$. Зона де матеріал напівфабрикату було zdeформовано найбільше (зона потоншення стінки) отримано найбільші за величиною значення $\varepsilon_i = 1.4 \div 2.4$. Основний об'єм нижнього виступу $\varepsilon_i = 0.35 \div 0.7$.

Переважає зона плоска донної частини має значення $\varepsilon_i = 0.46 \div 1.3$ і лиш незначна зона $\varepsilon_i = 2.1$ – радіусний перехід плоскої донної частини у центральний виступ.

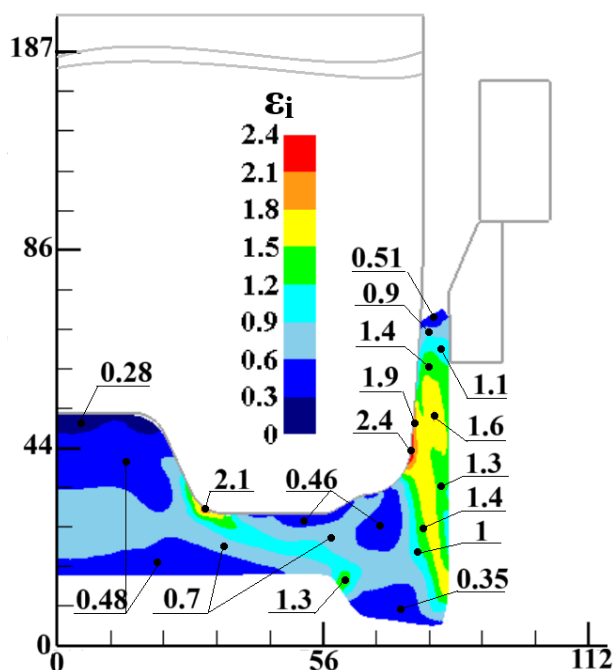


Рисунок 5.26. Розподіл інтенсивності деформацій у напівфабрикаті

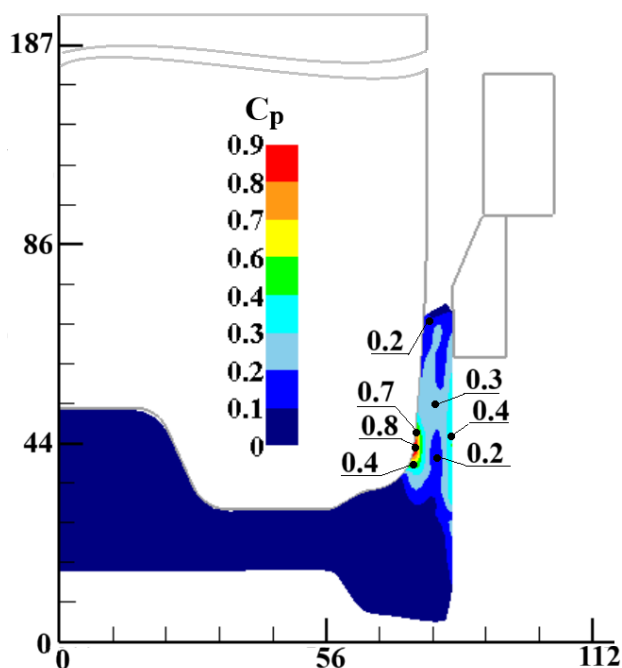


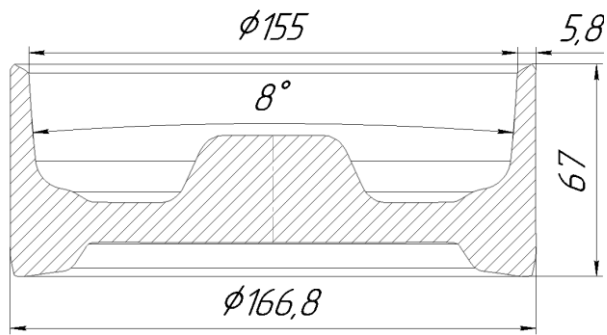
Рисунок 5.27. Коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L

Основний об'єм

центрального виступу має $\varepsilon_i = 0.48 \div 0.7$. Незначна зона центрального виступу у місці контакту з пуансоном $\varepsilon_i = 0.28$.

З проаналізованих джерел в першому розділі відомо, що небезпечні ділянки при операціях витягування з потоншенням стінки порожнистих виробів знаходяться в зоні потоншення стінки, особливо в зоні радіусного переходу донної частини в стінку (відбувається утворення тріщин у вказаній зоні, з подальшим відривом донної частини від стінки). На рис. 5.27 показано розподіл коефіцієнту критерію руйнування C_p по об'єму напівфабрикату. Дивлячись на рис. 5.27 можна побачити, що максимальне значення $C_p = 0.8$ в зоні радіусного переходу дна в стінку (незначна зона, але при проведенні натурного експерименту потрібно звернути увагу чи має місце утворення

тріщин). Переважна частина об'єму матеріалу стінки напівфабрикату має $C_p = 0.3 \div 0.4$.



Отриману форму та основні габаритні розміри напівфабрикату внаслідок операції гарячого витягування з потоншенням зображено на рис. 5.28.

Рисунок 5.28. Форма та основні габаритні розміри напівфабрикату

5.3.5 Проектування штампового оснащення для операції гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату

Після отриманих результатів розрахунків за допомогою МСЕ було спроектовано штампове оснащення для операції гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату. Креслення загального вигляду штампа і специфікація до креслення відображено в Додатку В на рис. В.1 і В.2 відповідно.

Штамп для гарячого витягування з потоншенням складається з верхньої та нижньої частин. Пуансон 3 прикріплюється до верхньої плити 2 за допомогою пуансонотримача 5. Центрування пуансонотримача 5 відносно верхньої плити 2 здійснюється за допомогою штифтів 13, а фіксація за допомогою болтів 14. Нижня частина штампа складається з матриці 4, яка центрується спеціальним виступом відносно спеціальної впадини оправки 6. В свою чергу оправка 6 центрується своїм зовнішнім діаметром відносно відповідного отвору в нижній плиті 1. Матриця 4 і оправка 6 фіксуються до нижньої плити 1 за допомогою кільця 7 та гвинтів 15. В оправці 6 розташовано шість знімачів 8, які підпружинені пружинами 9. Обмеження ходу знімачів 8 здійснюється за допомогою штифтів 12. Для точного направлення верхньої частини штампа відносно нижньої використовуються направляючі втулки 10, які встановлено у верхній плиті 2 і направляючі колонки 11, які встановлено в нижній плиті 1. Гвинти 16 передбачено для зручного перенесення штампа.

Опис роботи штампа. Розігріта заготовка встановлюється на конусну поверхню матриці 4 з центруванням по циліндричній частині кільця 7. При опусканні верхньої плити 2 пуансон 3 деформує розігріту заготовку внаслідок чого утворюється напівфабрикат. Після того, як пуансон 3 опустивсь на задану висоту та сформував геометрію напівфабрикату відбувається зворотній хід верхньої плити 2 разом з пуансоном 3 напівфабрикат при цьому знімається підпружиненими знімачами 8. Вилучення з робочої зони отриманого напівфабрикату здійснюється через спеціальне робоче вікно обойми 6. На рис. 5.29 відображено фото штампа для гарячого витягування з потоншенням, який встановлено на пресі.



Рис. 5.29. Фото штампа для гарячого витягування з потоншенням стінки встановленого на пресі ПА198

На рис. 5.30 відображено фото форми отриманого напівфабрикату в розрізі після проведення натурного експерименту.

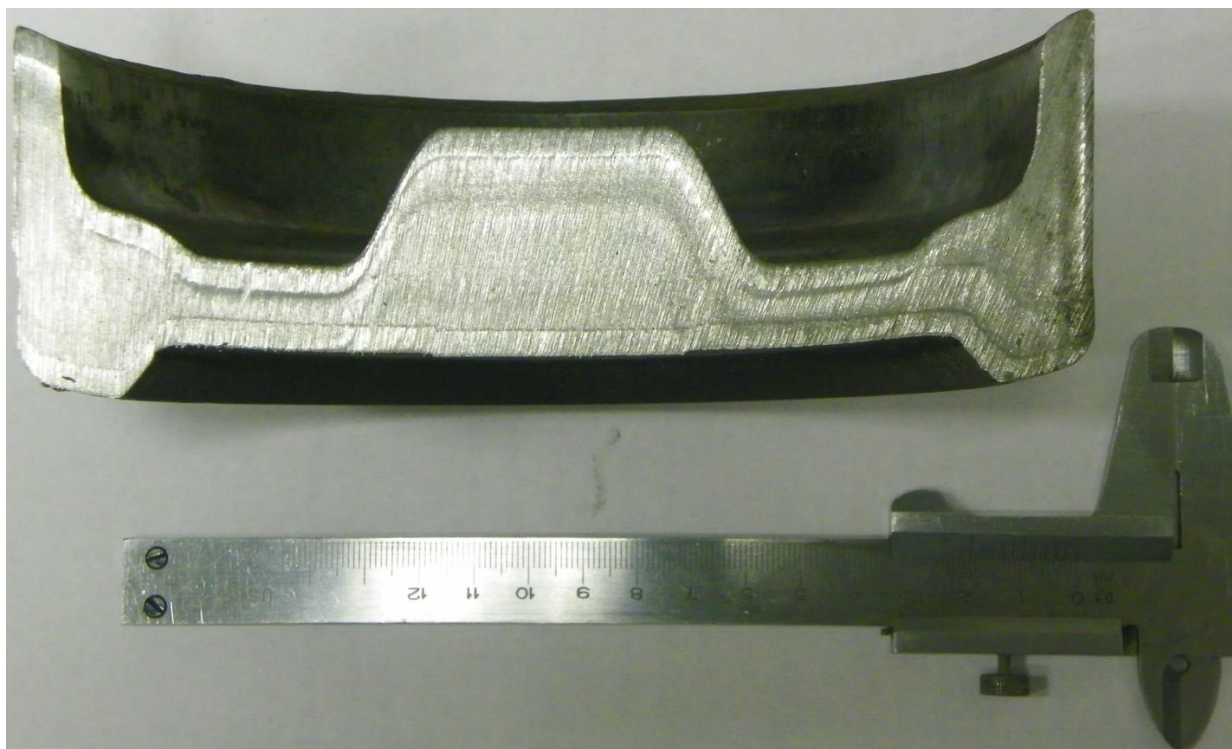


Рис. 5.30. Фото форми отриманого напівфабрикату в розрізі після проведення натурного експерименту

Порівнюючи дані, які приведено на рис. 5.28 і рис. 5.30 можна спостерігати, що отримана геометрія напівфабрикату після операції гарячого витягування з потоншенням внаслідок розрахунків МСЕ (рис. 5.28) і отримана геометрія внаслідок натурного експерименту (рис. 5.30) досить добре збігаються.

5.4 Операція холодного витягування з потоншенням напівфабрикату

5.4.1 Схема процесу холодного витягування з потоншенням

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему холодного витягування з потоншенням, яку відображено на рис. 5.31. Ліворуч від вісі симетрії відображено положення деформуючого інструменту та заготовки на початку процесу холодного витягування з потоншенням а праворуч - в кінці. Заготовка 1 встановлюється на конусну частину і центрується по циліндричній частині матриці 2. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні пуансона 3 на задану відстань зі

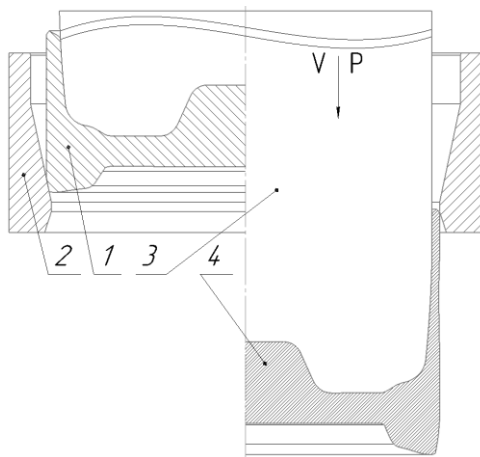


Рис. 5.31. Схема процесу холодного витягування з потоншенням напівфабрикату: 1 – заготовка; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 – напівфабрикат

глибина проникнення сітки – 0,25 мм. Задано пластичну модель матеріалу. Температура матриці і пуансона – 20°C.

5.4.2 Зусилля деформування та питомі зусилля процесу холодного витягування з потоншенням напівфабрикату



Рисунок 5.32. Залежність зусилля холодного витягування з потоншенням від переміщення пуансона

швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 4.

Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: початкова температура заготовки $T = 20^\circ\text{C}$, швидкість переміщення пуансона $V = 16$ мм/с, фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,12$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим інструментом – 5 N/sec/mm/C,

Залежність зусилля холодного витягування з потоншенням напівфабрикату від переміщення пуансона показано на рис. 5.32. Розглядаючи дані, що наведено на рис. 5.32 можна побачити, що на початку процесу витягування зусилля деформування різко зростає до величини 1800 кН при переміщенні пуансона 19 мм. Далі зусилля витягування зменшується до

величини 1500 кН при переміщенні пуансона 30-70 мм після чого зусилля витягування різко зменшується і при переміщенні пуансона на 100 мм сягає нульових значень (кінець процесу витягування).

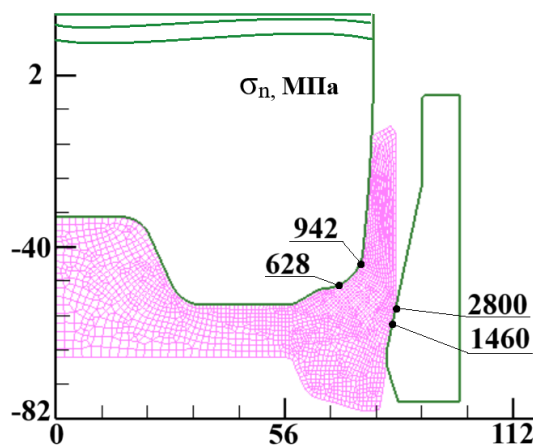


Рисунок 5.33. Розподіл нормальних напружень

Виявлено розподіл нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки та інструмента (рис. 5.33). Максимальні значення σ_n в зоні контакту радіусної поверхні пуансона із здеформованою заготовкою та складає $\sigma_n=628\div942$ МПа, а в зоні контакту здеформованої заготовки із конусною поверхнею матриці на

радіусному переході дна $\sigma_n=1460\div2800$ МПа.

5.4.3 Деформований стан напівфабрикату після операції холодного витягування з потоншенням

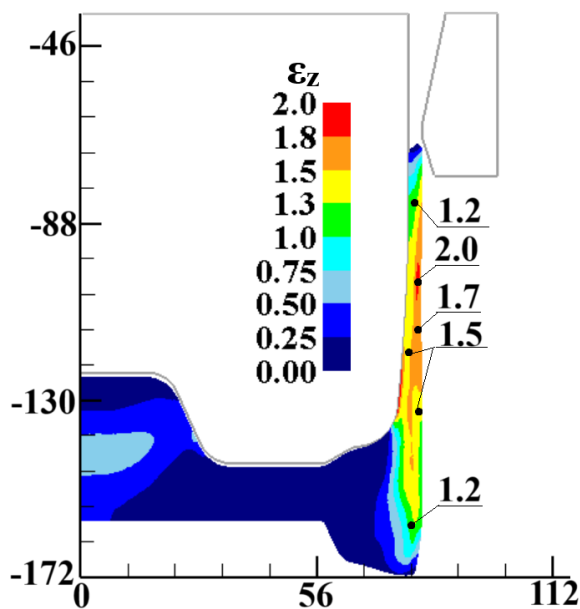


Рисунок 5.34. Розподіл осьових деформацій напівфабрикату

На рис. 5.34 наведено розподіл осьових деформацій ε_z . При цій операції спостерігаються додатні деформації – розтягуючі. Найбільші значення $\varepsilon_z=1.5\div2.0$ в середній частині стінки напівфабрикату. Дещо менше значення $\varepsilon_z=1.2$ – в зоні верхнього торцю та донної частини виступу ближче до зовнішньої поверхні виробу, що контактувала з калібруючим пояском матриці.

Розподіл радіальних деформацій ε_r наведено на рис. 5.35.

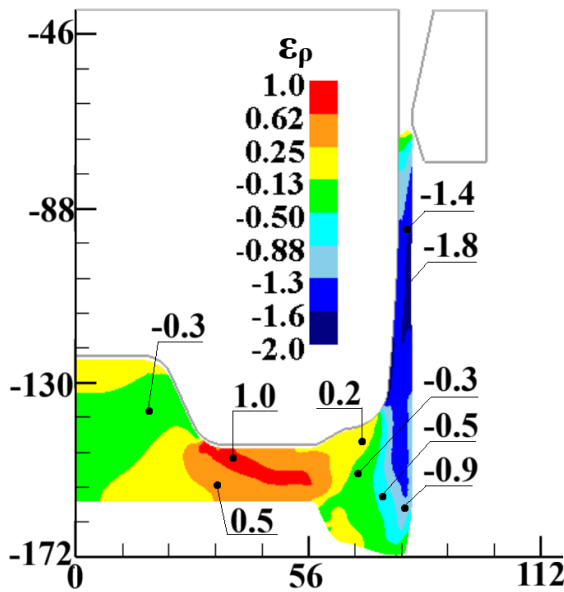


Рисунок 5.35. Розподіл радіальних деформацій у напівфабрикаті

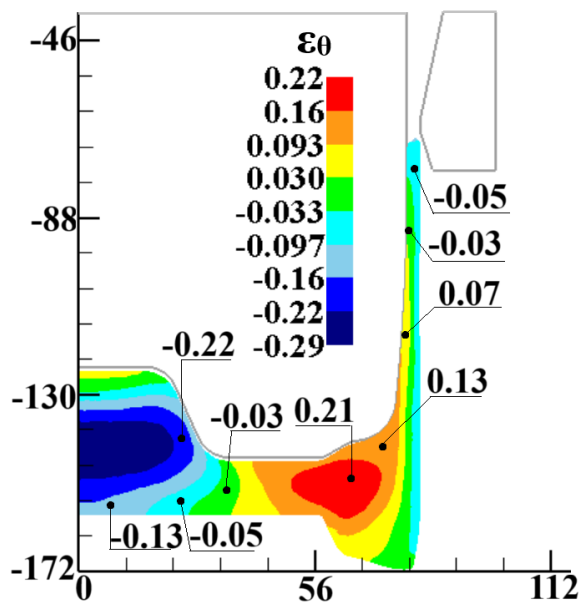


Рисунок 5.36. Розподіл окружних деформацій у напівфабрикаті

В зоні середньої частини стінки $\varepsilon_\rho = -1.4 \div -1.8$ – максимальні стискаючі деформації, зона нижнього торцю має $\varepsilon_\rho = -0.3 \div -0.9$ – стискаючі деформації. В зоні плоскої частини дна $\varepsilon_\rho = 0.2 \div 1.0$ – розтягуючі деформації. Зона центрального виступу має $\varepsilon_\rho = -0.3$ – стискаючі деформації.

На рис. 5.36 відображено розподіл окружних деформацій ε_θ . Поверхня стінки напівфабрикату, що контактувала з матрицею має $\varepsilon_\theta = -0.05$ – стискаючі деформації. Середина товщини стінки $\varepsilon_\theta = -0.03$ – незначні за величиною стискаючі деформації ε_θ . Середня частина стінки на контакті з пуансоном, а також зона нижнього виступу має $\varepsilon_\theta = 0.07$ – розтягуючі деформації. Плоска донна частина напівфабрикату має різні за знаком ε_θ . Від стінки до середини плоскої частини дна $\varepsilon_\theta = 0.13 \div 0.21$ –

розтягуючі, а від середини плоскої частини дна до вісі симетрії $\varepsilon_\theta = -0.03 \div -0.29$ – стискаючі деформації.

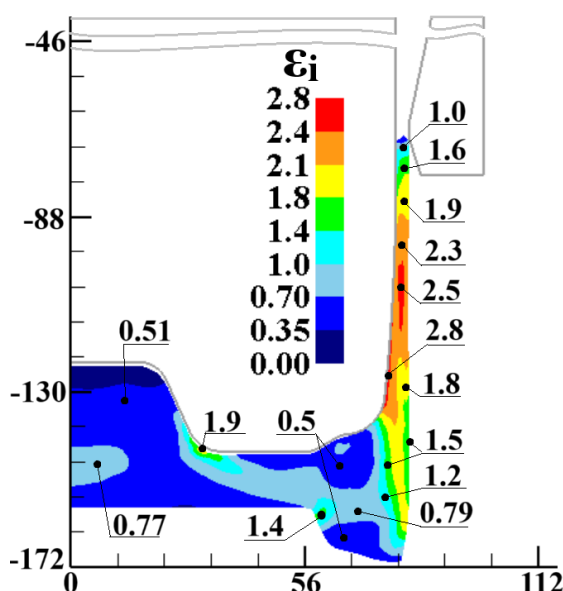


Рисунок 5.37. Розподіл інтенсивності деформацій у напівфабрикаті

основному мають $\varepsilon_i = 0.5 \div 0.77$, окрім радіусного переходу плоскої частини дна у зону виступу $\varepsilon_i = 1.9$.

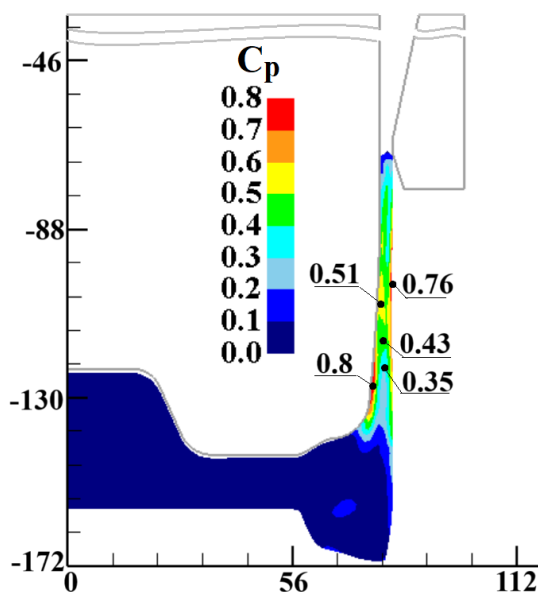


Рисунок 5.38. Коефіцієнт критерію руйнування Normalized C&L напівфабрикату має $C_p = 0.35 \div 0.43$.

За допомогою аналізу розподілу інтенсивності деформації ε_i можна спрогнозувати характер пропрацювання матеріалу виробу пластичною деформацією. Найбільші значення $\varepsilon_i = 2.3 \div 2.8$ (рис. 5.37) в середній частині стінки виробу, верхня частина стінки має дещо менші значення $\varepsilon_i = 1.0 \div 1.9$, зона нижнього виступу $\varepsilon_i = 0.79 \div 1.4$. Плоска частина дна та зона центрального виступу в

На рис. 5.38 відображено розподіл коефіцієнту критерію руйнування Normalized C&L, C_p по об'єму напівфабрикату. Розглянувши рис. 5.38 видно, що максимальне значення $C_p = 0.8$ в зоні радіусного переходу дна в стінку (незначна зона, однак при виконанні натурного дослідження потрібно звернути увагу чи утворюються тріщини). Переважна частина об'єму матеріалу стінки

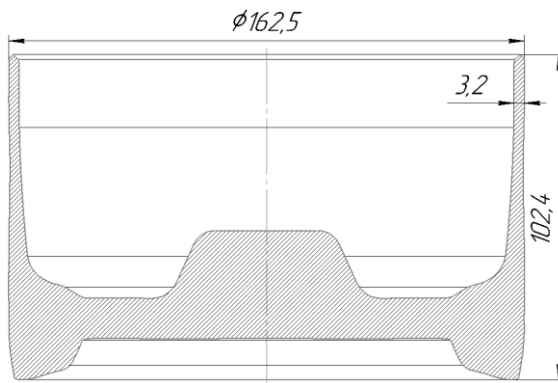


Рисунок 5.39. Форма та основні габаритні розміри напівфабрикату

Форму та основні габаритні розміри отриманого напівфабрикату за допомогою МСЕ внаслідок операції холодного витягування з потоншенням показано на рис. 5.39.

5.4.4 Проектування штампового оснащення для операції холодного витягування з потоншенням напівфабрикату

Після проведення та аналізу розрахунків за допомогою МСЕ було спроектовано штампове оснащення для операції холодного витягування з потоншенням напівфабрикату. Креслення загального вигляду штампа і специфікація до креслення відображено в Додатку Г на рис. Г.1 і Г.2 відповідно.

Штамп для холодного витягування з потоншенням складається з верхньої та нижньої частин. Пуансон 9 прикріплюється до верхньої плити 8 за допомогою пуансонотримача 10. Центрування пуансонотримача 10 відносно верхньої плити 8 здійснюється за допомогою штифтів 17, а фіксація за допомогою болтів 16. Нижня частина штампа складається зі вставки 6, яка центрується по спеціальному отвору в нижній плиті 7. На вставку 6 встановлюється проміжна оправка 3. На проміжну оправку 3 встановлюється матриця 1, яка центрується спеціальним виступом відносно проміжної оправки 3. На матрицю 1 встановлюється оправка 2, центрування оправки 2 відносно матриці 1 здійснюється за допомогою спеціальних виступів. В оправку 2 встановлено кільце центруюче 19 для центрування заготовки перед витягуванням. Вставка 6 фіксується до нижньої плити за допомогою гвинтів 15, а оправка 2, матриця 1 та проміжна оправка 3 фіксується до вставки 6 за допомогою гвинтів 14. Для зняття отриманого напівфабрикату з пуансона

передбачено шість знімачів 4, які підпружинені пружинами 5. Для точного направлення верхньої частини штампа відносно нижньої використовуються направляючі втулки 13, які встановлено у верхній плиті 8 і направляючі колонки 12, які встановлено в нижній плиті 7. Гвинти 11 передбачено для зручного перенесення штампа.

Опис роботи штампа. Заготовка, що має кімнатну температуру встановлюється в кільце центруюче 19. При опусканні верхньої плити 8 пуансон 9 деформує заготовку внаслідок чого утворюється напівфабрикат. Після того, як пуансон 9 опустивсь на задану висоту та сформував геометрію напівфабрикату відбувається зворотній хід верхньої плити 8 разом з пуансоном 9 напівфабрикат при цьому знімається підпружиненими знімачами 4. Вилучення з робочої зони отриманого напівфабрикату здійснюється через спеціальне робоче вікно вставки 6. На рис. 5.40 відображено фото штампа для холодного витягування з потоншенням, який встановлено на пресі.



Рис. 5.40. Фото штампа для холодного витягування з потоншенням стінки встановленого на пресі ПА198

На рис. 5.41 відображено фото форми отриманого напівфабрикату в розрізі після проведення натурального експерименту.



Рис. 5.41. Фото форми отриманого напівфабрикату в розрізі після проведення натурального експерименту

Порівнюючи дані, що показано на рис. 5.39 і рис. 5.41 можна спостерігати, що отримана форма напівфабрикату після операції холодного витягування з потоншенням внаслідок розрахунків МСЕ (рис. 5.39) і отримана форма внаслідок натурального експерименту (рис. 5.41) досить добре збігаються.

5.5 Операція гарячого осаджування фланця напівфабрикату

5.5.1 Схема процесу гарячого осаджування фланця

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого осаджування фланця, яку зображено на рис. 5.42. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу гарячого осаджування фланця а праворуч - в кінці. Заготовка 1 встановлюється на оправку 2. Матриця 3 слугує для обмеження течії матеріалу виробу для формування виступу. Процес деформування із зусиллям

P виконується при опусканні плити 4 на задану відстань зі швидкістю V , внаслідок чого утворюється напівфабрикат 5.

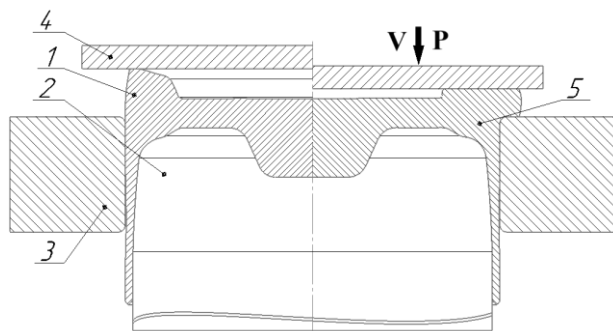


Рис. 5.42. Схема процесу гарячого осаджування фланця напівфабрикату:

1 – заготовка; 2 – оправка; 3 – матриця; 4 – плита; 5 – напівфабрикат

інструментом – 5 N/sec/mm/C, глибина проникнення сітки – 0,25 мм. Модель матеріалу - пластична. Температура матриці і пуансона – 20°C.

Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: початкова температура заготовки $T = 20^\circ\text{C}$, швидкість переміщення пуансона $V = 16$ мм/с, фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,12$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим

5.5.2 Зусилля деформування та питомі зусилля процесу гарячого осаджування фланця напівфабрикату



Рисунок 5.43. Залежність зусилля гарячого осаджування фланця від переміщення плити

На рис. 5.43 відображено залежність зусилля гарячого осаджування фланця від переміщення плити. Зусилля осаджування протягом всього переміщення плити поступово зростає та досягає свого максимального значення 5,5 МН при переміщенні плити на 9 мм – кінець процесу осаджування.

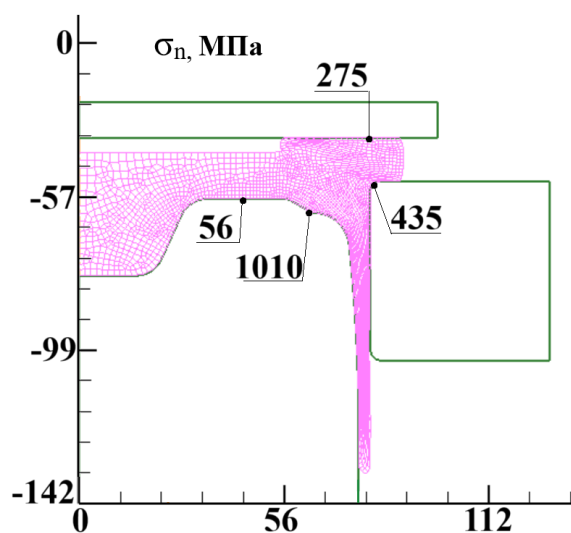


Рисунок 5.44. Розподіл нормальних напружень

Виявлено розподіл нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях напівфабрикату та інструмента (рис. 5.44). Максимальні значення σ_n в зоні контакту пуансона із напівфабрикатом складає $\sigma_n=1010$ МПа, в зоні контакту напівфабрикату із матрицею в зоні заокруглення матриці $\sigma_n=435$ МПа та в зоні контакту плити із напівфабрикатом $\sigma_n=275$ МПа.

5.5.3 Деформований стан напівфабрикату після операції гарячого осаджування фланця напівфабрикату

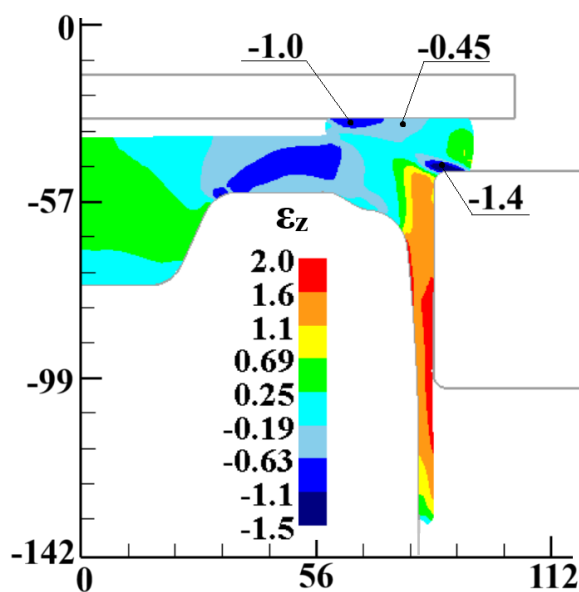


Рисунок 5.45. Розподіл осьових деформацій напівфабрикату

На рис. 5.45 наведено розподіл осьових деформацій ε_z . У місці де матеріал напівфабрикату було zdeформовано спостережена зміна величини ε_z з додатних значень стали від'ємними тобто стискаючі деформації. У зоні контакту напівфабрикату із заокругленням матриці відбувається найбільше стиснення $\varepsilon_z=-1.4$, а в зоні контакту плити з напівфабрикатом дещо менше стиснення $\varepsilon_z=-0.45 \div -1.0$. По

всьому іншому об'єму отриманого напівфабрикату значних змін ε_z не відбулось, тобто значення ε_z в доній частині виробу та у стінці відповідають значенням ε_z , що отримано після попередніх формозмінних операцій.

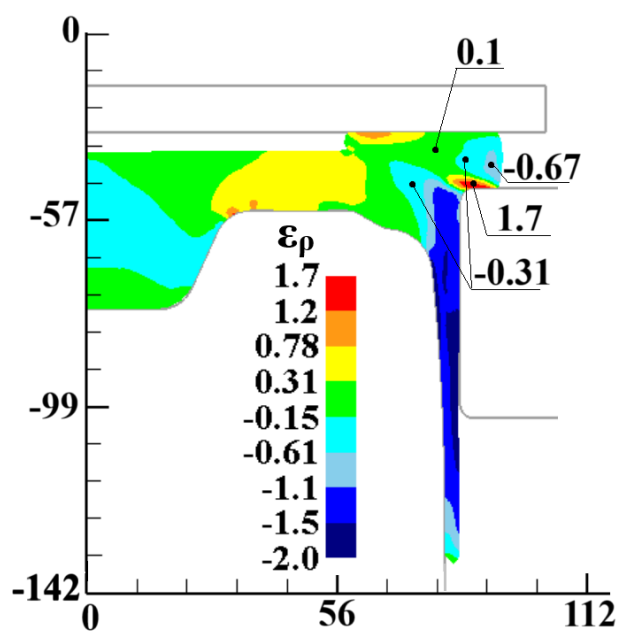


Рисунок 5.46. Розподіл радіальних деформацій у напівфабрикаті

деформації.

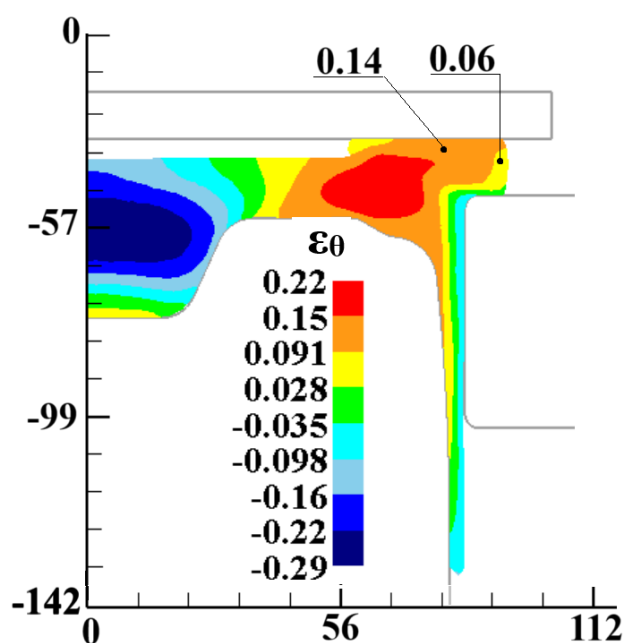


Рисунок 5.47. Розподіл окружних деформацій у напівфабрикаті

Розподіл радіальних деформацій ε_ρ в зоні де матеріал напівфабрикату піддавався деформування відображено на рис. 5.46. Незначна зона напівфабрикату, що контактує радіусним заокругленням матриці має $\varepsilon_\rho = 1.7$ – розтягуючі деформації. Основний об'єм сформованого виступу $\varepsilon_\rho = 0.1$. У вказаних зонах рис. 5.46 значення $\varepsilon_\rho = -0.31 \div -0.67$ – стискаючі

На рис. 5.47 відображено розподіл окружних деформацій ε_θ в зоні де відбувалось пластичне деформування виробу. У вказаних зонах на рис. 5.47 величина $\varepsilon_\theta = 0.06$ та $\varepsilon_\theta = 0.14$ – розтягуючі деформації.

Розподіл інтенсивності деформацій по всьому об'єму напівфабрикату показано на рис. 5.48. Основний об'єм донної частини напівфабрикату має $\varepsilon_i = 0.67$. В зоні контакту виробу з

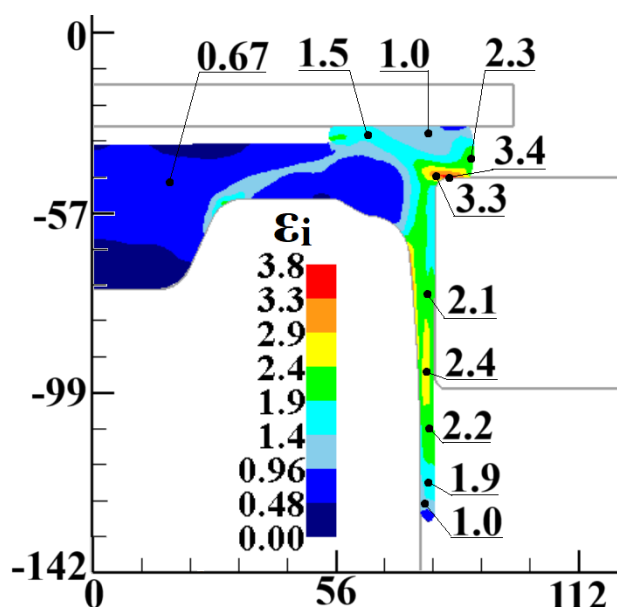


Рисунок 5.48. Розподіл інтенсивності деформацій у напівфабрикаті

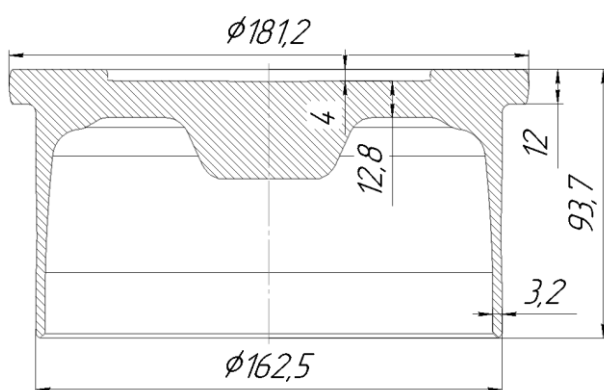


Рисунок 5.49. Форма та основні розміри напівфабрикату

плитою $\varepsilon_i = 1.0 \div 2.3$, а в місці радіусного заокруглення матриці $\varepsilon_i = 3.3 \div 3.4$. Середня частина стінки виробу $\varepsilon_i = 2.1 \div 2.4$, а зона верхнього торцю стінки $\varepsilon_i = 1.0 \div 1.9$.

На рис. 5.49 зображено форму та основні розміри отриманого напівфабрикату МСЕ після операції гарячого осаджування фланцю. Варто зазначити, що згідно отриманого напівфабрикату рис. 5.49, сформований діаметр 181,2 мм та висота виступу 12 мм є достатніми для подальшого механічного доопрацювання донної частини виробу, тобто об'єм матеріалу згідно розрахунків МСЕ є вірним.

Фото отриманого виробу після проведення натурних експериментів внаслідок операцій гарячого осаджування фланця, проточування фланця та свердління отвору під капсуль-запальник показано на рис. 5.50.

Кінцеве формоутворення напівфабрикату реалізовувалось методом ротаційного витягування. Ротаційне витягування (РВ) реалізовувалось на універсальному токарному верстаті 16К20. В патрон верстату встановлювалась оправка на яку установлювалась заготовка, після останнього переходу витягування (рис. 5.51а). Центрування заготовки реалізовувалось внутрішнім виступом, під капсульну втулку, на заготовці.

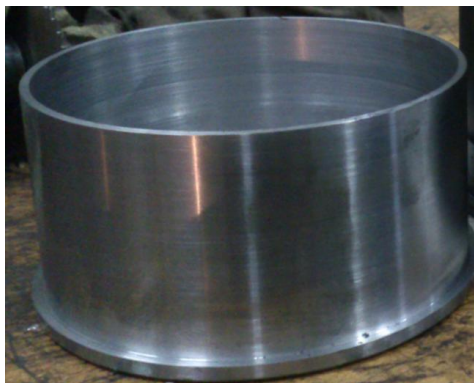


Рисунок 5.50. Фото форми
отриманого напівфабрикату після
проведення натурного експерименту

Далі заготовка фіксується підпором, за допомогою задньої бабки верстату. Витягування реалізовувалось роликком (Додаток Д). Оптимальну форму та розміри ролика було встановлено експериментальним шляхом. Витягування до кінцевої форми та розмірів стінки реалізовувалось по переходно (перехід відповідає

одному проходу ролика по довжині заготовки). Робочі режими РВ наведено в таблиці 5.1.

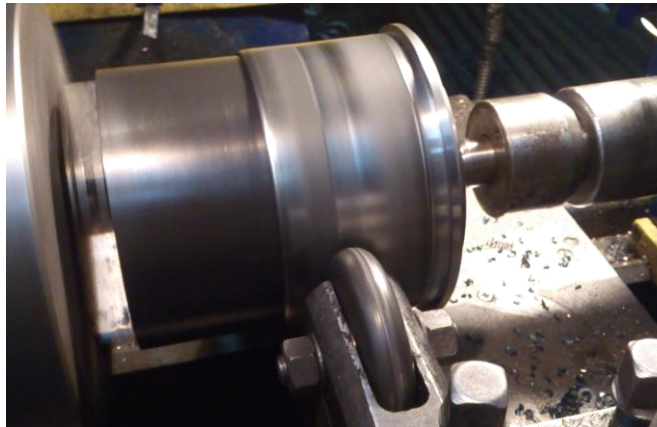
Таблиця 5.1. Робочі режими РВ

№ проходу ролика	Чистота, об/хв	Тип поверхні, що формується	Величина вдавлювання, мм	Подача, мм/об
1	800	Циліндр	0,2	0,1
2				
3				
4				
5	800	Конус	0,2	0,25
6				
7				
8				
9				
10				
11	1000	Конус	0,15	0,05
12				
13				
14				

Перші чотири проходи виконували формування по зовнішньому контуру циліндричну поверхню. На цьому етапі РВ реалізовувалось усунення недоліків, які виникли на етапі формоутворення в штампах. Такими недоліками є різнотонність та поверхневі нерівності після термічної обробки (із-за окалини). На наступному етапі формували конічну зовнішню поверхню

стілки за 9 проходів, з них перші 5 проходів при вдавлюванні на 0,2 мм та подачі 0,25 мм/об, а для останніх 4 проходів було зменшено вдавлювання до 0,15 мм при цьому подачу також зменшено до 0,05 мм/об. При зменшенні товщини стінки рекомендується знижувати величину вдавлювання, щоб уникнути роздачі внутрішнього розміру заготовки.

На рис. 5.51б відображено фото напівфабрикатів до та після операції ротаційного витягування.



а



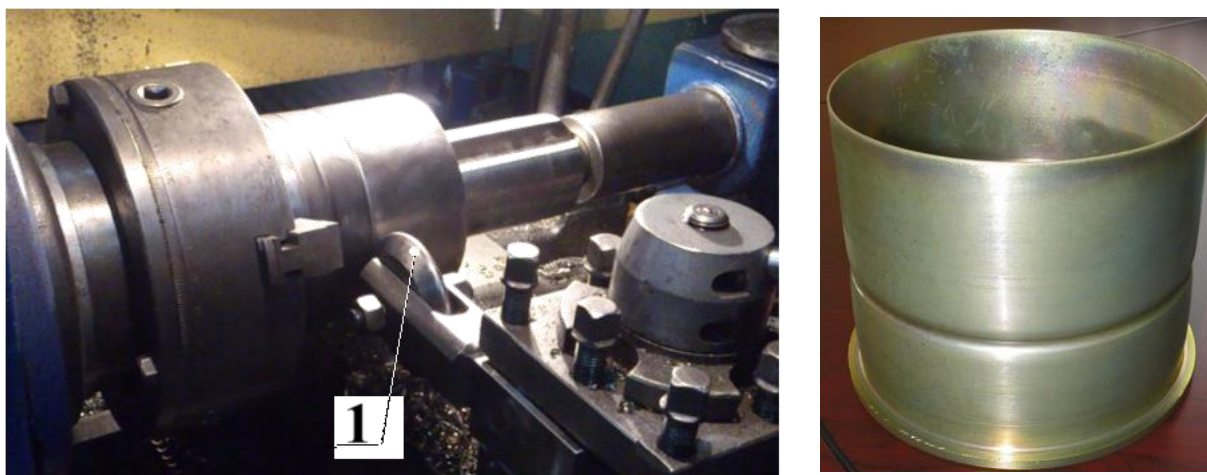
б

Рис. 5.51. Фото операції ротаційного витягування: а -процес ротаційного витягування, б – напівфабрикат до та після операції ротаційного витягування

На останній операції виконується формоутворення рифту. Для формоутворення рифту було спроектовано оснащення (рис. 5.52а): ролик формуючий 1 та ролик притискний 2, який встановлюється на оправці в задню бабку станка. Притискний ролик заводиться з внутрішньої сторони напівфабрикату до позиції формування рифту. Далі за три проходи виконується вдавлювання ролика формуючого 1. На рис. 5.52б відображено фото отриманого виробу після антикорозійного покриття. В таблиці 5.2 наведено робочі режими формоутворення рифту.

Таблиця 5.2. Робочі режими формоутворення рифту

№ проходу ролика	Чистота, об/хв	Тип поверхні, що формується	Величина вдавлювання, мм	Подача, мм/об
1	1000	рифт	0,5	-
2				
3				



а

б

Рис. 5.52. Фото операції ротаційного витягування: а -процес ротаційного витягування, б – фото готового виробу

Після отримання необхідної товщини та розмірів стінки тут же на оправці було виконано механічну обробку по зовнішнім розмірам, згідно креслення деталі. Таким чином було підготовлено базу для переустановлення напівфабрикату в патроні верстату для механічної обробки напівфабрикату зі сторони донної частини по зовнішньому контуру та під капсульну втулку.

Така технологія дозволила зменшити, мінімум два переходи витягування в штампах та одного переходу обтиску. Крім того використовуючи на фінішному етапі технологію РВ дозволило усунути недоліки, які виникли на попередніх етапах формоутворення.

Дану технологію можна впроваджувати на сучасних автоматизованих ротаційно-давильних верстатах, які будуть значно продуктивніше ніж застосований тут верстат 16K20.

Подальшою операцією було накатування рифу. Фото процесу накатування рифу показано на рис. 5.52а, а фото отриманого виробу відображено на рис. 5.52б.

В додатку Ж на рис. Ж.1 відображено результати замірів механічних характеристик та механічні характеристики згідно креслення для порівняння.

5.6 Висновки

1 Визначено об'єм початкової заготовки та схему зворотного видавлювання для розрахунку МСЕ. Встановлено максимальне зусилля гарячого зворотного видавлювання 12,2 МН, а також максимальні питомі зусилля, що сприймає деформуючий інструмент: матриця – 430 МПа, пуансон – 1060 МПа та виштовхувач – 1200 МПа. Виявлено розподіл температури в кінці процесу деформування, напружено-деформований стан та форму і розміри напівфабрикату отриманого за допомогою МСЕ. Спроектовано штампове оснащення для проведення натурного експерименту. Отримано напівфабрикат натурним експериментом. Геометрія напівфабрикату внаслідок розрахунків МСЕ і геометрія внаслідок натурного експерименту досить добре збігаються.

2 Визначено схему процесу гарячого витягування з потоншенням для проведення розрахунків МСЕ та натурного експерименту. Максимальне зусилля деформування 2 МН при переміщенні пуансона 18,7 мм. Встановлено максимальні питомі зусилля на матриці – 1160 МПа та на пуансоні – 790 МПа. Виявлено розподіл температури в кінці процесу деформування та деформований стан напівфабрикату. Проаналізовано значення критерію руйнування, найбільше значення 0,8 в зоні радіусного переходу донної частини в стінку напівфабрикату. Отримано форму та розміри виробу розрахунком МСЕ. Спроектовано штампове оснащення для проведення натурного експерименту. Отримано виріб натурним експериментом. Форма та розміри виробу внаслідок розрахунків МСЕ і натурного експерименту досить добре збігаються. У місці де при розрахунках МСЕ критерій руйнування сягнув величини 0,8 при проведенні натурного експерименту тріщин не виявлено, що вказує на те, що в подальшій роботі можна збільшити ступінь деформації.

3 Визначено схему процесу холодного витягування з потоншенням для проведення розрахунків МСЕ та натурного експерименту. Встановлено максимальне зусилля деформування 1800 кН при переміщенні пуансона 19 мм.

Встановлено максимальні питомі зусилля на матриці – 2800 МПа та на пуансоні – 942 МПа. Виявлено деформований стан виробу. Найбільше значення $\varepsilon_i = 2.3 \div 2.8$ по середині висоти стінки виробу, що вказує про досить добре пропрацювання матеріалу виробу пластичною деформацією. Проаналізовано значення критерію руйнування, найбільше значення 0,8 в зоні радіусного переходу донної частини в стінку виробу, а також 0,76 на зовнішній поверхні виробу. Отримано форму та розміри виробу розрахунком МСЕ. Спроектовано штампове оснащення для проведення натурного експерименту. Отримано виріб натурним експериментом. Форма виробу внаслідок розрахунків МСЕ і натурного експерименту досить добре збігаються. Проаналізовано зони виробу отриманого натурним експериментом, де при розрахунках МСЕ було найбільше значення критерію руйнування, дефектів у вигляді тріщин та сколів не виявлено.

4 Визначено схему процесу гарячого осаджування фланцю для проведення розрахунків МСЕ та натурного експерименту. Максимальне зусилля деформування 5,5 МН при переміщенні плити 9 мм. Встановлено максимальні питомі зусилля на матриці – 435 МПа, на оправці 1010 МПа та на плиті – 275 МПа. Виявлено деформований стан виробу. Отримано форму та розміри виробу розрахунком МСЕ та натурним експериментом. Форма виробу внаслідок розрахунків МСЕ і натурного експерименту досить добре збігаються.

5 Визначено схему процесу РВ та накатування рифту. Назначено робочі режими РВ та накатування рифту. Застосування РВ та накатування рифту дозволило зменшити, мінімум два переходи витягування в штампах та одного переходу обтиску. Внаслідок описаної технології в цьому розділі вдалось отримати виріб з формою та розмірами згідно отриманого креслення деталі.

РОЗДІЛ 6

ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГІЛЬЗИ ДЛЯ 125 мм ТАНКОВОГО ПОСТРІЛУ ІЗ ЗАГОТОВКИ КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ

6.1 Форма та розміри готового виробу та визначення форми та розмірів вихідної заготовки

В попередньому розділі на рис. 5.1 наведено форму та розміри готового виробу. Матеріал виробу сталь марки 11ЮА. За допомогою умови рівності об'ємів готової деталі та вихідної заготовки $V_{\text{дет}}=V_{\text{заг}}$ можна визначити необхідний об'єм початкової заготовки. Об'єм готового виробу, що відображено на рис. 5.1 – $V_{\text{дет}}=464365,19 \text{ мм}^3$. Також при визначенні $V_{\text{заг}}$ необхідно врахувати об'єм металу, який буде втрачено внаслідок очищення проміжних напівфабрикатів від окалини після гарячого деформування, об'єм металу, що піде в стружку при торцюванні та отриманні отвору під капсуль-запальник. З врахуванням наведених даних було визначено форму та розміри вихідної заготовки. Вихідна заготовка квадратного перерізу має розміри сторін $110 \times 110 \text{ мм}$ та висоту 40 мм . Об'єм такої заготовки $V_{\text{заг}}=558374,5 \text{ мм}^3$.

6.2 Операція гарячого осаджування напівфабрикату

6.2.1 Схема процесу гарячого осаджування фасок в кутових зонах напівфабрикату

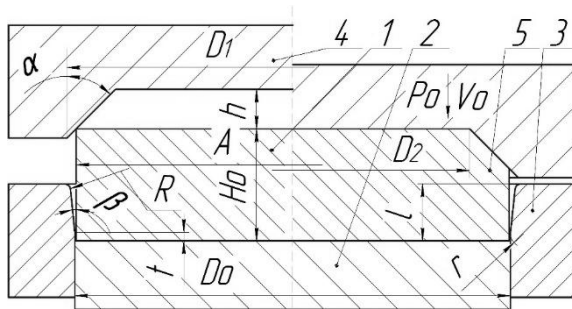


Рисунок 6.1. Схема процесу гарячого осаджування фасок в кутових зонах напівфабрикату: 1 – заготовка, 2 – плита, 3 – матриця, 4 – пуансон, 5 – здеформована заготовка

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого осаджування, яку відображено на рис. 6.1. Ліворуч від вісі симетрії зображено положення робочого інструменту та заготовки на початку процесу гарячого осаджування а праворуч - в кінці

осаджування. Заготовка 1 квадратного перерізу з розмірами 116,7x116,7 мм (в холодному стані 115x115 мм) і висотою 42,5 мм та по діагоналях $A=165$ мм та встановлено на плиті 2 з центрування по матриці 3 діаметром $D_0=165,5$ мм. При опусканні пуансону 4 з діаметром $D_1=172$ мм на висоту h зі швидкістю V_0 і дії зусилля P_0 відбувається формоутворення фасок діаметром D_2 під кутом α в кутових зонах заготовки 1. Розміри α і D_2 змінювали для досягнення усунення виступів на торці стінки напівфабрикату при подальшому зворотного видавлювання з роздачою.

Для проведення розрахунків МСЕ використовувалась програма DEFORM. В програмі DEFORM матеріал марки Сталь 11ЮА або його аналог відсутній, тому було обрано найближчий схожий матеріал по кривим зміцнення – AISI-1015. Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: початкова температура заготовки $T = 1000^\circ\text{C}$, швидкість переміщення пуансона $V = 80$ мм/с фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,25$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим інструментом – 11 N/sec/mm/C, глибина проникнення сітки – 0,7 мм. Задано пластичну модель матеріалу. Температура плити, матриці і пуансона – 400°C .

6.2.2 Зусилля деформування процесу гарячого осаджування фасок в кутових зонах

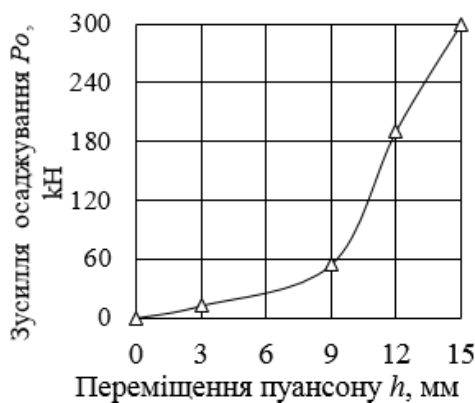


Рисунок 6.2. Залежність зусилля осаджування P_0 від переміщення пуансона h

Залежність зусилля осаджування від переміщення пуансона представлено на рис. 6.2. Зусилля постійно зростає і досягає максимального значення $P_0=300$ кН при переміщенні пуансона $h=5$ мм. Невелике значення зусилля осаджування дозволяє здійснити

суміщення осаджування з видавлюванням в одному штампі.

6.2.3 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату

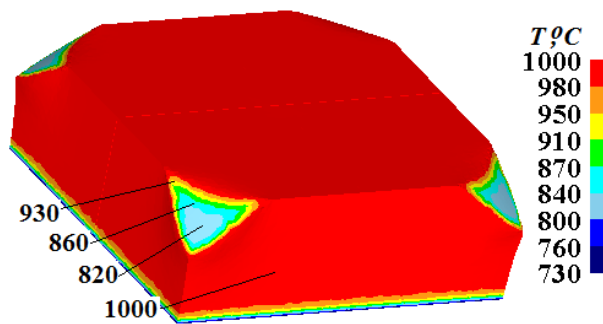


Рисунок 6.3. Здеформована заготовка з фасками в кутових зонах і розподілом температури ($T^{\circ}\text{C}$) по об'єму

На рис. 6.3 представлено zdeформовану заготовку з фасками в кутових зонах і розподілом температури по об'єму. В місцях утворення фасок спостерігається охолодження металу з $T=1000^{\circ}\text{C}$ до температури $T=820^{\circ}\text{C}$.

6.2.4 Розподіл інтенсивності деформацій

Значення напружень у напівфабрикаті відображено при максимальному зусиллі деформування, яке спостерігається в кінці видавлювання.

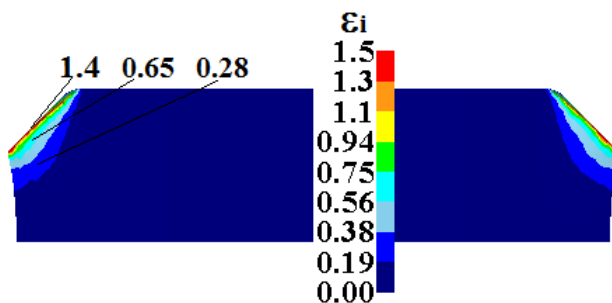


Рисунок 6.4. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i у zdeформованій заготовці після осаджування

Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в перерізі по діагоналі zdeформованої заготовки показано на рис. 6.4. В кутових зонах відбувається певне пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією на глибину до 10 мм, яке було

враховано при видавлюванні. У зовнішніх шарах металу фаски отримано інтенсивність деформацій у межах $\epsilon_i=1,3\dots1,5$ з подальшим зменшенням до $\epsilon_i=0,19\dots0,38$ при наближенні до наближенні до границі осередку деформації.

6.3.2 Зусилля деформування процесу гарячого видавлювання з роздачою круглого порожнистого напівфабрикату

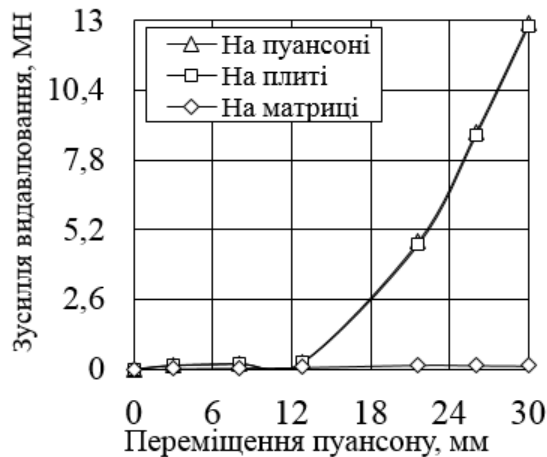


Рисунок 6.5. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона при видавлюванні

пуансона 21 мм. Вказані зусилля потрібно враховувати при виборі пресового обладнання і проектуванні плит штампу.

6.3.3 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату

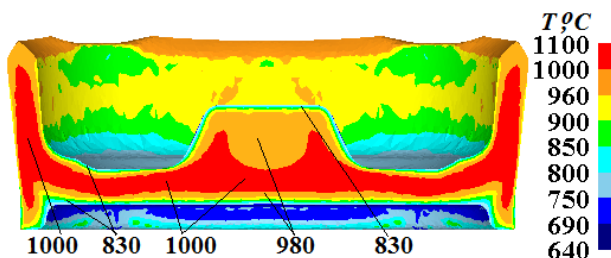


Рисунок 6.6. Розподіл температури

($T^{\circ}\text{C}$) по об'єму половини

напівфабрикату в кінці видавлювання. Виявлено розподіл температури у zdeформованому металі по об'єму половини напівфабрикату в кінці видавлювання, який зображено на рис. 9. Швидкість деформування $V=40$ мм/сек забезпечує витримку температурного інтервалу гарячого видавлювання. У стінці і донній частині отримано $T=1000^{\circ}\text{C}$. Також встановлено охолодження шарів металу до $T=830^{\circ}\text{C}$ поблизу контактуючих поверхонь з пуансоном, плитою і матрицею. Такий розподіл дозволяє виконати наступний перехід витягування з потоншенням цього напівфабрикату в режимах гарячої і напівгарячої деформації.

6.3.4 Напружений стан напівфабрикату в кінці видавлювання

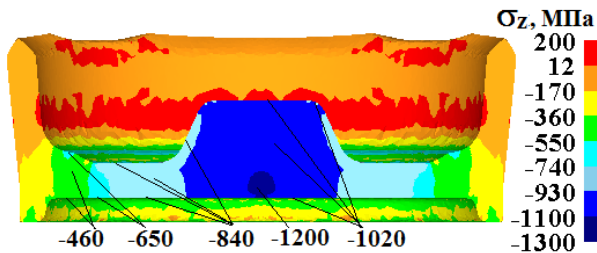


Рисунок 6.7. Розподіл осьових напружень у напівфабрикаті

Розрахунковим аналізом визначено напружений стан металу у напівфабрикаті в кінці видавлювання. Розподіл осьових напружень σ_z по об'єму половини напівфабрикату приведено на рис.

10. Великий інтерес представляє розподіл напруження σ_z , по якому можна оцінити питомі зусилля на контактуючих поверхнях з пуансоном і плитою (рис. 6.7). В донній частині напівфабрикату виникають стискаючі напруження σ_z у межах $\sigma_z = -170 \dots -1300$ МПа. У стінці мають місце невеликі стискаючі напруження σ_z . Найбільші питомі зусилля величиною $1020 \dots 1200$ МПа діють на поверхнях з плитою і торцем пуансона в місці контакту з виступом донної частини.

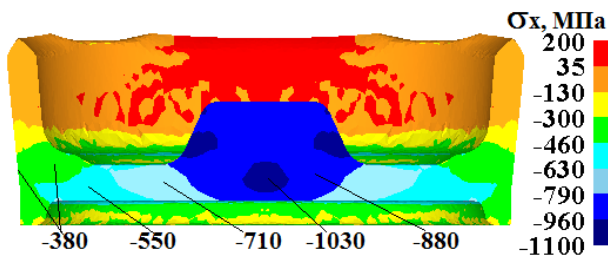


Рисунок 6.8. Розподіл напружень σ_x у напівфабрикаті

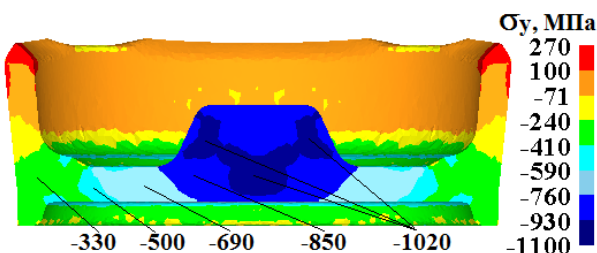


Рисунок 6.9. Розподіл напружень σ_y у напівфабрикаті

Також у донній частині напівфабрикату отримано стискаючі напруження σ_x (рис. 6.8) і σ_y (рис. 6.9). Вигляди розподілів і величини напружень приблизно однакові. Ці напруження знаходяться у межах $-460 \dots -1030$ МПа. На поверхні заготовки з матрицею по напруженню σ_x можна встановити питомі зусилля, які в даному випадку досягають 380 МПа.

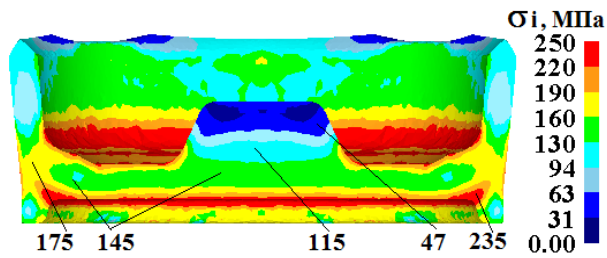


Рисунок 6.10. Розподіл інтенсивності напружень σ_i у напівфабрикаті напівфабрикату в кінці видавлювання

В місці переходу стінки у донну частину отримано $\sigma_i=175$ МПа, а більша частина об'єму має $\sigma_i=145$ МПа.

6.3.5 Деформований стан напівфабрикату в кінці видавлювання

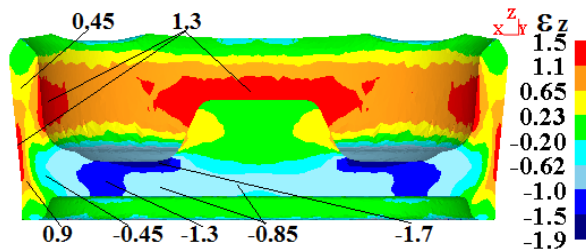


Рисунок 6.11. Розподіл осьових деформацій у напівфабрикаті

Розподіл деформацій ε_z у напівфабрикаті представлено на рис. 6.11. У стінці напівфабрикату виникають розтягувальні деформації величиною $\varepsilon_z=0,45$, а в зовнішніх шарах металу області

переходу стінки у донну частину ці деформації досягають значення $\varepsilon_z=1,3$. У донній частині деформації стають стискаючими та знаходяться у межах $\varepsilon_z = -0,45 \dots -1,7$.

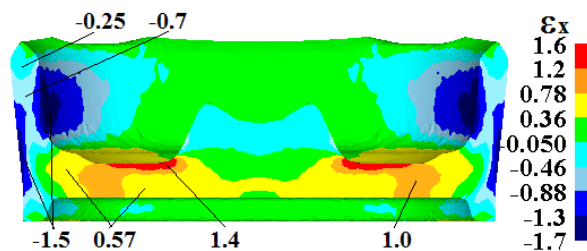


Рисунок 6.12. Розподіл деформацій ε_x у напівфабрикаті

Деформації ε_x у стінці отримано стискаючими у межах $\varepsilon_x=-0,25 \dots -0,7$. В зовнішніх шарах металу місця переходу в донну частину $\varepsilon_x=-1,5$, а в самій донній частині ці деформації стають

розтягуючими у межах $\varepsilon_x=0,57 \dots 1,4$ (рис. 6.12).

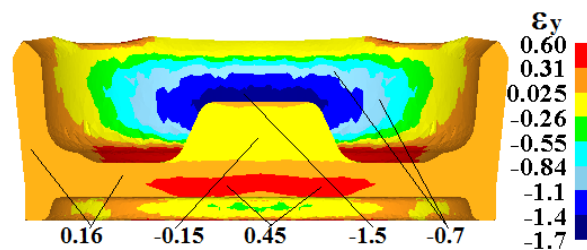


Рисунок 6.12. Розподіл деформацій ε_y у напівфабрикаті

У стінці та в об'ємі донної частини напівфабрикату виникають розтягувальні деформації ε_y (рис. 6.12). Найбільші значення $\varepsilon_y=0,31 \dots 0,6$ отримано в зоні вісі симетрії напівфабрикату.

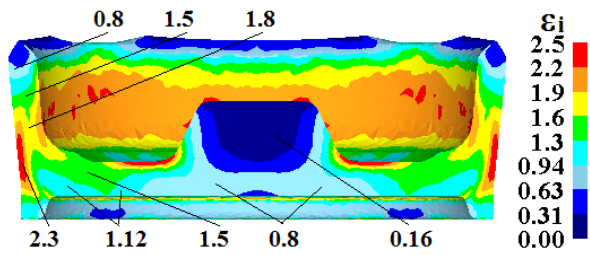


Рисунок 6.13. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i у напівфабрикаті

Інтенсивне пропрацювання відбувається у донній частині з досягненням $\varepsilon_i=0,8 \dots 1,5$. У зовнішніх шарах металу місця переходу стінки у донну частину отримано $\varepsilon_i=2,3$. У самій стінці величина інтенсивності деформацій зменшується від $\varepsilon_i=1,8$ до $\varepsilon_i=0,8$ при наближенні до торця стінки.

Таким чином, наведені величини ε_i у донній частині напівфабрикату можуть бути достатніми для отримання потрібних механічних властивостей. Такі властивості у стінці забезпечуються на переходах витягування з потоншенням.

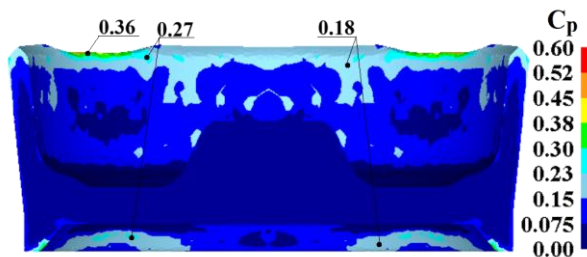


Рисунок 6.14. Коефіцієнт критерію руйнування C_p Normalized C&L

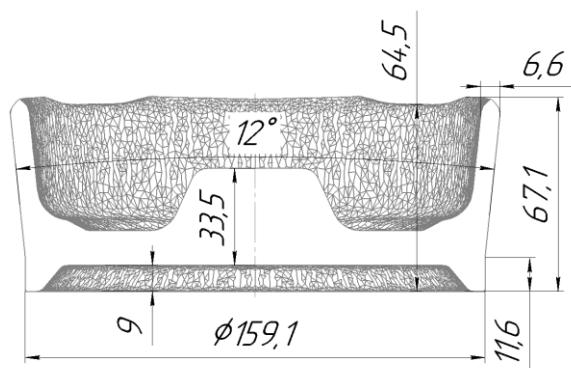


Рисунок 6.15. Форма та основні розміри напівфабрикату

показано на рис. 6.15.

Результуюче пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i по об'єму напівфабрикату (рис. 6.13).

На рис. 6.14 відображено розподіл коефіцієнту критерію руйнування C_p Normalized C&L. Видно, що найбільше значення вказаного критерію 0.36 знаходиться на верхньому торці напівфабрикату в зоні де

відбувалось осаджування фасок в кутових зонах заготовки. При подальших операціях витягування варто звертати увагу на зони виробу, що сформовані з місць осаджування заготовки.

Форму та основні розміри отриманого напівфабрикату МСЕ

6.3.6 Проектування штампового оснащення для операцій гарячого осаджування та гарячого зворотного видавлювання напівфабрикату

На основі результатів моделювання розроблено і спроектовано двох позиційне штампове оснащення для одночасного виконання гарячого осаджування фасок в кутових зонах на заготовці і видавлювання порожнистого напівфабрикату. Загальний вигляд штампа і специфікацію представлено в Додатку И на рис. И.1 і И.2 відповідно. Штамп складається із нижньої плити 1 і верхньої плити 2. Ліворуч на плитах розміщено деформуючий інструмент для осаджування, тому що поблизу пресу зі штампом розташовано індукційний пристрій для нагрівання вихідних заготовок. На плиті 1 встановлено матрицю 3 круглої форми з опорною плитою 4, яка спирається на пружину 23. Матрицю 3 зафіксовано кільцем 5 і гвинтами 24. Пружина 23 стискається при виконанні осаджування і виштовхує zdeформовану заготовку після осаджування. Пуансон для осаджування 6 прикріплено до верхньої плити 2 за допомогою пуансонотримача 7 та гвинтів 25.

Деформуючий інструмент для видавлювання в штампі встановлено праворуч, що дозволяє швидко перенести zdeформовану заготовку з позиції осаджування на позицію видавлювання, а позицію осаджування заповнити новою заготовкою. На плиті 1 розміщено матрицетримач 8, в якому є опорна плита 9 і штовхач 10. Матрицетримач 8 до плити 1 зафіксовано гвинтами 26 і містить виштовхувач 11 з конусним кільцем 12 і пружиною 27. Пружину 27 попередньо стиснуто матрицею 13, обоймою 14 і кільцем 15 за допомогою гвинтів 28, які вкручено в матрицетримач 8.

До верхньої плити 2 штампу прикріплено пуансонотримач 16 за допомогою гвинтів 29. У пуансонотримачі 16 розміщено п'яту 17 і підп'ятник 18, на які спирається пуансон 19 та фіксується конусним кільцем 20 і гайкою 21. Також у пуансонотримачі 16 встановлено з посадкою по пуансону 19 знімач 22, який утримується чотирма рухомими гвинтами 30 і спирається на чотири пружини 31. Знімач 22, крім знімання напівфабрикату з пуансону 19,

призначений для направлення пуансону 19 відносно матриці 13 при видавлюванні. Нижня плита 1 має чотири пази для кріплення на столі гідравлічного пресу, а верхня плита 2 має такі пази для кріплення на повзуні пресу.

Опис роботи штампа. У вихідному положенні віддаль між торцем пуансону 19 і обоймою 14 повинна бути дещо більшою за висоту напівфабрикату. В матрицю 13 встановлюють заготовку після осаджування. При опусканні повзуна пресу з верхньою плитою 2 перед початком видавлювання знімач 22 попадає на конусну поверхню обойми 14 і пуансон 19 направляється відносно матриці 13. Після видавлювання повзун пресу з верхньою плитою піднімається в вихідне положення. Якщо напівфабрикат залишиться на пуансоні 19, то знімання його відбувається за рахунок дії стиснутих пружин 31 і знімача 22. Коли напівфабрикат залишається в матриці 13, то видалення його здійснюється виштовхувачем 11 і штовхачем 10, які приводяться в рух від виштовхувача пресу. При цьому стискається пружина 31 і повертає виштовхувач 11 зі штовхачем 10 в вихідне положення при опусканні виштовхувача пресу.

Таким чином, в штампі одночасно відбувається осаджування фасок на заготовці та видавлювання порожнистого напівфабрикату для подальшого виконання переходів витягування з потоншенням.

Результати дослідження гарячого осаджування фасок в кутових зонах заготовки квадратного перерізу та гарячого зворотного видавлювання з роздачою круглого порожнистого напівфабрикату опубліковано в роботі [191].

6.4 Операція гарячого витягування з потоншенням круглого порожнистого напівфабрикату через дві послідовно розташовані матриці

6.4.1 Схема процесу гарячого витягування з потоншенням напівфабрикату

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці. Розрахункові положення в розрізі по площині zox деформуючого інструменту і заготовки на початку, після витягування через одну матрицю та в кінці витягування зображено на рис. 6.16. Положення на початку витягування показано на рис. 6.16а. Заготовку 1 після видавлювання встановлено в матриці 2 з центруванням по конусній частині матриці. Матрицю 2 розміщено на обоймі 3. Обойму 3 розміщено на матриці 4. Процес витягування з потоншенням здійснюється пуансоном 5. На рис. 6.16б відображено положення після витягування через першу матрицю 2 з отриманням проміжного напівфабрикату 6. На рис. 6.16в наведено положення в кінці витягування, в результаті якого отримано напівфабрикат 7. Процес деформування із зусиллям P виконується при опусканні пуансона 5 на задану відстань зі швидкістю V_0 .

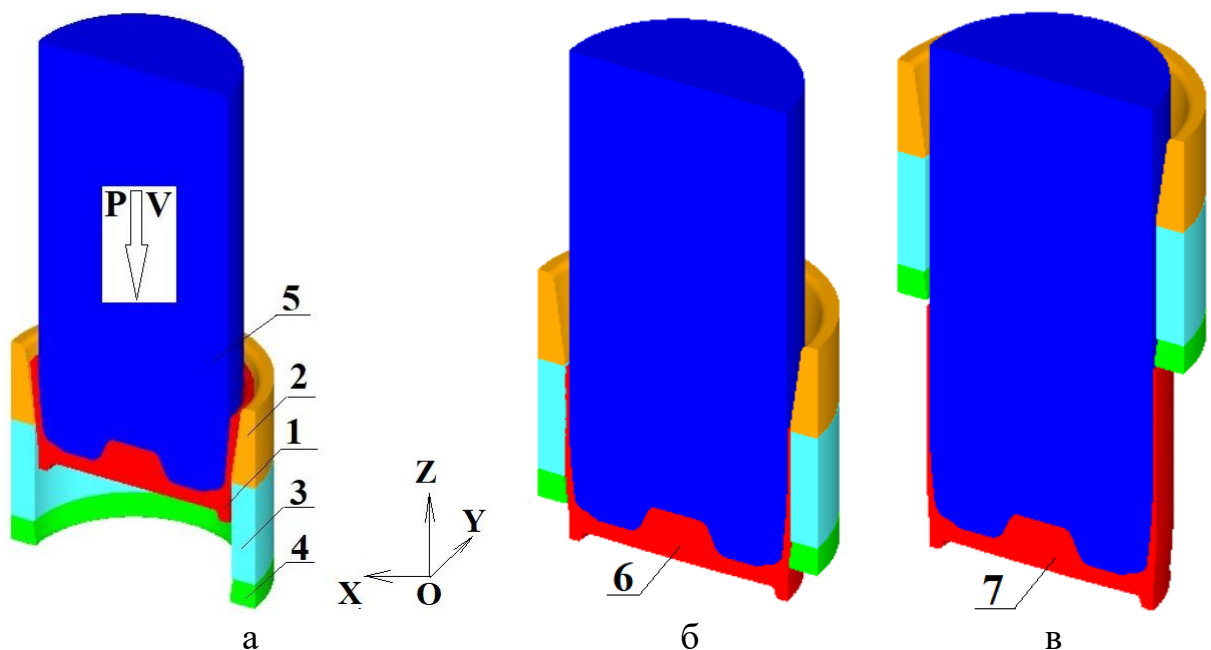


Рисунок 6.16. Розрахункові схеми в розрізі процесу гарячого витягування з потоншенням: а – на початку витягування; б - після витягування через першу матрицю; в - в кінці витягування

Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: швидкість переміщення пуансона $V_0 = 40$ мм/с, фактор тертя між поверхнями

робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,25$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим інструментом - $5 \text{ N/sec/mm/}^\circ\text{C}$, глибина проникнення сітки - $0,25 \text{ мм}$. Задано пружно-пластичну модель матеріалу. Температура матриці і пуансона – $T = 150^\circ\text{C}$.

6.4.2 Зусилля деформування, напружений стан та питомі зусилля процесу гарячого витягування з потоншенням круглого порожнистого напівфабрикату

На рис. 6.17 відображено залежність зусилля витягування з потоншенням від переміщення пуансона. Зусилля витягування поступово зростає та досягає максимального значення 756 кН при переміщенні пуансона 40 мм , далі зусилля поступово зменшується до значень 180 кН при переміщенні пуансона 80 мм . Процес витягування через другу матрицю починається при переміщенні пуансона 80 мм і поступово зростає до 680 кН при переміщенні пуансона 120 мм , а з подальшим переміщенням пуансона поступово зменшується та сягає нульових значень при переміщенні пуансона 250 мм (кінець процесу витягування з потоншенням).

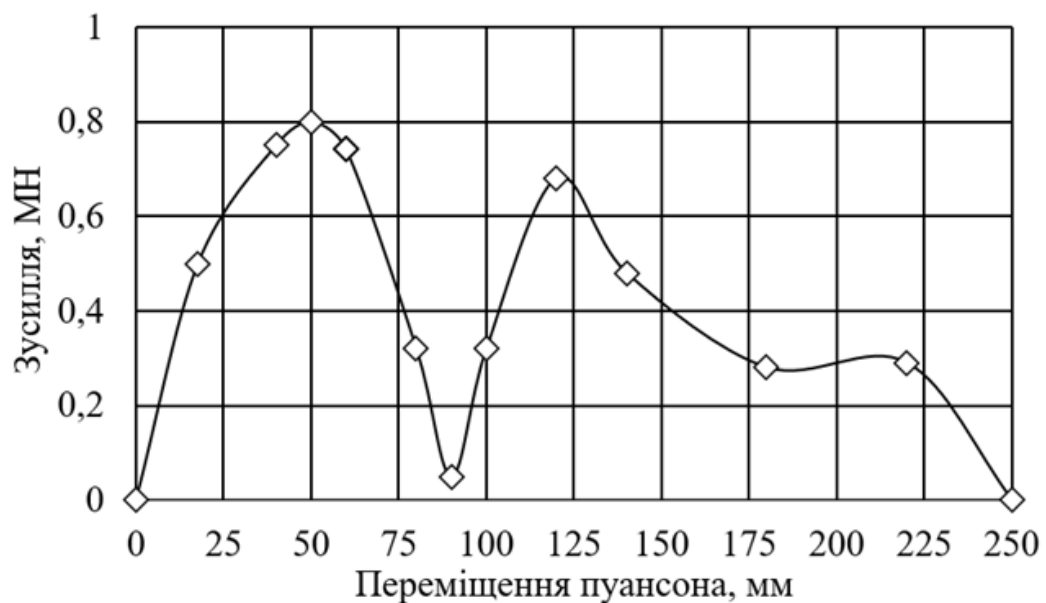


Рисунок. 6.17. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансона

Проаналізувавши зусилля витягування від переміщення пуансона процесу витягування з потоншенням, визначено вимоги до пресового обладнання. Необхідно використовувати гідравлічний прес зусиллям 1 МН , з

мінімальною величиною робочого ходу 400 мм (відстань від торцю пуансона до першої матриці 150 мм для встановлення заготовки із зазором по висоті між торцем пуансону та верхньої площини першої матриці та 250 мм робочий хід), а також швидкістю переміщення повзуна пресу 40 мм/с.

На рис. 6.18 відображено розподіл напружень σ_z , σ_x та σ_y у здеформованій заготовці при максимальному зусиллі витягування.

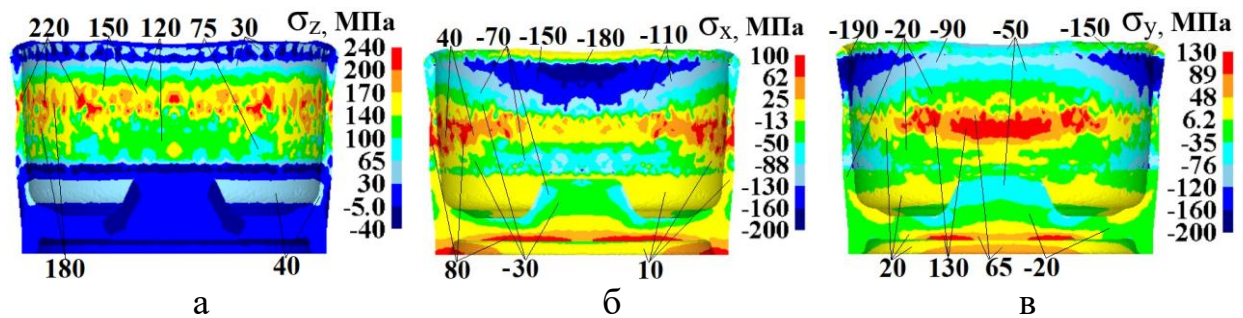


Рисунок 6.18. Розподіл напружень σ_z , σ_x та σ_y при максимальному зусиллі витягування

Напруження σ_z – розтягуючі та знаходяться у межах $\sigma_z = 30 \div 220$ МПа (рис. 6.18а).

Напруження σ_x мають знакозмінний характер, тобто в матеріалі здеформованої заготовки діють розтягуючі та стискаючі напруження і у вказаних місцях донної частини та стінки напруження σ_x – розтягуючі та знаходяться у межах $\sigma_x = 10 \div 80$ МПа та σ_x – стискаючі, у донній частині $\sigma_x = -30 \div -70$ МПа та у вказаних місцях стінки $\sigma_x = -30 \div -180$ МПа (рис. 6.18б).

Напруження σ_y також мають знакозмінний характер, у донній частині $\sigma_y = -20 \div -50$ МПа – стискаючі напруження та $\sigma_y = 20 \div 130$ МПа – розтягуючі напруження та у вказаних місцях стінки $\sigma_y = -20 \div -190$ МПа – стискаючі напруження і $\sigma_y = 20 \div 130$ МПа – розтягуючі напруження (рис. 6.18в).

При проектуванні штампового оснащення важливо знати розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях заготовки з інструментом при максимальному значенні зусилля витягування. Проаналізувавши рис. 6.18 можна встановити, що найбільші питомі зусилля величиною 40 МПа діють на поверхні контакту пуансона з радіусом донної частини. Також у стінці напівфабрикату отримано стискаючі та розтягуючі напруження σ_x (рис. 6.18б)

і σ_y . (рис. 6.18в) у вказаних місцях. Вигляди розподілів і величини напружень приблизно однакові. Стискаючі напруження знаходяться у межах $-70 \dots -190$ МПа, а розтягуючі – $40 \dots 130$ МПа. На поверхні проміжного напівфабрикату з матрицею по напруженню σ_y можна встановити питомі зусилля, які в даному випадку досягають 190 МПа.

6.4.3 Деформований стан круглого порожнистого напівфабрикату в кінці гарячого витягування з потоншенням

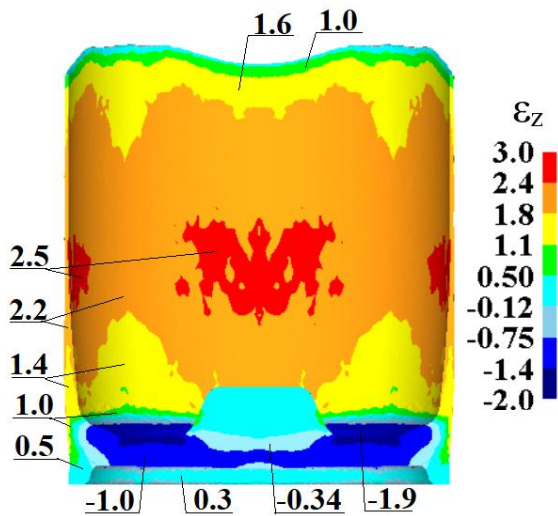


Рисунок 6.19. Розподіл осьових деформацій

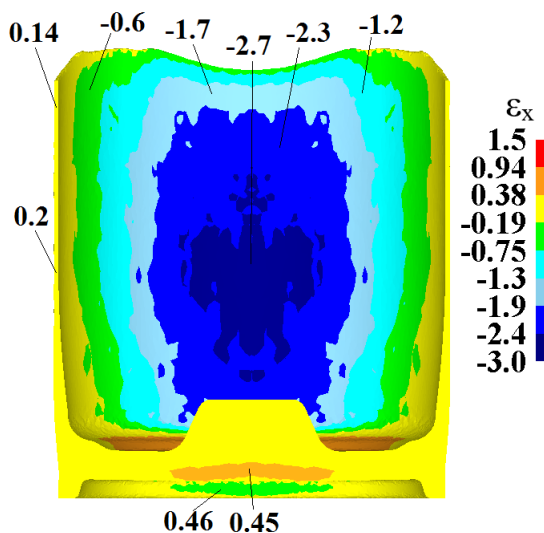


Рисунок 6.20. Розподіл деформацій ε_x

На рис. 6.19 відображено осьові деформації ε_z . У донній частині напівфабрикату $\varepsilon_z = -1.9 \div -0.34$ – стискаючі деформації, а по висоті стінки $\varepsilon_z = 1.4 \div 2.5$, в зоні верхнього торця $\varepsilon_z = 1.0 \div 1.6$ та в зоні переходу від дна до стінки напівфабрикату $\varepsilon_z = 0.5 \div 1.0$ – розтягуючі.

Розподіл деформацій ε_x показано на рис. 6.20. У вказаному місці донної частини $\varepsilon_x = 0.45$. По висоті стінки має місце знакозмінний характер деформацій $\varepsilon_x = -2.7 \div 0.14$.

На рис. 6.21 зображено розподіл деформацій ε_y . У вказаних місцях донної частини $\varepsilon_y = 0.7 \div 2.1$ – розтягуючі деформації. Деформації ε_y по висоті стінки

напівфабрикату мають нерівномірний розподіл та мають знакозмінний характер за величиною $\varepsilon_y = -2.9 \div 0.15$.

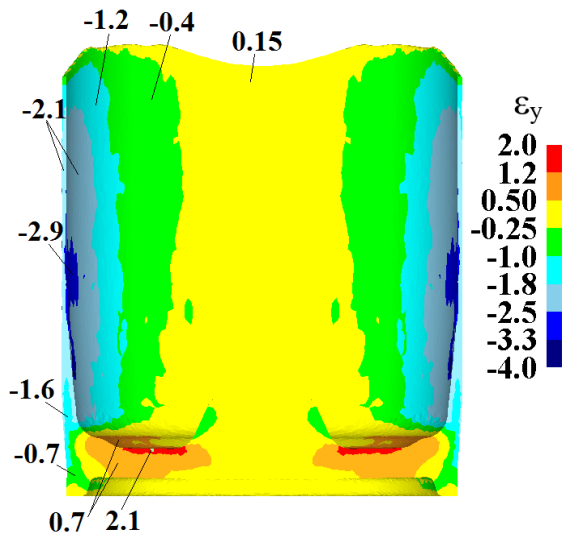


Рисунок 6.21. Розподіл деформацій ε_y

пластичною деформацією.

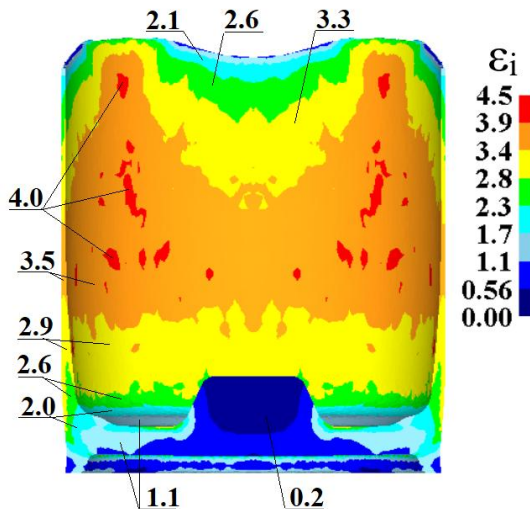


Рисунок 6.22. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i

вказаних місцях в зоні верхнього торцю $\varepsilon_i = 2.1 \div 2.6$.

6.4.4 Температурний розподіл отриманого напівфабрикату в кінці витягування

На рис. 6.23 зображено розподіл температур в кінці витягування з потоншенням через першу матрицю та в кінці витягування з потоншенням через другу матрицю.

Розподіл температур процесу витягування з потоншенням в кінці витягування через першу матрицю відображено на рис. 6.23а. З рис. 6.23а

Для виробів певного призначення, особливо тих, які використовуються для виготовлення артилерійських боєприпасів окрім форм та розмірів необхідно отримати певні механічні властивості по висоті стінки та у донній частині. Для цього необхідне певне пропрацювання металу

За допомогою розподілу інтенсивності деформацій ε_i можна оцінити таке пропрацювання. На рис. 6.22 показано розподіл ε_i в кінці процесу витягування. У вказаних місцях донної частині напівфабрикату $\varepsilon_i = 0.2 \div 1.1$. В зоні переходу донної частини в стінку напівфабрикату $\varepsilon_i = 2.0 \div 2.6$. По висоті стінки $\varepsilon_i = 2.9 \div 4.0$. У

видно, що донна частина здеформованої заготовки має $T = 860 \div 980^\circ\text{C}$, по висоті стінки основна частина металу має $T = 720 \div 830^\circ\text{C}$ і лише деяка зона в стінці напівфабрикату $T = 610^\circ\text{C}$. Визначаємо до якого виду деформації (гаряча, неповна гаряча, неповна холодна чи холодна) відноситься процес деформування через першу матрицю. Згідно джерела [192] гаряча деформація відбувається при температурах $0,7T_{пл}$ і вище ($T_{пл}$ – температура плавлення металу), неповна гаряча деформація здійснюється в температурному інтервалі $(0,5 \div 0,7)T_{пл}$, неповна холодна деформація здійснюється при $(0,3 \div 0,5)T_{пл}$, а холодна деформація при температурах, які менші значення $0,3T_{пл}$. Відомо, що для сталей $T_{пл} = 1450 \div 1520^\circ\text{C}$ (при розрахунках використовували $T_{пл} = 1500^\circ\text{C}$). Тобто на початку процесу витягування через першу матрицю (рис. 6.6) в стінці заготовки 1000°C , що відповідає значенню $1000^\circ\text{C}/1500^\circ\text{C} = 0,66T_{пл}$, а в кінці витягування через першу матрицю в стінці здеформованої заготовки температура $610^\circ\text{C} \div 830^\circ\text{C}$ (рис. 6.23а), що відповідає значенню $(830^\circ\text{C} \div 610^\circ\text{C})/1500^\circ\text{C} = (0,55 \div 0,4)T_{пл}$, тобто процес деформування стінки при витягуванні через першу матрицю відбувається в умовах неповної гарячої та неповної холодної деформації.

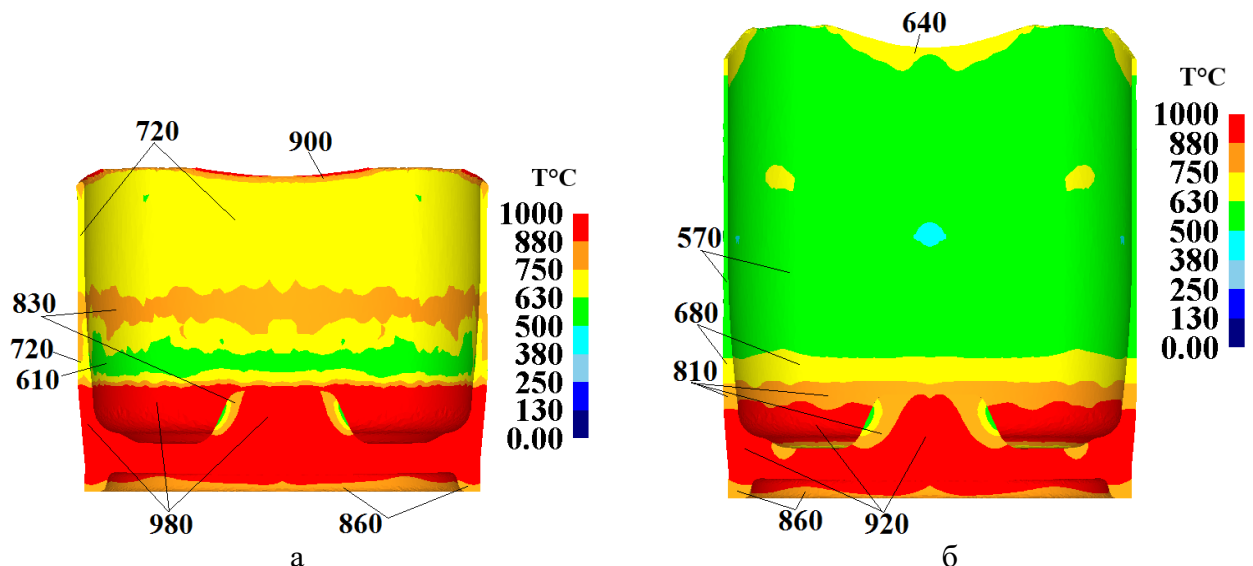


Рисунок 6.23. Розподіл температур процесу витягування з потоншенням: а – після витягування через першу матрицю; б – після витягування через другу матрицю

На рис. 6.23б відображено розподіл температур у напівфабрикаті після витягування з потоншенням через другу матрицю. У донній частині напівфабрикату $T = 860 \div 920^\circ\text{C}$, в зоні придонної частини у вказаних місцях стінки $T = 680 \div 810^\circ\text{C}$, а основна частина стінки напівфабрикату має $T = 570^\circ\text{C}$. Тобто в зоні придонної частини стінки $(810^\circ\text{C} \div 680^\circ\text{C}) / 1500^\circ\text{C} = (0,54 \div 0,45)T_{\text{пл}}$, а в зоні стінки напівфабрикату де $T = 570^\circ\text{C}$ маємо $570^\circ\text{C} / 1500^\circ\text{C} = 0,38T_{\text{пл}}$. Отже процес деформування стінки напівфабрикату в придонній частині відбувається в умовах неповної гарячої та неповної холодної деформації, а по висоті стінки в умовах неповної холодної деформації.

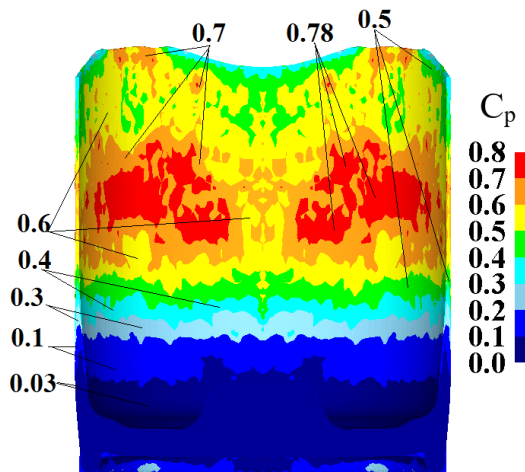


Рисунок 6.24. Коефіцієнт критерію руйнування C_p Normalized C&L

На рис. 6.24 відображено розподіл коефіцієнту критерію руйнування C_p Normalized C&L в кінці процесу витягування. Максимальне значення $C_p = 0.78$. Керуючись максимальним значенням $C_p = 1$ при якому відбудеться руйнування матеріалу, запас пластичності до руйнування – 22%.

Форму та основні розміри напівфабрикату МСЕ після операції гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці показано на рис. 6.25.

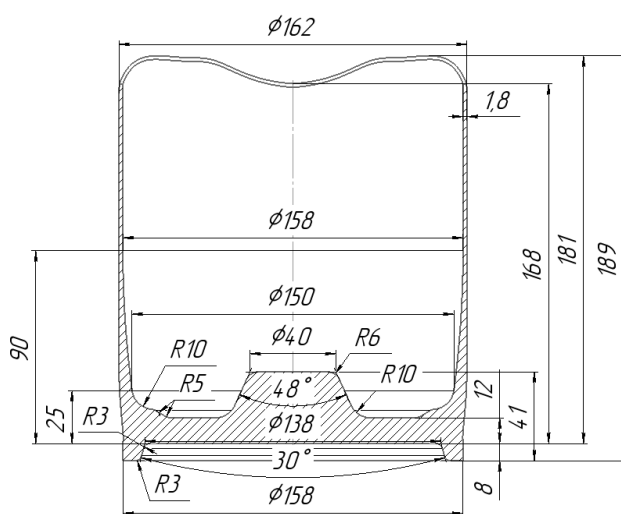


Рисунок 6.25. Форма та основні розміри напівфабрикату

6.4.5 Проектування штампового оснащення для операції гарячого витягування з потоншенням порожнистого напівфабрикату

На основі результатів моделювання розроблено і спроектовано штампове оснащення для виконання гарячого витягування з потоншенням порожнистого напівфабрикату через дві послідовно розташовані матриці. Загальний вигляд штампа і специфікацію представлено в Додатку К на рис. К.1 і К.2 відповідно. Штамп складається з верхньої та нижньої частини. Нижня частина складається із нижньої плити 7 на якій встановлена втулка нижня 6, яку закріплено за допомогою гвинтів 15. На втулці нижній 6 встановлено матрицю нижню 3, в якій знаходяться шість знімачів 4, які підпружинені пружинами 5. На матриці нижній 3 встановлено проміжну втулку 1 на якій встановлено матрицю верхню 2. Центрування матриці нижньої 3, проміжної втулки 1 та матриці верхньої 2 відбувається за допомогою спеціальних виступів та впадин у вказаних деталях, а їх фіксація виконується за допомогою шести гвинтів 14 до втулки нижньої 6. Верхня частина штампа складається з пуансона 9, який встановлено в пуансонотримачі 10. Пуансонотримач 10 закріплено до плити верхньої 8 за допомогою шести гвинтів 16 та зцентровано за допомогою чотирьох штифтів 17. Направлення верхньої частини штампа відносно нижньої виконується за допомогою чотирьох направляючих втулок 13 та колонок 12. Для зручного перенесення штампа передбачено гвинти транспортувальні 11, які встановлено в нижній плиті 7.

Опис роботи штампа. В матрицю 2 встановлюють заготовку після зворотного видавлювання. При опусканні повзуна пресу з верхньою плитою 8 відбувається протягування заготовки спочатку через матрицю верхню 2, а потім через матрицю нижню 3, яка розташована на спеціальній відстані від матриці верхньої 2. Після витягування повзун пресу з верхньою плитою піднімається в вихідне положення. Для зняття напівфабрикату з пуансона 9 передбачено знімачі 4, що підпружинені пружинами 5. Для вилучення напівфабрикату з робочої зони передбачено вікно у втулці нижній 6.

6.5 Операція гарячого осаджування фланця

6.5.1 Схема процесу гарячого осаджування фланця

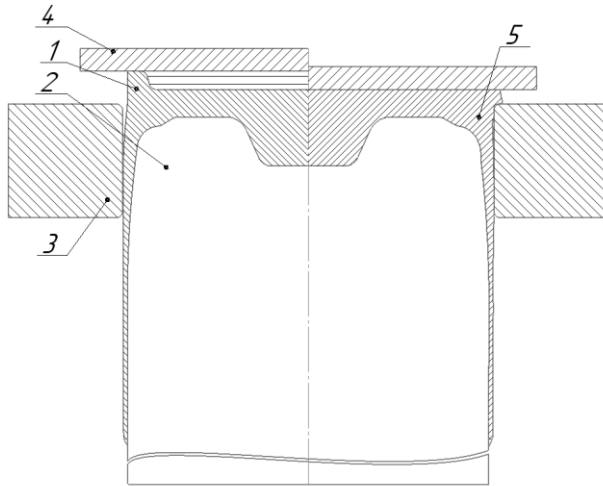


Рисунок 6.26. Схема гарячого осаджування фланця: 1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – матриця, 4 – плита, 5 – напівфабрикат

Для проведення розрахунку з використанням МСЕ було використано схему гарячого осаджування фланця, яку показано на рис. 6.26. Заготовка 1 встановлюється на оправку 2. Матриця 2 слугує обмежувачем для формування фланця на заданій висоті. Процес осаджування здійснюється плитою 4 із зусиллям P зі швидкістю V_0 в результаті отримано напівфабрикат 5.

6.5.2 Зусилля деформування процесу гарячого осаджування фланця



Рис. 6.27. Залежність зусилля гарячого осаджування від переміщення плити

На рис. 6.27 зображено залежність зусилля осаджування від переміщення плити. На початку процесу зусилля осаджування зростає до 1 МН при переміщенні плити 1 мм, далі поступово зростає до 1,96 МН при переміщенні плити 7 мм після чого відбувається різкий зріст зусилля до 8,2 МН при переміщенні плити 8 мм. Такий ріст зусилля наприкінці процесу

осаджування пов'язано з тим, що плита починає деформувати не тільки зону фланця, а також деформувати центральну донну частину напівфабрикату. Вказані зусилля потрібно враховувати при виборі пресового обладнання і

проектуванні плит штампа. Було задано наступні параметри для проведення моделювання МСЕ: початкова температура заготовки така ж як і наприкінці процесу витягування, швидкість переміщення пуансона $V = 20$ мм/с, фактор тертя між поверхнями робочого інструменту та заготовки враховано по Зібелю $\mu = 0,3$, коефіцієнт теплообміну між заготовкою та деформуючим інструментом – 5 N/sec/mm/C , глибина проникнення сітки – $0,25$ мм. Задано пружно-пластичну модель матеріалу. Температура матриці і пуансона – 150°C .

6.5.3 Основні характеристики процесу гарячого осаджування фланця

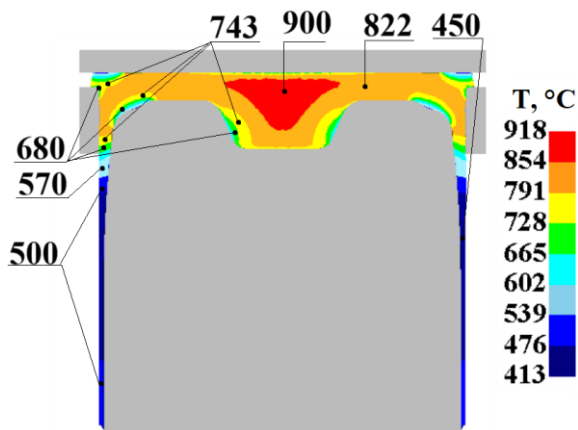


Рисунок 6.28. Розподіл температури ($T, ^\circ\text{C}$) по об'єму половини напівфабрикату в кінці осаджування

охолодження шарів металу до $T=743^\circ\text{C}$ поблизу контактуючих поверхонь з пуансоном, плитою і матрицею.

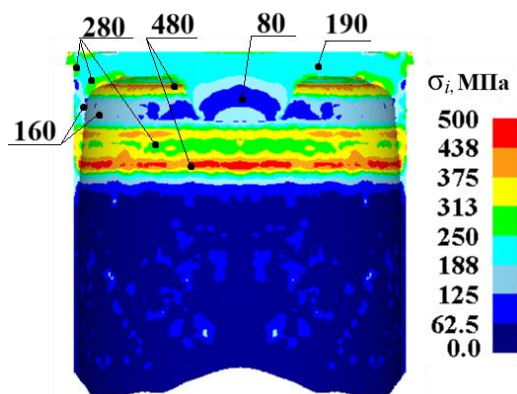


Рисунок 6.29. Розподіл інтенсивності напружень σ_i

Виявлено розподіл температури у zdeформованому металі по об'єму половини напівфабрикату в кінці осаджування, який зображено на рис. 6.28. У стінці $T=450\div 500^\circ\text{C}$, зона формування фланця $T=680\div 743^\circ\text{C}$, а основний об'єм донної частини напівфабрикату $T=822\div 900^\circ\text{C}$ Також встановлено

Виявлено розподіл інтенсивності напружень σ_i напівфабрикату (рис. 6.29). Основний об'єм матеріалу в донній частині виробу $\sigma_i=190$ МПа, центральний виступ $\sigma_i=80\div 160$ МПа, в місці де відбувалось формування фланця

$\sigma_i=280$ МПа. Середня частина стінки виробу у вказаних місцях $\sigma_i=280\div480$ МПа.

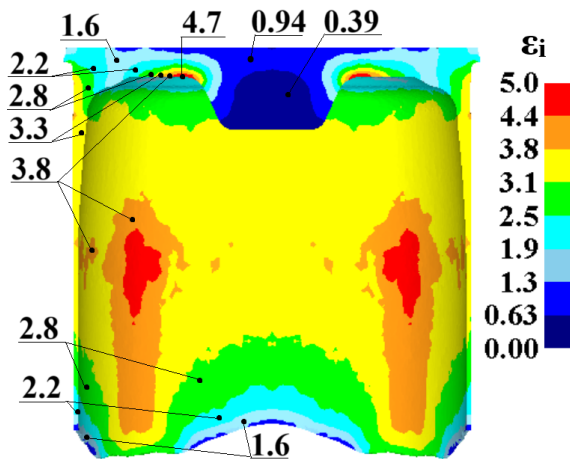


Рисунок 6.30. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i

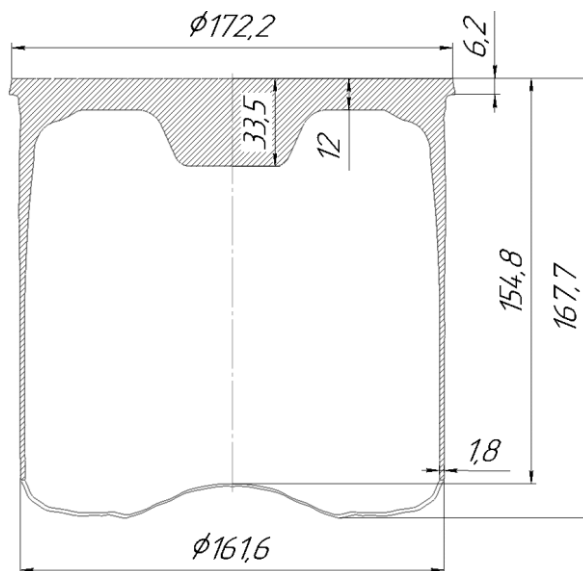


Рисунок 6.31. Розподіл температури напівфабрикату

На рис. 6.30 наведено розподіл інтенсивності деформацій ε_i напівфабрикату. Зона центрального виступу $\varepsilon_i=0.39\div0.94$, донна частина виробу $\varepsilon_i=1.6\div2.8$, основний об'єм стінки виробу $\varepsilon_i=3.3$, у вказаних місцях стінки виробу $\varepsilon_i=3.8$, а верхня частина виробу $\varepsilon_i=1.6\div2.8$.

На рис. 6.31 відображено форму та основні габаритні розміри отриманого напівфабрикату внаслідок розрахунків МСЕ. Після операції осаджування фланця отриманий напівфабрикат підлягає травленню, фосфатуванню та промиванню. Після чого виконуються операції: проточування фланця, зовнішньої поверхні виробу, свердління

отвору під капсуль-запальник, формоутворення рифту на токарному верстаті та нанесення антикорозійного покриття (цинкування, фосфатування, лакування).

6.6 Висновки

1 З використанням методу скінченних елементів створені математичні пластичні моделі матеріалу для операцій гарячого осаджування та гарячого зворотного видавлювання, а також пружно-пластичні моделі матеріалу для

операцій гарячого витягування з потоншенням та гарячого осаджування фланця. Проведено комп'ютерне моделювання вказаних операцій. Витягування з потоншенням здійснюється через дві послідовно розташовані матриці.

2 Використання заготовки квадратного перерізу полегшує її встановлення в матриці при операціях гарячого осаджування та гарячого зворотного видавлювання. Зворотне видавлювання заготовки квадратного перерізу дозволяє отримати краще пропрацювання структури матеріалу донної частини напівфабрикату у порівнянні із заготовкою круглого перерізу.

3 Для вказаних операцій встановлено залежності зусилля деформування від переміщення пуансонів і розподіли нормальних напружень на деформуючого інструменті. Максимальне значення зусилля деформування для операцій: осаджування – 300 кН; видавлювання – 12,92 МН; витягування – 756 кН; осаджування фланця – 8,2 МН. Визначено напружено-деформований стан, температурний розподіл, критерій руйнування Normalized C&L, а також форму та основні розміри напівфабрикатів по операціях. Встановлено, що процес деформування стінки напівфабрикату при операції гарячого витягування з потоншенням в придонній частині відбувається в умовах неповної гарячої та неповної холодної деформації, а по висоті стінки в умовах неповної холодної деформації. За допомогою критерію руйнування Normalized C&L визначено, що запас пластичності до руйнування при операції витягування з потоншенням – 22%.

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 маловуглецевої сталі порожнистих виробів зі стінкою змінної товщини по висоті. Технологія дозволяє підвищити продуктивність виготовлення за рахунок зменшення кількості переходів штампування та знизити витрати металу завдяки зміні форми вихідної заготовки в порівнянні із традиційними способами отримання вказаних виробів.

1 Проведено аналіз літературних джерел по існуючих технологіях пластичного формоутворення виробів зі змінною товщиною стінки. Технології виробництва яких включають в себе операції гарячого осаджування і подальшого зворотного видавлювання порожнистих напівфабрикатів, витягування з потоншенням та кінцеву операцію обтиску.

Встановлено способи підвищення продуктивності процесів обробки тиском та зниження витрат металу при виготовленні вказаних виробів. Підвищення продуктивності досягається за рахунок зменшення кількості переходів внаслідок використання гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці замість традиційних способів холодного витягування. Зменшення витрат металу досягається за рахунок використання вихідної заготовки квадратного перерізу замість заготовки круглої форми.

2 Наведено результати моделювання методом скінчених елементів процесу гарячого формоутворення виробів з потрібним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією. Представлено 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 зворотного видавлювання. Встановлено швидкості деформування для забезпечення температурного інтервалу штампування, температурний

розподіл, нормальні напруження 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 гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці та холодного витягування з потоншенням через одну матрицю (для гільзи), а також моделювання переходів гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці (для піддону). За рахунок використання способу гарячого витягування через дві послідовно розташовані матриці досягнуто скорочення кількості операцій витягування. Встановлено особливості формозміни металу, яка приводить до викривлення донної частини після гарячого витягування через дві послідовно розташовані матриці. Для формоутворення гільзи введено операцію калібрування донної частини. Визначено зусилля деформування, питомі зусилля на інструменті та напружено деформований стан металу для вказаних операцій. Виявлено форму та розміри напівфабрикатів.

5 З використанням методу скінчених елементів і пружно-пластичної моделі металу проведено розрахунок холодного осаджування фланцю з одночасним обтиском верхнього торцю (для гільзи) та гарячого осаджування фланцю (для піддону). Встановлено залежність зусилля від переміщення деформуючого інструменту, питомі зусилля на інструменті, напружено-деформований стан в осередку деформації. При цьому створено потрібну макроструктуру металу в місці переходу фланцю у донну частину. З урахуванням пружної деформації виявлено кінцеву форму та розміри виробу.

6 На основі результатів комп'ютерного моделювання переходів штампування розроблено та спроектовано конструкції штампового оснащення для реалізації переходів штампування піддону.

7 Результати роботи використані на виробництві ТОВ «БСТІ «СТАНДАРТ.Т» та застосовуються у навчальному процесі на кафедрі Технології виробництва літальних апаратів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гуменюк Ю.И., Кузнецов Д.П. Общая и специальная терминология ОМД на примере классификации основных видов процесса выдавливания. Издательство инновационное машиностроение. Заготовительные производства в машиностроении. Москва, 2005. №2. С. 26 – 35.
2. Марченко В. Л., Рудман Л. И., Зайчук А. И., Динер И. Г., Бирин Б. В., Соловей Е. И. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / под общ. ред. Л.И. Рудмана. Москва: Машиностроение, 1988. 496 с.
3. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч 2. Процессы штамповки: учебник. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т. Военмех, 2006. 533 с.
4. РТМ 3-1279-80. Инструмент рабочий технологический для операции «Вытяжка с утонением».
5. РМО 819-56. Методика расчета рабочего инструмента для изготовления патронов из их элементов. 1956. 74 с.
6. Данилин Г. А., Мишарин И. О. Оценка влияния погрешностей изготовления пуль на кучность боя патронов. Перспективы и научно-технические проблемы создания высокоэффективных боеприпасов наземного РАВ: сборник тезисов конф. Москва: ЗЦНИИ Минобороны РФ, 2006.
7. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч.3. Обработка резанием, термическая и химическая обработка, сборка. Проектирование технологических процессов: учебник. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т. Военмех, 2006. 222 с.
8. Данилин Г. А., Огородников В. П. Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т. Военмех, 2004. 304 с.

9. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталях машино- и приборостроения. В двух частях. Ч. 1. Механические основы процесса вытяжки. Тверь: Изд-во ГЕРС, 1997. 336 с.

10. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталях машино- и приборостроения. В двух частях. Ч. 2. Проектирование технологических процессов. Тверь: ГЕРС, 1998. 256 с.

11. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов: в 3 т. Москва: Металлургиздат, 1960. Т. 1: Физико-механические основы пластической деформации. 376 с.

12. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. Москва: Издательство Металлургиздат, 1961. 526 с.

13. Филимонов Ю. Ф., Кузнецов Г. В. О точности стальных деталей, изготавливаемых холодным прессованием. Новое в технологии обработки металлов давлением. 1967. Вып. 15.

14. Лясников А. В., Агеев Н. П., Кузнецов Д. П., Данилин Г. А. и др. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / под ред. А.В. Лясникова. Санкт-Петербург: Внешторгиздат-Петербург, 1995. 527 с.

15. Агеев Н. П., Афанасьев А. С., Богатырев А. В., Майер А. В. Автоматизированное проектирование технологических процессов штамповки дна полых заготовок: учебное пособие. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 1995. 72 с.

16. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов: учебное пособие / под ред. Агеева Н. П. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 2005, 352 с.

17. Шур М. Б. Безотходное изготовление заготовок из прутка. Прогрессивные методы изготовления, отделки и упрочнения металлических деталей пластическим деформированием. Москва: Машгиз, 1962. 240 с.

18. Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ. Москва: Машиностроение, 1986. 192 с.
19. Агеев Н. П., Афанасьев А. С., Дриго А. В., Морозов С. А. Автоматизированное проектирование технологического процесса обжима полых заготовок: учебное пособие. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 1993. 74 с.
20. Лясников А. В., Агеев Н. П., Кузнецов Д. П., Данилин Г. А. и др. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением: учебное пособие. Санкт-Петербург: Внешторгиздат-Петербург, 1995. 527 с.
21. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки: учебное пособие. Москва: Машиностроение, 1977. 278 с.
22. Сыроватченко П. В. Справочник технолога-приборостроителя: в 2 т. Москва: Машиностроение, 1980. Т. 1. 607 с.
23. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Технология производства выстрелов. Ч. 2: учебник. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 2006. 533 с.
24. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. Москва: Машиностроение, 1980. 783 с.
25. Калачев Б. А., Габидуллин Р. М., Пигузь Ю. В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: учебное пособие для вузов. Москва: Металлургия, 1980. 280 с.
26. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (с приложением атласа макро- и микроструктуры). Москва: Металлургия, 1970. 364 с.
27. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 3 учебник. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 2006. 222 с.
28. Гриллихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. Ленинград: Машиностроение, 1977. 112 с.

29. Гриллихес С. Я. Оксидирование и фосфатирование металлов. Ленинград: Машиностроение, 1971. 120 с.
30. Билибин И. К., Голиков В. И. и др. Справочник технолога-приборостроителя: в 2 т. / под ред. Е.А. Скороходова. Т. 2. Москва: Машиностроение, 1980. 463 с.
31. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп., Ленинград: Машиностроение. 1979. 520 с.
32. Харламов А., Уваров А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением. Инструменты конструктора-технолога. 2003. 5 с. URL: http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_sapr0603.pdf. (дата звернення 16.11.2021).
33. Орлюк М. В., Вишневський П. С., Яблонський П. М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи студентів кредитного модуля ЗП-06/1 «Технологія холодного штампування та конструювання штампів-1» для напряму підготовки 6.050502 Інженерна механіка фахівців майбутньої спеціальності 7.05050203/8.05050203. Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування / уклад.: Орлюк М.В., Вишневський П.С., Яблонський П.М. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 83 с.
34. G. Venkateswarlu G., Davidson M. J., Targore G. R. N. Influence of process parameters on the cup drawing of aluminium 7075 sheet. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2010. Vol. 2, № 11. P. 41-49.
35. Liu Xiaojing, Liu Weiyan, Wang Cong, Zhao Qingjuan. Numerical simulation of aluminum alloy conical cup forming by hydro-mechanical deep drawing. The National Natural Science Foundation. Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, August 22-24, 2011. China: Harbin. 2011, pp. 181 – 185.

36. Ossia S. A., Soltani B. Finite element simulation of the warm deep drawing process in forming a circular cup from magnesium alloy sheet. *Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 20, № 3. P. 1213-1220.

37. Method of forming a cup shaped aluminum magnesium alloy article by rotary extrusion: pat. 10780478 China: Class 72/467 B21C 23/14 (20060101), B21C 25/02 (20060101), B21C 25/08 (20060101), B21C 29/04 (20060101), B21C 23/21 (20060101); № 20180369888; filed 18.04.2018; date of patent 22.09.2022.

38. Hu X., Mei R. B., Zhu F., Fan Y., Liang Y. B., Wang X. B., Wang D. G., Jing Z. R. Numerical simulation for microstructure evolution in In718 alloy during cylindrical cup backward extrusion. *Advanced Materials Research*. China, 2013. Vol. 650. P. 92-97.

39. Kapustova M., Sobota R. The design of drawing process of cylindrical cup with oval bottom using computer simulation. *Manufacturing and Industrial Production. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering. MATEC Web of Conferences* 95, 2017. P. 4. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20179510008>. (дата звернення: 16.11.2021).

40. Способ изготовления полого осесимметричного изделия: СССР: МПК 6B21D51/54. № 1800729; заявл. 10.04.1990; опубл. 27.06.1995, Бюл. № 18.

41. Способ горячей штамповки полых изделий: пат. 2262408 С1 Россия: МПК B21K 22/02. № 2004114912/02; заявл. 18.05.2004; опубл. 20.10.2005, Бюл. № 29.

42. Способ горячей штамповки полых изделий: пат. 2196027 Россия: МПК B21K 1/00. № 2001108032; заявл. 26.03.2001; опубл. 27.10.2002, Бюл. № 30.

43. Гринберг И. В., Мягких Т. В. Одноходовой процесс штамповки колес. *Технология легких сплавов. Механика и машиностроение*. 2009. № 3. С. 116 - 117.

44. Способ изготовления полых деталей: пат. 2451573 С2 Россия: МПК В21К 21/04. № 2010127389/02; заявл. 02.07.2010; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.

45. Алексеев А. В. Получение деталей со сложной формой комбинированным выдавливанием. Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 5. С. 318-321.

46. Способ изготовления осесимметрических штампованных заготовок типа стакан из высокопрочного алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu, легированного скандием и цирконием: Россия: МПК В21К 21/08. № 2012127821; заявл. 04.07.2012; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.

47. Способ изготовления деталей типа осесимметрического стакана: Россия: МПК В21К 21/02. № 2009127621; заявл. 17.07.2009; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6.

48. Яковлев С.С., Черняев А.В. Математическая модель процесса обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. Вып. 1. Часть 1. С. 104-115.

49. Хабибуллин А. И., Ловшенко Ф. Г. Расчет предельной глубины выдавливания в заготовках из дисперсно-упрочненной меди. Вестник Белорусско-Российского университета. Технологии материалов. 2010. № 1 (26). С. 95-103.

50. Софоян Г. С., Мороз Б. С. Анализ технологических параметров горячего обратного выдавливания с помощью программного комплекса QForm 2d. Машиностроительные технологии: сб. материалов всероссийской научно-техн. конф. студентов, г. Москва, 2 - 3 апреля 2014 г. Москва, 2014. С. 158 – 163.

51. Яковлев С. С., Платонов В. И., Черняев А. В. Математическое моделирование операции изотермического обратного выдавливания анизотропных трубных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 1. С.

52. Тутьшкин Н. Д., Ву Хай Ха. Исследование силы деформирования процесса обратного выдавливания деталей по схеме подвижного контейнера с использованием программы DEFORM-3D. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 3. С. 131-138.

53. Schuenemann M, Ametoglu MA, Altan T. Prediction of process conditions in drawing and ironing of cans. Journal of Materials Processing Technology. 1996. Vol. 59 (1–2). P. 1–9. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02280-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02280-7). (дата звернения: 17.11.2021).

54. Ragab M-S, Orban H-Z. Effect of ironing on the residual stresses in deep drawn cups. Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 99 (1–3). P. 54–61. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00360-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00360-X). (дата звернения: 17.11.2021).

55. Kampuš Zlatko, Nardin Blaž. Improving workability in ironing. Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 130–131. P. 64-68. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00783-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00783-5). (дата звернения: 17.11.2021).

56. Behrens BA., Pösse O., Milch M., Helms G. Optimization of ironing processes by means of DOE and FEA. Prod. Eng. Res. Devel. 2007. Vol. 1. P. 3–8. URL: <https://doi.org/10.1007/s11740-007-0023-y>. (дата звернения: 17.11.2021).

57. Попов А. М., Данилин Г. А., Воронина Е. С. Снижение разностенности при вытяжке с утонением через две матрицы. Политехника. 2010. № 5 (59). С. 25-29.

58. Кухарь В.Д., Бойко О.А. Исследование процесса комбинированной вытяжки детали «стакан» с помощью программы QFORM 2d/3d. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. № 8. С. 235-239.

59. Яковлев С. С., Овчинников А. Г., Платонов В. И., Ларина М. В. Математическая модель изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических заготовок из анизотропных материалов в клиновом канале в режиме ползучести. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 8. С. 219-228.

60. Агеев Н. П., Затеруха Е. В. Исследование влияния разностенности штампуемых способом вытяжки с утонением деталей на неравномерность распределения твердости свойств в поперечных сечениях. Известия МГТУ МАМИ. 2013. № 2 (16) Т. 2. С. 13-17.

61. Травин В. Ю., Грязев М. В., Яковлев С.С. Предельные возможности вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 21-26.

62. Грязев М. В., Яковлев С. С., Травин В. Ю. Силовые режимы вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 3-11.

63. Евдокимов А. К., Воронцова О.С. Вытяжка с утонением через две матрицы с учетом противонапряжения. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 65-70.

64. Агеев Н. П., Затеруха Е. В. Исследование неравномерности распределения степени деформации и механических свойств по сечению полых деталей, штампуемых способом вытяжки с утонением. Металлообработка. 2014. №3 (81). С. 36-42.

65. Нгуен К. Х., Митин О. Н., Нуждин Г. А. 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. С. 40-48.

66. Митин О.Н. Моделирование совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок. Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 1. С. 24-33.

67. Юсупов А. А., Икрамов А. А. Определение формы и размеров заготовки и переходов обжима. Техника и технологии машиностроения. 2017. С. 100-105.

68. Ред. совет: К56. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е. И. Семенова. Москва: Машиностроение, 1986. 592 с.

69. Аверкиев Ю. А., Аверкиев А. Ю. Технология холодной штамповки: Учебник для вузов. Москва: Машиностроение. 1989. 304 с.

70. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки. Учебник для вузов / под ред. Е. А. Попова, В. Г. Ковалева, И. Н. Шубина. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 480 с.

71. Сосенушкин Е. Н. Теоретические и технологические аспекты обжима в конической матрице / под ред. Е. Н. Сосенушкина, Е. А. Яновской, Д. В. Хачатряна и др. Москва: Известия МГТУ МАМИ. 2013. №1 (15). Т. 2. С. 139-145.

72. Калюжний В. Л., Соколовська С. С. Вплив тертя на формоутворення вісесиметричних порожнистих виробів із сталі 10 комбінованим витягуванням в одноконусній матриці. Обработка материалов давлением. 2017. № 1 (44). С. 77-83.

73. Шляпугин Н. И. Особенности моделирования процесса обжима-раздачи трубной заготовки в DEFORM-2d. Известия Самарского научного центра РАН. 2014. №4. Т. 16. С. 240-244.

74. Калюжний О. В., Калюжний В. Л. Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування: монографія. Київ: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. 290 с.

75. 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 Advanced Technologies. Київ. 2019. №1 (85). С. 111-117. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164271>.

76. Michalczyk J., Bajor T. Study on the influence of temperature, velocity and shape of tools on the combined process of extrusion and broaching of the deep

sleeve with the bottom made of the AZ31 alloy. Archives of metallurgy and materials. 2011. Vol. 56. P. 533-541. DOI: 10.2478/v10172-011-0057-1.

77. Журавлев Г. М., Нгуен Т. Ч. Расчет силовых параметров высокоскоростного холодного выдавливания. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 5, С. 25-32.

78. Swapna D., Srinivasa Rao Ch., Radhika S., Raviraja B. Deep drawing process. A brief overview NCAMMS Conference Paper. Ongole, 2015. P. 12-16.

79. Candra S., Batan I. M. L., Berata W., Pramono A. Analytical study and FEM simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing. Procedia CIRP. 2015. Vol. 26. P. 548 – 553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.08.018>.

80. Candra S., Batan I. M. L., Berata W., Pramono A. Modeling of critical blank holder force based on a gap limit and unbending strain energy in deep drawing process. International Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 7. № 2. P. 461-474.

81. Candra S., Batan I. M. L., Berata W., Pramono A. Modeling of the minimum variable blank holder force based on forming limit diagram (FLD) in deep drawing process. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 273. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/273/1/012014>.

82. Hani Aziz Ameen, Ali Hassan Saleh, Ola Hussein Abdulridha. Effect of clearance and blank thickness on stress distribution in elliptical deep drawing without blank holder using ansys. International Journal of Engineering Research & Technology. 2016. Vol. 5. P. 360-367.

83. H. Schmid, S. Suttner, M. Merklein. An incremental analysis of a deep drawing steel's material behaviour undergoing the predeformation using drawbeads. IOP Conf. Series Journal of Physics. 2017. Vol. 896. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/896/1/012010>.

84. P. Dudhat, S. Bagasariya, A. Khunt, A. Koladiya, J. Hirpara. Study of deep drawing process – A Review. International Journal for Innovative Research in

Science & Technology. 2017. Vol. 3. P. 103-106. URL: <https://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV3I8048.pdf>. (дата звернення: 18.11.2021).

85. Kadhim M. Abed. A design calculating system for deep drawing die by using simulation model. Thi-Qar University Journal for Engineering Sciences. 2011. Vol. 2. P. 1-15. URL: https://iraqjournals.com/article_38680.html?lang=ar. (дата звернення: 18.11.2021).

86. Mallika R. Bhatt, Sanjay H. Bunch. An expert system of die design for multi stage deep drawing process. 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics. Procedia Engineering. 2017. Vol. 173. P. 1650-1657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.257>.

87. I.E. Semenov, A.V. Ivanov. Numerical simulation of backward extrusion process with local acting of active friction forces. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022069>.

88. A. García-Domínguez, J. Claver, A.M. Camacho, M.A. Sebastián. comparative analysis of extrusion processes by finite element analysis. Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 74-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.344>.

89. Hrudkina N., Levchenko V., Aliiev I., Diachenko Y., Sivak R., Sukhovirska L. Estimating the initial stage in the process of radial-reverse extrusion using a triangular kinematic module. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 2. № 7. (116). P. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254867>.

90. M. Shariat Panahi, N. Moshtaghi Yazdani. Prediction of load in reverse extrusion process of hollow parts using modern artificial intelligence approaches. International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2014. Vol. 4. № 3, P. 372-377. DOI: <http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v4i3.5356>.

91. Yogesh Dewang, Vipin Sharma. Effect of process parameters on thermo-mechanical behavior of extrusion of aluminum alloy. Iranian Journal of Materials

Science and Engineering. 2021. Vol. 18. № 1. P. 21-31. URL: <http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-1645-en.html>. (дата звернення: 18.11.2021).

92. Bohai He. Failure and protective measures on punch & die for cold extrusion. The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling. 2012. P. 903-906. Published by Atlantis Press, Paris, France.

93. Weber F., Gebhard J., Gitschel R., Goyal S., Kamaliev M., Wernicke S., Tekkaya A. E. Joining by forming – A selective review. Journal of Advanced Joining Processes. 2021. Vol. 3. P. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100054>.

94. Demyanenko E.G., Popov I.P., Menshikov V.S. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation. Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012122>.

95. Liliang Wang, Jie Zhou, Jurek Duszczek, Laurens Katgerman. Friction in aluminium extrusion—Part 1: A review of friction testing techniques for aluminium extrusion. Tribology international. 2012. Vol. 56. P. 89-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.01.012>.

96. Mori K., Maeno T., Fukui Y. Spline forming of ultra-high strength gear drum using resistance heating of side wall of cup. CIRP Annals. 2011. Vol. 60. № 1. P. 299-302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.144>.

97. Ken-Ichiro Mori. Smart hot stamping of ultra-high strength steel parts. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012. Vol. 22. № 2. P. 496 – 503. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61752-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61752-X).

98. Mohamed S. Mohamed, Alistair D. Foster, Jianguo Lin, Daniel S. Balint, Trevor A. Dean. Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modelling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. Vol. 53, № 1. P. 27-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.07.005>.

99. Wen-yu Ma, Bao-yu Wang, Lei Fu, Jing Zhou, Ming-dong Huang. Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures.

Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015. Vol. 25. № 7. P. 2342-2351. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63849-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63849-3).

100. Tomoyoshi Maeno, Ken-Ichiro Mori, Takaaki Nagai. Improvement in formability by control of temperature in hot stamping of ultra-high strength steel parts. CIRP Annals. 2014. Vol. 63. № 1. P. 301-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.005>.

101. Xiao-bo Fan, Zhu-bin He, Wen-xuan Zhou, Shi-jian Yuan. Formability and strengthening mechanism of solution treated Al-Mg-Si alloy sheet under hot stamping conditions. Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 228. P. 179-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.10.016>.

102. Shi Y., Jin H., Wu P. D. Analysis of cup earring for AA3104-H19 aluminum alloy sheet. European Journal of Mechanics - A/Solids. 2018. Vol. 69. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.11.013>.

103. Yong Wu, Gang Liu, Zhi Qiang Liu, Bei Bei Kong. Thickness and Microstructure Analysis on Hot Gas Bulged Cup-Shaped Parts of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo. Key Engineering Materials. 2016. Vol. 716. P. 138-143. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.716.138>.

104. Mori K., Bariani P.F., Behrens B.-A., Brosius A., Bruschi, Maeno T., Merklein M., Yanagimoto J. Hot stamping of ultra-high strength steel parts. CIRP Annals. 2017. Vol. 66. № 2. P. 755-777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.007>.

105. Tomoyoshi Maeno, Ken-Ichiro Mori, Masaki Fujimoto. Improvements in productivity and formability by water and die quenching in hot stamping of ultra-high strength steel parts. CIRP Annals. 2015. Vol. 64. № 1. P. 281-284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.128>.

106. Yong Xue, Bing Bai, Suaisuai Chen, Hong Li, Zhimin Zhang, Bowen Yang. Study on processing and structure property of Al-Cu-Mg-Zn alloy cup-shaped part produced by radial-backward extrusion. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 95. P. 687-696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1073-8>.

107. Hong Bo Dong, Gao Chao Wang. Defect Analysis of Cup-shaped Aluminum Alloy Forgings with Flange. *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 154-155. P. 349-354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.349>.
108. Dong G., Zhao C., Peng Y., Li Y. Hot granules medium pressure forming process of AA7075 conical parts. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 28. P. 580–591. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0217.019>.
109. Panicker S.S., Prasad K. S., Sawale G., Hazra S., Shollock B., Panda S.K. Warm redrawing of AA6082 sheets and investigation into effect of aging heat treatment on cup wall strength. *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 768. P. 138445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138445>.
110. Birnbaum P., Baumann M., Kunke A., Krausel V., Landgrebe D. Combination of hot forming with CRP and rapid cooling to obtain enhanced formability in thermomechanical treatment. *MRS Advances*. 2017. Vol. 2. P. 957–962. DOI: <https://doi.org/10.1557/adv.2017.179>.
111. Omolayo M. Ikumapayi, Sunday T. Oyinbo, Ojo P. Bodunde, Sunday A. Afolalu, Imhade P. Okokpujie, Esther T. Akinlabi. The effects of lubricants on temperature distribution of 6063 aluminum alloy during backward cup extrusion process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. № 1. P. 1175-1187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.08.006>.
112. Zhigang Wang, Yasuharu Yoshikawa. A new forming method of triple cup by plate forging. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 389-394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.011>.
113. Zong-Yao Xie, Yan Tian, Qian Li, Jian-Cheng Zhou, Yi Meng. Effects of forming parameters on microstructure and mechanical properties of a cup-shaped Mg-8.20Gd-4.48Y-3.34Zn-0.3Zr alloy sample manufactured by thixoforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 1807-1819. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3114-3>.
114. Shengfa Zhu, Xincun Zhuang, Yue Yang, Yin Zhu, Zhen Zhao. Investigation of a tailored blank for the elimination of forging laps during cup

sidewall upsetting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 109. P. 2311-2324. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05834-5>.

115. Zhichao Zhang, Yongchao Xu, Yuan S. J. Analysis of temperature and stress in differential temperature reverse deep drawing of 5A06 aluminum cup. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2016. Vol. 68. P. 2483-2491. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1982-2>.

116. Xue Yh., Chen K., Fan Cj., Luo Jt. Deep drawing of cup shell by powder cavity flexible forming technology. *Journal of Central South University*. 2017. Vol. 24. P. 766–772. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3478-9>.

117. Syed Mujahed Hussaini, Swadesh Kumar Singh, Amit Kumar Gupta. Experimental and numerical investigation of formability for austenitic stainless steel 316 at elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. Vol. 3. № 1. P. 17-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.10.010>.

118. Kazuhisa Kusumi, Naruhiko Nomura, Shuji Yamamoto, Masahiro Nakata, Masayuki Abe, Masahiro Suehiro. Improvement of cylindrical deep drawability in hot stamping. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 1719-1724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.220>.

119. Li N., Mohamed M.S., Lin J., Balint D., Dean T. A. Experimental and numerical studies on the formability of materials in hot stamping and cold die quenching processes. *The 14th International ESAFORM Conference on Material Forming: ESAFORM, Belfast, (United Kingdom) 27–29 April 2011. Belfast, 2011. Vol. 1353. № 1. P.1555-1561. DOI: https://doi.org/10.1063/1.3589738*.

120. Nguyen DT., Dinh DK., Nguyen HM.T., Banh TL., Kim YS. Formability improvement and blank shape definition for deep drawing of cylindrical cup with complex curve profile from SPCC sheets using FEM. *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-014-1911-x>.

121. Ma Wy., Wang By., Fu l., Zhou J., Huang Md. Influence of process parameters on deep drawing of AA6111 aluminum alloy at elevated temperatures.

Journal of Central South University. 2015. Vol. 22. P. 1167–1174. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2630-7>.

122. Мезенцева О. М., Гуренко Д. А. Моделирование процесса обратного выдавливания деталей из сплава БрБ2 по схеме подвижного контейнера с применением DEFORM-2D. Студенческая весна. Машиностроительные технологии. МГТУ им. Н. Э. Баумана: сб. тезисов всероссийской научной конференции. Москва, 2008.

123. Поликарпов Е. Ю. Технологические режимы операции вытяжки с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. Вып. 3. С. 93-103. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-rezhimy-operatsii-vytyazhki-s-utoneniem-stenki-tolstostennyh-zagotovok-iz-anizotropnyh-materialov>. (дата звернения: 18.11.2021).

124. Платонов В. И., Поликарпов Е. Ю., Яковлев С. С. Осесимметричная вытяжка с утонением стенки толстостенных заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып.3, С. 89-101. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osesimmetrichnaya-vytyazhka-s-utoneniem-stenki-tolstostennyh-zagotovok-iz-anizotropnyh-materialov>. (дата звернения: 19.11.2021).

125. Ремнев К. С., Фам Дык Тхиен. Вытяжка с утонением стенки анизотропного упрочняющегося материала. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2. С. 192-201. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vytyazhka-s-utoneniem-stenki-anizotropnogo-uprochnyayuschegosya-materiala>. (дата звернения: 19.11.2021).

126. Яковлев С. С., Исаева А. Н., Пилипенко О. В. Силовые режимы вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 5, С. 16-24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/silovye-rezhimy-vytyazhki-s-utoneniem-stenki-tolstostennyh-tsilindricheskih-zagotovok-iz-anizotropnyh-materialov>. (дата звернения: 19.11.2021).

127. Ремнев К. С., Яковлев С. С. Технологические параметры операций обжима и раздачи трубных заготовок из анизотропного материала. Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып.2, С. 513-526. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-parametry-operatsiy-obzhima-i-razdachi-trubnyh-zagotovok-iz-anizotropnyh-materialov>. (дата звернения: 19.11.2021).

128. Звонов С. Ю., Попов И. П. Исследование особенностей изготовления осесимметричных конических деталей с заданной толщиной стенки. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Вып. 15. №6 (3). С. 685-691. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-osobennostey-izgotovleniya-osesimmetrichnyh-konicheskikh-detaley-s-zadannoy-tolschinoy-stenki>. (дата звернения: 19.11.2021).

129. Рыжов П. А., Евсюков С. А. Анализ краевого расширения при обжиме трубчатых заготовок. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 5. С. 14-22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kraevogo-rasshireniya-pri-obzhime-trubchatyh-zagotovok>. (дата звернения: 19.11.2021).

130. Кривошеин В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками. Известия вузов: Машиностроение. 2014. № 5. С. 49-53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-teoreticheskikh-i-eksperimentalnyh-dannyh-pri-issledovanii-protssessa-obzhima-v-matritse-s-koltsevymi-kanavkami>. (дата звернения: 19.11.2021).

131. Tiernan P., Hillery M.T., Draganescu B., Gheorghe M. Modelling of cold extrusion with experimental verification. Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 168. P. 360–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.249>.

132. Samołyk G., Winiarski G., Gontarz, A. A cold forging process for producing thin-walled hollow balls from tube using a plastic insert. The International

Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 108. P. 1429–1446. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05448-x>.

133. Woźniak D., Hojny M., Gądek T., Głowacki M. Numerical and experimental forming of axisymmetric products using methods of deep drawing and flow forming. Archives of metallurgy and materials. 2015. Vol. 60. P. 452-457. DOI: <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0453>.

134. Kailun Zheng, Junyi Lee, Jianguo Lin, Trevor A. Dean. A buckling model for flange wrinkling in hot deep drawing aluminium alloys with macrotextured tool surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017. Vol. 114. P. 21-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.12.008>.

135. Hakan Gürün, İbrahim Karaağaç. The experimental investigation of effects of multiple parameters on the formability of the DC01 sheet metal. Strojniški vestnik. Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 61. P. 651-662. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2562>.

136. Zhao R., Steiner J., Andreas K., Merklein M., Tremmel S. Investigation of tribological behavior of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 190. № 14002. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819014002>.

137. Candra S., Batan I. M. L., Berata W., Pramono A-S. Analisis dan eksperimen blank holder gap minimum pada proses rectangular cup deep drawing. Teknoin. 2016. Vol. 22. № 5. P. 372-382. DOI: <https://doi.org/10.20885/teknoin.vol22.iss5.art7>.

138. Tsung-Chia Chen, Ching-Min Hsu and Cheng-Chi Wang. The deep drawing of a flanged square hole in thin stainless steel sheet. Metals. 2021. Vol. 11. № 9. P. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11091436>.

139. Jie Song, Jun Feng, Junzhou Li, Rui Hou, Haiping Tian, An Sun. Study on deep drawing forming process of wheel disks. Research Square. 2022. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2087614/v1>.

140. Harith Yarub Maan. The influence of blankholder gap on deep drawing process using finite element method. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. P. 1510–1518.

141. Coer J., Laurent H., Oliveira M. C., Manach P. Y., Menezes L. F. Detailed experimental and numerical analysis of a cylindrical cup deep drawing Pros and cons of using solid-shell elements. *International Journal of Material Forming*. 2018. Vol. 11. P. 357-373. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1357-4>.

142. Atrian A., Panahi H. Experimental and finite element investigation on wrinkling behavior in deep drawing process of A13105/Polypropylene/Steel 1304 sandwich sheets. 17th International Conference on Metal Forming. Metal Forming. 16-19 September 2018. P. 984-991.

143. Qiang Wang, Zhimin Zhang, Jianmin Yu, Yong Xue. A novel backward extrusion process through rotating die and open punch. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. P. 383-388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.792>.

144. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Marchenko I., Shapoval A., Abhari P., Kordenko M. Predicting the shape formation of hollow parts with a flange in the process of combined radial-reverse extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4. № 1. P. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203988>.

145. Qiang Wang, Zhimin Zhang, Xubin Li, Huifang Zhang. Development of a novel high straining backward extrusion process. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 190. 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819006001>.

146. Lechner S., Roemisch U., Nitschke R., Gensch F., Mueller S. Optimization of the indirect extrusion process of copper-clad aluminum rods by methods of statistical experimental designs and numerical analyses. *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.663306>.

147. Yoon D. J., Kim E.-Z., Na K. H., Lee Y.-S. A study on the forming characteristics of AZ 31B Mg alloy in a combined forward–backward extrusion at warm temperatures. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. P. 2187. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8112187>.

148. Che X., Dong B., Liu K., Wang Q., Meng M., Gao Z., Ma J., Yang F., Zhang Z. An investigation on the microstructure and texture of an AZ80 cup-shaped piece processed by rotating backward extrusion. *Materials*. 2020. Vol. 13. P. 3690. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/ma13173690>.

149. Zeng J., Wang F., Dong S., Jin L., Fan Y., Dong J. Optimization of hot backward extrusion process parameters for flat bottom cylindrical parts of Mg-8Gd-3Y alloy based on 3D processing maps. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 108. P. 2149–2164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05516-2>.

150. Broomand R., Babaei A., Bashiri H. M., Zaheri M. H.. Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2022. Vol. 19. P. 225-242. DOI: <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.287462.1550>.

151. Алиева Л.И., Грудкина Н.С., Крюгер К. Моделирование процесса радиально-обратного выдавливания полых деталей. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. Vol. 79. № 1. P. 91-99. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95873>.

152 Jong-Taek Yeom, Jeoung Han Kim, Jae-Keun Hong, Nho-Kwang Park, Chong Soo Lee. Prediction of microstructure evolution in hot backward extrusion of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Metallurgy*, 2012. Vol. 2012. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/989834>.

153. Zhu N., Sun C., Qian L., Wang M., Li X. Novel process combined extrusion and severe plastic deformation for plate component with rib-web structure of magnesium alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08609-8>.

154. Raghupathi P. S., Setzer W. C., Baxi M. Cold extrusion, forming and forging. *ASM Handbook*. 2005. Vol. 14. P. 405-418. DOI: <https://doi.org/10.1361/asmhba0004005>.

155. Ban Bakir Alamer. The study of stress state in indentation of a flat punch with rounded edge in axisymmetric backward extrusion. / *Engineering &*

Technology Journal. 2013. Vol. 31. № 9. P. 1765-1778. DOI: <https://doi.org/10.30684/etj.2013.82188>.

156. Kuhnke S., Sanabria V., Gensch F., Nitschke R., Mueller S. Numerical investigations on material flow during indirect extrusion of copper-clad aluminum rods. *Front. Mater.* 2020. Vol. 7. P. 1-10. DOI: [doi: https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00157](https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00157).

157. Hosseini S.H., Abrinia K., Faraji G. Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminium. *Materials and Design*. 2015. Vol. 65. P. 521-528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.043>.

158. Szota P., Mróz S., Stefanik A., Laber K., Mola R. Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy. *Metalurgija*. 2021. Vol. 60 (1-2). P. 36-38. URL: <https://hrcak.srce.hr/246083> (дата звернення: 22.11. 2021).

159. Jennifer Tennera, Kolja Andreasa, Adrian Radiusa, Marion Merklein. Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces. *International Conference on the Technology of Plasticity: Procedia Engineering*. United Kingdom, 17-22 September 2017. Vol. 207. P. 2245 – 2250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.989>.

160. Zhang Zc., Xu Yc, Yuan Sj. Analysis of thickness variation of reverse deep drawing of preformed 5A06 aluminium alloy cup under different temperatures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. P. 521–529. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8179-7>.

161. Watcharasresomroeng B. Investigation on forming behaviour of sheet metal by test using cylindrical cup with hole. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 789. P. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.789.51>.

162. Harada Y., Nishikubo Y., Tanaka I. Drawability of functional corrugate cup using roller die. *Materials Transactions*. 2020. Vol. 61. P. 222-227. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-ML2019004>.

163. Fan X., He Z., Lin P., Yuan S. Microstructure, texture and hardness of Al-Cu-Li alloy sheet during hot gas forming with integrated heat treatment. *Materials & Design*. 2016. Vol. 94. P. 449-456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.001>.

164. Basril M. A. M., Azuddin M., Choudhury I.A. The effect of elevated temperature on the drawability of a circular deep drawn metal cup. *Metals*. 2019. Vol. 9. P. 1303. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9121303>.

165. Tang W., Huang S., Li D., Peng Y. Mechanical anisotropy and deep drawing behaviours of AZ31 magnesium alloy sheets produced by unidirectional and cross rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 215. P. 320-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.020>.

166. Parida A. K., Soren S., Jha R. N., Krishnamurthy N. Multistage cup drawing of thicker blanks of Al-killed AISI 1010 steel: A modified approach. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016. Vol. 70. P. 2059-2070. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-016-1027-0>.

167. Lang L., Liu B., Li T., Zhao X., Zeng Y. Experimental investigation on hydromechanical deep drawing of aluminum alloy with heated media. *Steel Research*. 2012. Vol. 83. P. 230-237. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201100231>.

168. Попов А. М., Данилин Г. А., Влияние условий штамповки на величину разностенности при вытяжке с утонением через две матрицы. Технологическая подготовка свободнойковки: монография, Москва: Политехника. 2009. 78 с.

169. Способ изготовления деталей типа «Крышка», «Дно»: пат. 74801 Россия: МПК В21К 21/00. № 2013104867; заявл. 05.02.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

170. Способ изготовления полых изделий: пат. 73934 Россия: МПК В21D 22/00. № 2015117930; заявл. 14.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

171. Способ изготовления гильзы патрона стрелкового оружия: пат. 2176573 Россия: МПК В21D. № 2000129022; заявл. 22.11.2000; опубл. 10.12.2001, Бюл. № 34.

172. Abe Y., Fujita T., Mori K.-i., Osakada K., Shiba T., Daodon W. Improvement of formability in ironing of stainless steel drawn cups using low friction cermet dies. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 1896-1901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.253>.

173. Đukić H., Nožić M. Limit values of maximal logarithmics strain in multi-stage cold forming operations. *Journal for Technology of Plasticity*. 2015. Vol. 40. № 1.

174. Коновалов В. А., Нельднер В. И., Устинов Д. А. Влияние параметров инструмента на формоизменение трубной заготовки с относительно толстой стенкой при холодном обжиге конической матрицей. *Омский научный вестник*. 2012. №2 (110). С. 86-89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-instrumenta-na-formoizmenenie-trubnoy-zagotovki-s-otnositelno-tolstoy-stenkoy-pri-holodnom-obzhime-konicheskoy> (дата звернения: 22.11.2021).

175. Коновалов В. А., Гаков А. В., Заяц С. И. Сравнительный анализ технологических возможностей схем обжима толстостенных трубных заготовок в конических матрицах. *Омский научный вестник*. 2016. № 3 (147). С. 23-27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-tehnologicheskikh-vozmozhnostey-shem-obzhima-tolstostennyh-trubnyh-zagotovok-v-konicheskikh-matritsah> (дата звернения: 22.11.2021).

176. Коновалов В. А., Белов С. И. Исследование устойчивости трубных заготовок с относительно толстой стенкой, обжимаемых матрицами углом конуса 50°. *Омский научный вестник*. 2017. № 1 (151). С. 9-12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ustoychivosti-trubnyh-zagotovok-s-otnositelno-tolstoy-stenkoy-obzhimaemyh-matritsami-s-uglom-konusa-50> (дата звернения: 22.11.2021).

177. Erdin M. E., Ozdilli O. Deep drawing of polymer coated metal sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. Vol. 33. P. 5383-5392. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1032-4>.

178. Hwang S.-F., Li Y.-R. Deep drawing behavior of metal-composite sandwich plates. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 6612. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196612>.

179. Misirli M., Ayday A. A new process optimization of deep drawing part for sheet metal forming in automotive industry. *Journal of Polytechnic*. 2022. Vol. 25. P. 879-885. DOI: <https://doi.org/10.2339/politeknik.911780>.

180. Zahedi E., Woerz C., Reichardt G., Umlauf G., Liewald M., Barz J., Weber R., Foerster D. J., Graf T. Lubricant-free deep drawing using CO₂ and N₂ as volatile media injected through laser-drilled microholes. *Manufacturing Rev. Special Issue - Advances in Research in New Forming Technology*. 2019. Vol. 6. P. 11. DOI: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019011>.

181. Zhao J., Wang T., Jia F., Li Z., Zhou C., Huang Q., Jiang Z. Experimental investigation on micro deep drawing of stainless steel foils with different microstructural characteristics. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 34. № 40. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00556-5>.

182. Tsuruya T., Danseko M., Sasaki K., Honda S., Takeda R. Forming state recognition in deep drawing process with machine learning. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2019. Vol.13. № 3. DOI: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0066>.

183. Shewakh W. M. Effect of lubricant type on deep drawing ratio and drawing force during cylindrical cup drawing. *Emirates Journal for Engineering Research*. 2022. Vol. 27, № 3. P. 1-5. URL: https://scholarworks.uaeu.ac.ae/ejer/vol27/iss3/3?utm_source=scholarworks.uaeu.ac.ae%2Fejer%2Fvol27%2Fiss3%2F3&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages (дата звернення: 22.11.2021).

184. Arhat R., Shchetynin V., Puzyr R., Savelov D., Haikova T. The assessment of the process of drawing a cylindrical workpiece without pressing with alternating strain of the workpiece flange. *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters:*

Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 280. P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007019>.

185. Zhang B., Meng W. J. Scaling anomaly in the mechanical response in microscale reverse extrusion of copper. *Journal of Micro- and Nano-Manufacturing*. 2020. Vol. 8 (1). 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4046043>.

186. Lin H.-S., Lee C.-Y., Li W.-S. Piercing and surface-crack defects in cold combined forward-backward extrusion. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11 (9). 6 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093900>.

187. Кроха В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. Москва: Издательство Машиностроение, 1968. 127 с.

188. Калюжний В. Л., Сабол С. Ф., Гожій С. П. Теоретичний аналіз процесів обробки металів тиском. Електронна книга. 2022. Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: https://scholar.google.com.ua/scholar?hl=uk&as_sdt=0,5&cluster=9211615983507921209. (дата звернення: 10.06.2022).

189. Іващенко В. В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Технологія гарячого штампування та конструювання штамків». Електронна книга. Київ, 2011. URL: <https://mpm-tp.kpi.ua/wp-content/uploads/2014/04/M-e-t-o-d-i-k-a-kursovogo-2011-SHr-12-.pdf>.

190. Навроцкий Г. А., Головина В. А., Нистратов А. Ф. Холодная объемная штамповка: справочник / под ред. Г. А. Навроцкого. Москва: Машиностроение, 1973. 496 с.

191. Драгобецький В. В., Калюжний О. В., Калюжний В. Л., Ситник С. В. Підвищення точності форми і розмірів порожнистих напівфабрикатів при гарячому зворотному видавлюванні із заготовок квадратного перерізу. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2024. Vol. 8. № 3. С. 256–264. DOI: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3\(102\).297388](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3(102).297388).

192. Evstratov V.A. Theory of processing of metals by pressure. Kharkov: High school. 1981. 248 p. (in Russian).

Химический состав в % материала 25 ГОСТ 1050 - 88								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.22 - 0.3	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08

Температура критических точек материала 25.								
$A_{c1} = 735$, $A_{c3}(A_{cm}) = 835$, $A_{r3}(A_{rm}) = 825$, $A_{r1} = 680$								

Технологические свойства материала 25 .								
Свариваемость:						без ограничений.		
Флокеночувствительность:						не чувствительна.		
Склонность к отпускной хрупкости:						не склонна.		

Механические свойства при $T=20^{\circ}\text{C}$ материала 25 .								
Сортамент	Размер	Напр.	σ_B	σ_T	δ_5	ψ	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Лист термообработ., ГОСТ 4041-71	4 - 14		390-540		26			
Пруток калиброван., ГОСТ 10702-78			540			50		Отжиг
Прокат, ГОСТ 1050-88	до 80		450	275	23	50		Нормализация
Прокат нагартован., ГОСТ 1050-88			540		7	40		
Прокат отожжен., ГОСТ 1050-88			410		19	50		
Лента отожжен., ГОСТ 2284-79			340-590		18			
Лента нагартован., ГОСТ 2284-79			540-880					

Рис. 1. Характеристика материалу марки сталь 25

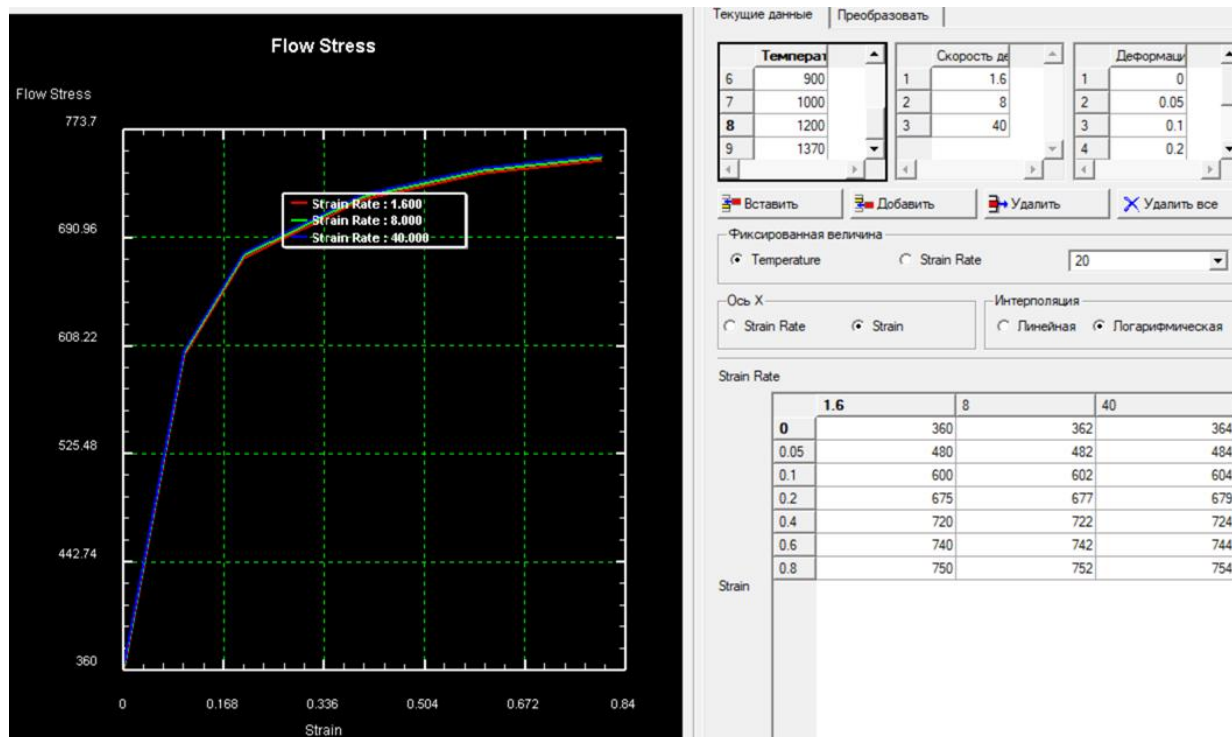


Рис. 2. Побудовані криві зміцнення материалу марки сталь 25

Додаток Б

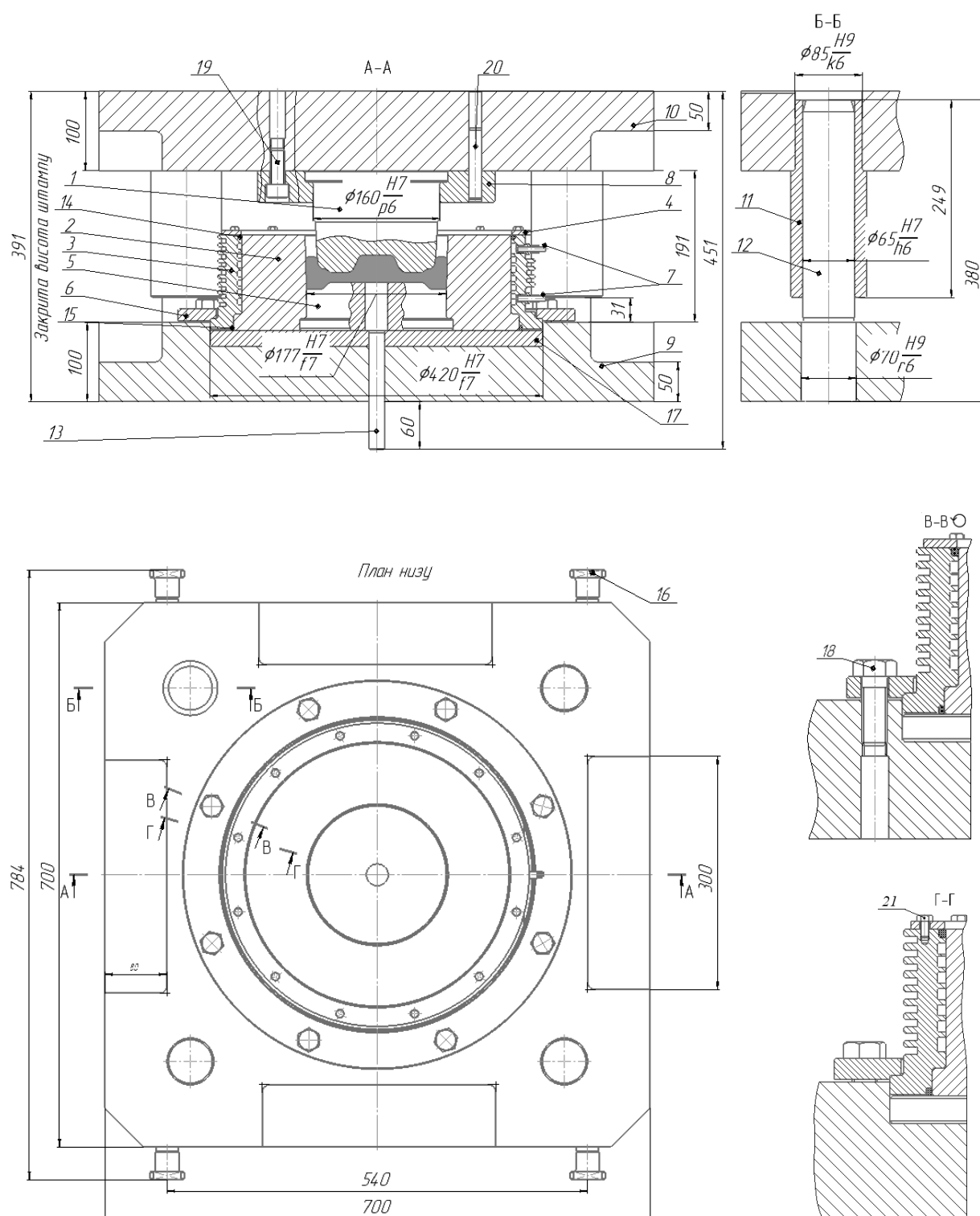


Рис. Б.1. Креслення загального вигляду штамп для операції гарячого зворотного видавлювання.

Рис. Б.2. Штамп для гарячого зворотного видавлювання. Специфікація
(лист 1)

[illegible]

Рис. Б.2. Штамп для гарячого зворотного видавлювання. Специфікація
(лист 2)

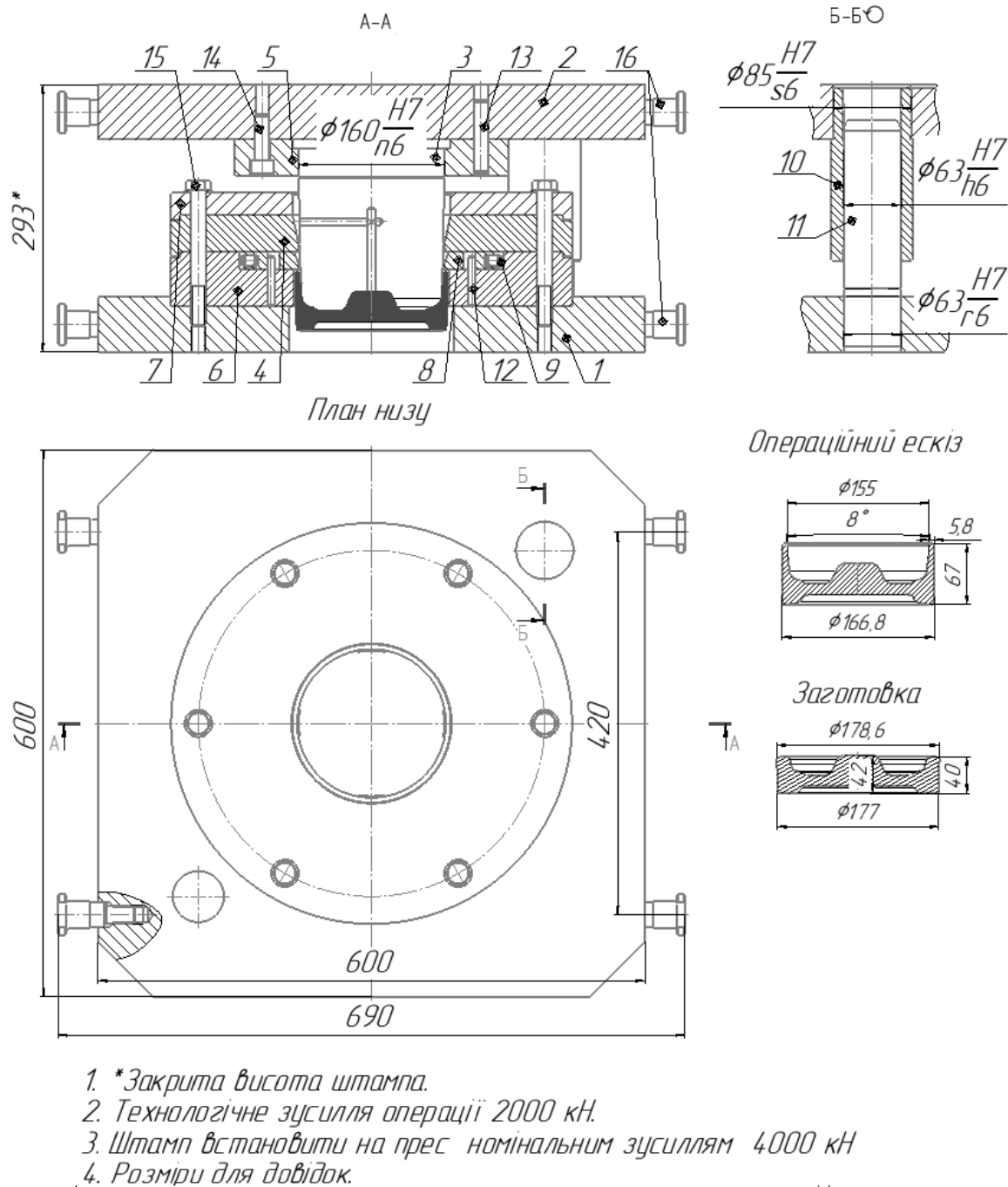


Рис. В.1. Креслення загального вигляду штампа для операції гарячого витягування з потоншенням. Масштаб 1:2

Перше застос.		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка	
						<u>Складальні одиниці</u>			
		А0				Штамп для гарячого витягування з потоншенням	1		
						<u>Деталі</u>			
Додат. №		БК	1			Плита нижня	1		
		БК	2			Плита верхня	1		
		БК	3			Пуансон	1		
		БК	4			Матриця	1		
		БК	5			Пуансонотримач	1		
		БК	6			Оправка	1		
		БК	7			Кільце	1		
		БК	8			Знімач	6		
Підпис і дата		БК	9			Пружина	6		
		БК	10			Втулка направляюча	4		
		БК	11			Колонка направляюча	4		
		БК	16			Штир транспортувальний	8		
Інв. № докл.						<u>Стандартні вироби</u>			
Зам. інв. №			12			Штифт 6 x 50 ГОСТ 3128-70	6		
			13			Штифт 10 x 70 ГОСТ 3128-70	4		
			14			Гвинт М12 x 45 ГОСТ 11738-84	6		
			15			Гвинт М16 x 110 ГОСТ 11738-84	6		
Підпис і дата									
Інв. № проєкт.		Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
		Розроб.	Лист	Листів					
		Перев.							
		Н.контр.							
		Затв.							
Штамп для гарячого витягування з потоншенням							Лит.	Лист	Листів
								1	2

Копіював _____ Формат А4

Рис. В.2. Штамп для гарячого витягування з потоншенням. Специфікація

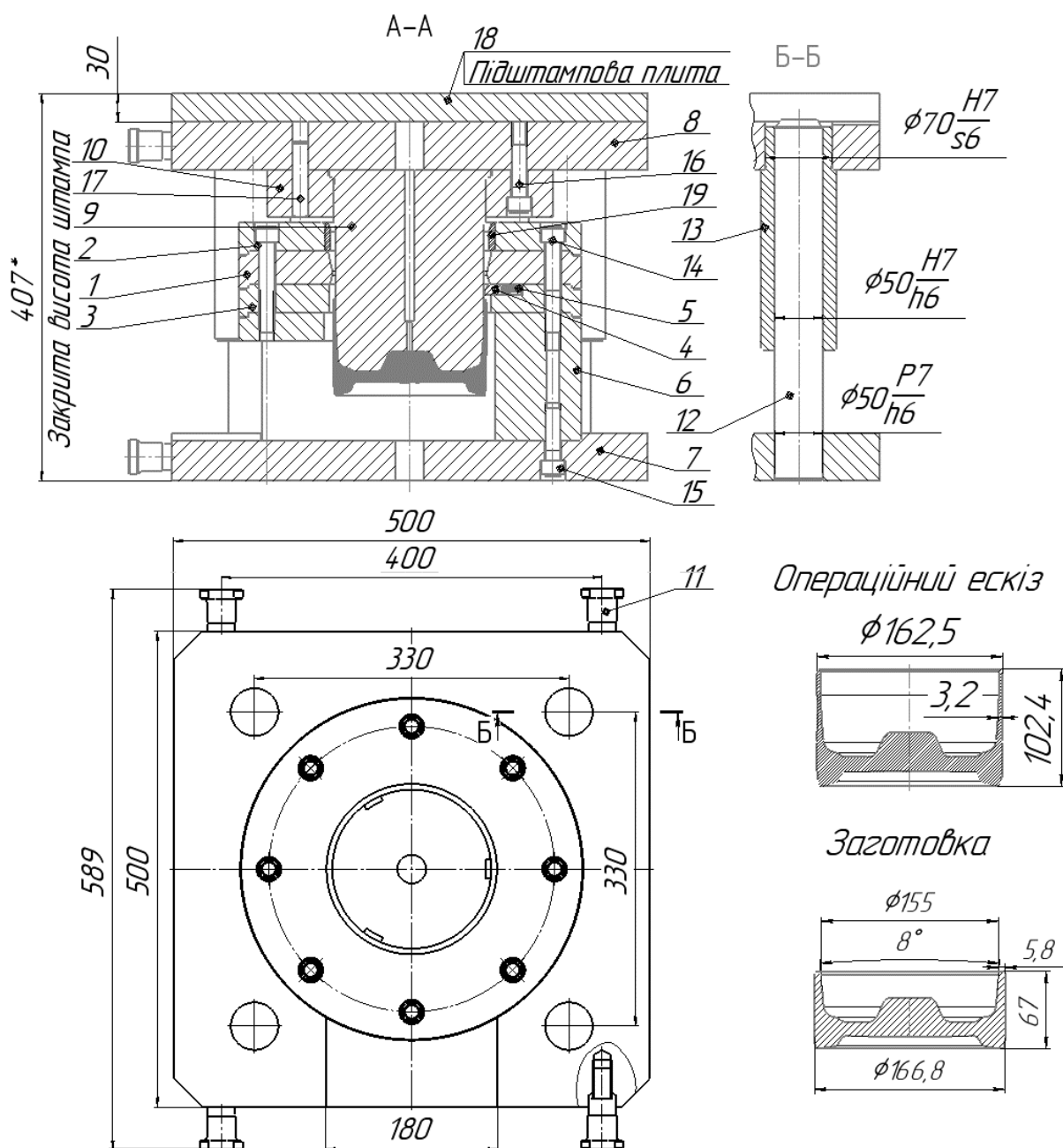


Рис. Г.1. Креслення загального вигляду штампа для операції холодного витягування з потоншенням. Масштаб 1:2

Перше застос.	Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка		
					<u>Складальні одиниці</u>				
	АО				Штамп для холодного витягування з потоншенням	1			
Додат. №					<u>Деталі</u>				
	БК		1		Матриця	1			
	БК		2		Оправка	1			
	БК		3		Проміжна оправка	1			
	БК		4		Знімач	6			
	БК		5		Пружина	6			
	БК		6		Вставка	1			
	БК		7		Плита нижня	1			
	БК		8		Плита верхня	1			
	БК		9		Пуансон	1			
	БК		10		Пуансонотримач	1			
	БК		11		Гвинт транспортувальний	8			
	БК		12		Колонка направляюча	4			
	БК		13		Втулка направляюча	4			
	БК		19		Вставка центруюча	1			
	Зам. інв. №					<u>Стандартні вироби</u>			
			14		Гвинт М16 х 110 ГОСТ 11738-84	6			
			15		Гвинт М12 х 45 ГОСТ 11738-84	6			
			16		Гвинт М12 х 45 ГОСТ 11738-84	6			
			17		Штифт 6 х 50 ГОСТ 3128-70	2			
Інв. № прораб.	Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
	Розроб.		Ситник С.В.			Штамп для холодного витягування з потоншенням	Лит.	Лист	Листів
	Перев.							1	2
	Н.контр.								
	Затв.								

Копія № _____ Формат А4

Рис. Г.2. Штмп для холодного витягування з потоншенням. Специфікація

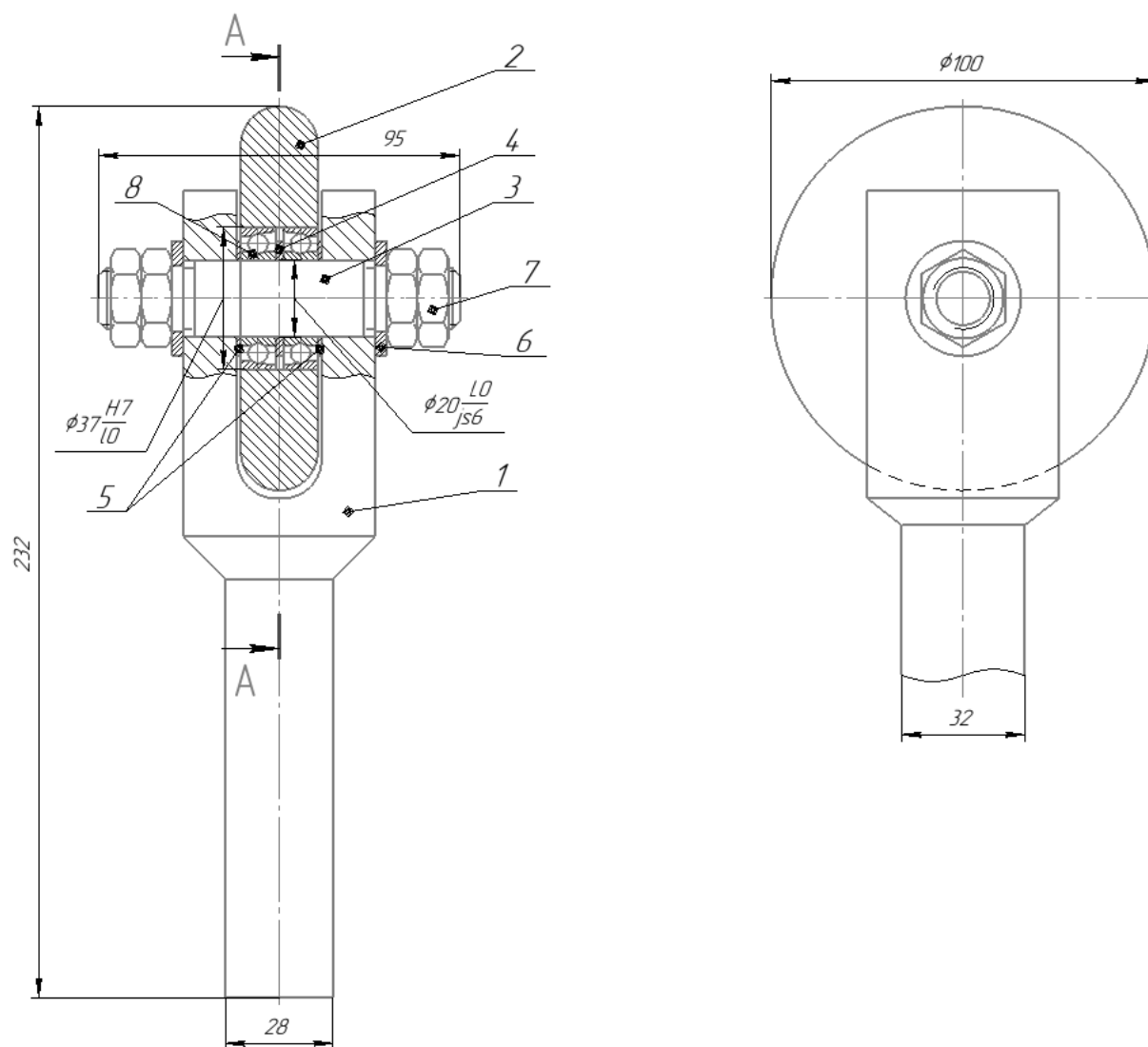


Рисунок Д.1. Креслення загального вигляду ролику для ротаційного витягування

№ дослідного зразка	Дно		Стінка	
	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , % не менше
1	520	18,2	351	21,3
2	522	18,3	349	21,2
3	522	18,3	351	21,3
Характеристики згідно креслення	500	18	338	21

Рис. Ж.1. Результати замірів механічних характеристик та механічні характеристики згідно креслення для порівняння

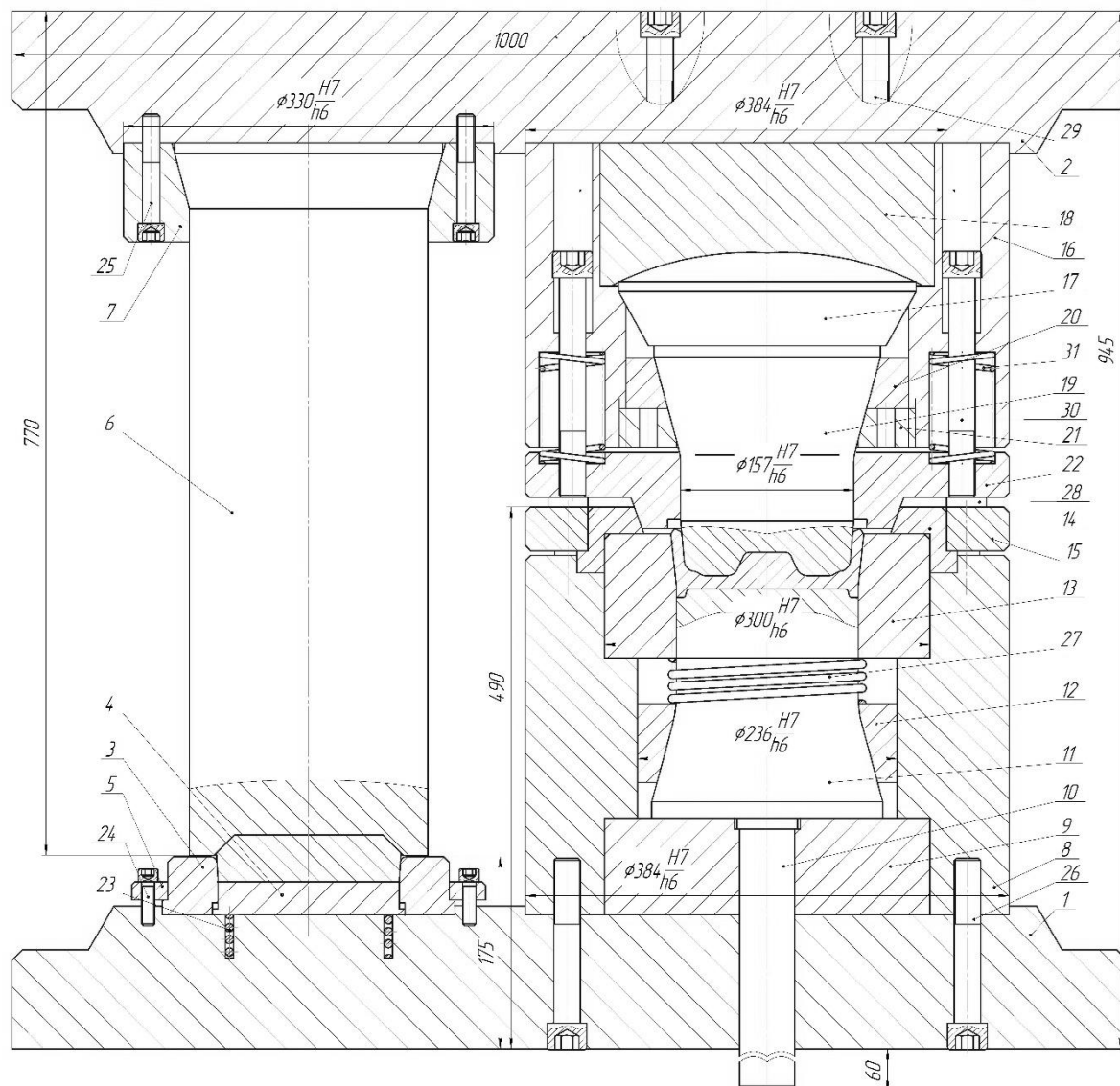


Рис. И.1. Креслення загального вигляду штампа для одночасного виконання
гарячого осаджування та зворотного видавлювання

Перше застос.		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка																																														
						<u>Складальні одиниці</u>																																																
		А0				Штамп для одночасного	1																																															
						гарячого осаджування																																																
						та зворотного видавлювання																																																
						<u>Деталі</u>																																																
Лист №		БК		1		Плита нижня	1																																															
		БК		2		Плита верхня	1																																															
		БК		3		Матриця для осаджування	1																																															
		БК		4		Виштовхувач	1																																															
		БК		5		Кільце	1																																															
		БК		6		Пуансон для осаджування	1																																															
		БК		7		Пуансонотримач	1																																															
		БК		8		Вставка	1																																															
		БК		9		Плита підкладна	1																																															
		БК		10		Штовхач	1																																															
		БК		11		Виштовхувач	1																																															
		БК		12		Втулка виштовхувача	1																																															
		БК		13		Матриця для видавлювання	1																																															
		БК		14		Тримач матриці	1																																															
		БК		15		Кільце	1																																															
		БК		16		Пуансонотримач	1																																															
		БК		17		Плита підкладна	1																																															
		БК		18		Підп'ятник	1																																															
		БК		19		Пуансон для видавлювання	1																																															
Підпис і дата	БК		20			Тримач пуансона	1																																															
	БК		21			Кільце підтискне	1																																															
<table border="1"> <tr> <td>Зм.</td> <td>Лист</td> <td>№ докум.</td> <td>Підпис</td> <td>Дата</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Разроб.</td> <td></td> <td>Ситник С.В.</td> <td></td> <td></td> <td colspan="4" rowspan="3">Штамп для одночасного гарячого осаджування та зворотного видавлювання</td> </tr> <tr> <td>Перев.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Н.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Затв.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Лит.</td> <td>Лист</td> <td>Листів</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> <td></td> </tr> </table>									Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					Разроб.		Ситник С.В.			Штамп для одночасного гарячого осаджування та зворотного видавлювання				Перев.					Н.контр.					Затв.					Лит.	Лист	Листів								1	2	
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата																																																		
Разроб.		Ситник С.В.			Штамп для одночасного гарячого осаджування та зворотного видавлювання																																																	
Перев.																																																						
Н.контр.																																																						
Затв.					Лит.	Лист	Листів																																															
						1	2																																															
<div> <div>Копіював</div> <div>Формат A4</div> </div>																																																						

Рис. И.2. Штамп для одночасного виконання гарячого осаджування та зворотного видавлювання. Специфікація

[illegible]

Рис. И.2. Штмп для одночасного виконання гарячого осаджування та зворотного видавлювання. Специфікація (лист 2)

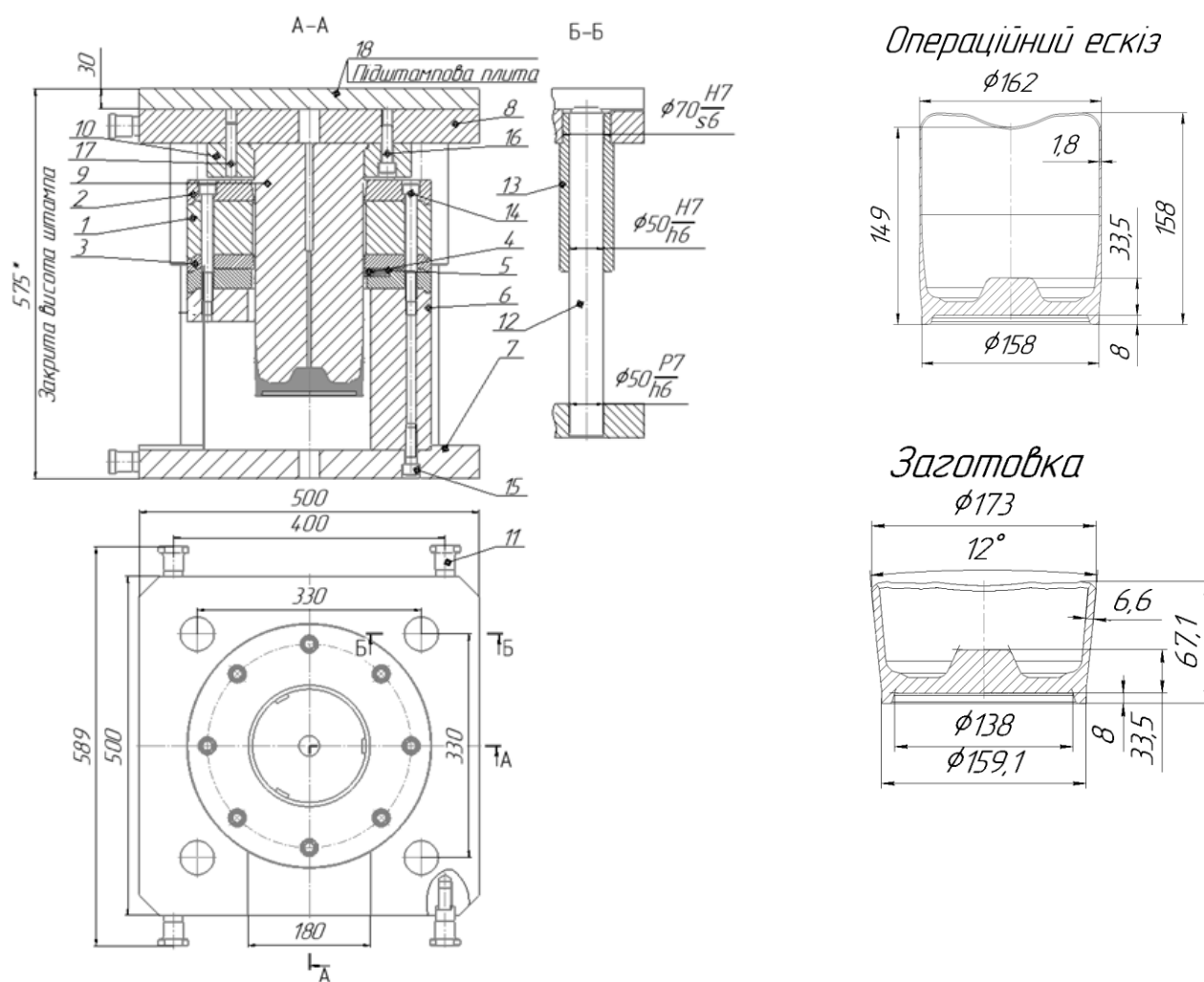



Рис. К.1. Креслення загального вигляду штампа для операції гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці.

Масштаб 1:2

Перше застос.		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка	
Додат. №						<u>Складальні одиниці</u>			
		А0				Штамп для гарячого	1		
						витягування з потоншенням			
						через дві послідовно			
						розташовані матриці			
						<u>Деталі</u>			
		БК	1		Проміжна втулка	1			
		БК	2		Матриця верхня	1			
БК	3		Матриця нижня	1					
БК	4		Знімач	6					
БК	5		Пружина	6					
БК	6		Втулка нижня	1					
БК	7		Плита нижня	1					
БК	8		Плита верхня	1					
БК	9		Пуансон	1					
БК	10		Пуансонотримач	1					
БК	11		Гвинт транспортувальний	8					
БК	12		Колонка направляюча	4					
БК	13		Втулка направляюча	4					
Зам. інв. №						<u>Стандартні вироби</u>			
			14		Гвинт М16 x 110 ГОСТ 11738-84	6			
			15		Гвинт М12 x 45 ГОСТ 11738-84	6			
Підпис і дата						Гвинт М12 x 45 ГОСТ 11738-84	6		
						Штифт 6 x 50 ГОСТ 3128-70	2		
			16						
Інв. № вироб.									
		Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
		Розроб.	Листник С.В.						
		Перев.							
		Н.контр.							
		Затв.							
Штамп для гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці							Лит.	Лист	Листів
								1	2

Копіював _____ Формат А4


Рис. К.2. Штамп для гарячого витягування з потоншенням через дві послідовно розташовані матриці. Специфікація

<p>Limited liability company "Bureau of special technical engineering "STANDARD.T" 7, Kruhlounivesyetskya str, of. 33 Kyiv 01024 Ukraine +38 (093) 320-35-21 bste.t.info@ukr.net</p>	 STANDARD.T BUREAU OF SPECIAL TECHNICAL ENGINEERING	<p>ТОВ «Бюро спеціально-технічного інжинірингу «СТАНДАРТ.Т» Україна, 01024, м.Київ вул.Круглоуніверситетська 7, оф.33 +38 (093) 320-35-21 bste.t.info@ukr.net</p>
--	---	---

№ 354/свд від 05.11 2024р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор



Олександр КАРПЕНКО

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 протягом 2021-2024 р. науково-дослідної роботи «Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні із маловуглецевої сталі заготовок гільз для снарядів середнього калібру» розроблена технологія виготовлення із матеріалу Сталь ІІЮА гільз для артилерійських снарядів середнього калібру. Технологія включає операцію гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату з виступом на донній частині зі сторони порожнини, операцію гарячого витягування з потоншенням, холодного витягування з потоншенням, операцію осаджування бурта з локальним нагрівом заготовки та операцію ротаційного витягування. Для реалізації операцій видавлювання, витягування і осаджування розроблено та спроектовано конструкції штампового оснащення, яке може бути встановлене на існуючому пресовому обладнанні на підприємствах України. Для операції ротаційного витягування розроблено та спроектовано технологічне оснащення.

Вищенаведена технологія, в порівнянні з існуючими, забезпечує більш високу продуктивність виготовлення гільз, економію металу, становить значний економічний інтерес для нашої компанії і планується до використання у виробничому процесі ТОВ «Бюро спеціально-технічного інжинірингу «Стандарт.Т».




Представники КПП ім. Ігоря Сікорського	Представники ТОВ «Бюро спеціально-технічного інжинірингу «СТАНДАРТ.Т»
Науковий керівник розробок д.т.н., проф. Володимир КАЛЮЖНИЙ	Директор
	 Олександр КАРПЕНКО
Виконавці:  аспірант Станіслав СИТНИК	

Рис. Л.1. Акт впровадження на підприємстві ТОВ «БСТІ «СТАНДАРТ.Т»

“Затверджую”

Проректор з навчальної роботи
Національного технічного університету

України "Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського"

Тетяна ЖЕЛЯСКОВА

"10 жовтня 2024 р.



про використання результатів досліджень аспіранта кафедри технології виробництва літальних апаратів (ТВЛА) Ситника Станіслава Володимировича в навчальному процесі на навчально-науковому механіко-машинобудівному інституті (НН ММІ) для підготовки бакалаврів і магістрів по спеціальності
«131 – Прикладна механіка»

На кафедрі технології виробництва літальних апаратів проводяться дослідження та розробка процесів холодного і гарячого об'ємного та листового штампування виробів необхідної форми і якості із різних марок сталей і кольорових металів. Аспірантом Ситником С.В. в період навчання в аспірантурі з 2021 р. під керівництвом д.т.н., проф. Калюжного В.Л. розроблена інноваційна технологія штампування порожнистих виробів із сталі зі стінкою змінної товщини по висоті, яка включає операції гарячого зворотного видавлювання порожнистого напівфабрикату, гарячого витягування з потоншенням, холодного витягування з потоншенням, осаджування бурта з локальним нагрівом заготовки та ротаційне витягування. Параметри для проектування технологій наведених операцій визначені шляхом комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів. На перераховані операції розроблені і спроектовані конструкції штампового оснащення та технологічного пристосування.

Результати дисертаційної роботи Ситника С.В. використовуються в лекційних курсах «Технологія холодного об'ємного штампування», «Інтенсифікація процесів листового штампування», «Комп'ютерні методи моделювання процесів виготовлення конструкцій літальних апаратів» та при виконанні курсових проектів і робіт по вказаних курсах. Також проведені розробки використовуються при виконанні дипломних робіт бакалаврів і магістерських дисертацій по спеціальності 131 – прикладна механіка.

Директор НН ММІ
к.т.н., доцент

Ігор ГРИШКО

Завідувач кафедри ТВЛА
к.т.н., доцент

Антон ЛАВРІНЕНКОВ

Науковий керівник
д.т.н., проф.

Володимир КАЛЮЖНИЙ

Аспірант

Станіслав СИТНИК

Рис. Л.2. Акт використання результатів дослідження в навчальному процесі на кафедрі ТВЛА