

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра загальної та прикладної фізики

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**  
на тему: «**БІМЕТАЛЕВА ЗАГОТОВКА ДЛЯ**  
**РЕАКТОРІВ ВИРОБНИЦТВА ТИТАНУ**»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1051

спеціальності 105 прикладна фізика та  
наноматеріали  
(шифр і назва спеціальності)

А.В. Башинський  
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри загальної та прикладної  
фізики, доцент, к.ф-м.н. Яновський О. С.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент завідувач кафедри мікро- та  
наноелектроніки, доцент, к.ф-м.н., д-р.т.н.,  
Сніжної Г.В  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2022

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет математичний  
Кафедра загальної та прикладної фізики  
Рівень вищої освіти магістр  
Спеціальність 105 прикладна фізика та наноматеріали  
(шифр і назва)  
Освітня програма прикладна фізика

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри загальної та  
прикладної фізики, професор  
кафедри, д.п.н., доцент  
Андрєєв А.М.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Башинському Артемію Вадимовичу

(прізвище, ім'я та по-батькові)

1. Тема роботи «Біметалева заготовка для реакторів виробництва титану»
- керівник роботи Яновський Олександр Сергійович, к.ф.-м.н, доцент  
(прізвище, ім'я та по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом ЗНУ від « 16 » 09 2022 року № 1206-с
2. Строк подання студентом роботи 26.11.2022
3. Вихідні дані до роботи 1. Постановка задачі.  
2. Перелік питань до розробки.  
3. Основна література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
1. Огляд літератури стосовно біметалів.  
2. Способи виготовлення біметалевих заготівок та галузь їхнього застосування.  
3. Методика проведення дослідження.  
4. Чисельний розрахунок комбінацій матеріалів для біметалевих заготівок.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_  
презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Яновський О.С., кандидат ф.-м. наук	25.01.2022	18.03.2022
2,3	Яновський О.С., кандидат ф.-м. наук	23.03.2022	05.09.2022
4	Яновський О.С., кандидат ф.-м. наук	10.09.2022	20.11.2022

7. Дата видачі завдання 25.01.2022

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка плану роботи.	03.02.22	
2.	Збір вихідних даних.	12.02.22	
3.	Обробка методичних та теоретичних джерел.	25.04.22	
4.	Розробка першого та другого розділу.	13.08.22	
5.	Розробка третього та четвертого розділу.	28.10.22	
6.	Оформлення та нормоконтроль кваліфікаційної роботи.	25.11.22	
7.	Захист кваліфікаційної роботи.	14.12.22	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

А.В. Башинський \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.С. Яновський \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.С. Яновський \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Біметалева заготовка для реакторів виробництва титану»: 92 с., 36 рис., 12 джерел.

ГАРЯЧА ДЕФОРМАЦІЯ, ВИДАВЛЮВАННЯ, БІМЕТАЛЬОВА ЗАГОТІВКА, БІМЕТАЛ, ОБ'ЄМНЕ ШТАМПУВАННЯ, КОНТЕЙНЕР, ПУАНСОН, ШТАМП, ПРЕСУВАННЯ, СТАЛЬ, ПРОКАТКА, ПОКУВАННЯ, ШАР

Об'єкт дослідження – біметалева заготівля.

Предмет дослідження – основні методи побудови біметале та галузь його застосування, визначено деякі особливості комбінації металів, які придатні для створення шаруватої біметалевої видавленої заготовки.

Мета роботи – оцінка впливу факторів гарячої деформації при видавлюванні біметалевої заготовки.

Метод дослідження: аналітичний.

У кваліфікаційній роботі оцінено вплив факторів гарячої деформації при видавлюванні біметалевої заготовки. Визначено рекомендовані варіанти комбінацій матеріалів для створення біметалевої заготовки.

## SUMMARY

Master's qualification work “Bimetallic billet for titanium production reactor”: 92 pages, 36 figures, 16 sources.

HOT DEFORMATION, EXTRUSION, BIMETALLIC BILLET, BIMETAL, VOLUME STAMPING, CONTAINER, PUNCH, STAMP, PRESSING, STEEL, ROLLING, PACKAGING, LAYER

The object of research is a bimetallic workpiece.

The subject of the study is the main methods of bimetal construction and the field of its application, some features of the combination of metals, which are suitable for creating a layered bimetallic extruded blank, are determined.

The purpose of the work is to assess the influence of hot deformation factors during extrusion of a bimetallic workpiece.

Research method: analytical.

In the qualification work, the influence of hot deformation factors during extrusion of a bimetallic workpiece was evaluated. The recommended variants of combinations of materials for the creation of a bimetallic workpiece are determined.

## ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну роботу.....	2
Реферат .....	4
Summary.....	5
Вступ.....	7
1 Спосіб виготовлення біметальних заготовок та галузь їхнього застосування .....	10
1.1. Біметал .....	10
1.2. Сфера застосування.....	14
1.3. Виготовлення біметалів .....	25
1.4. Пресування .....	27
1.5. Видавлювання металу.....	25
1.6. Гаряча прокатка біметалів .....	34
1.7. Способи отримання біметалу сталь-титан.....	41
1.8. Інтенсивна пластична деформація при видавлюванні .....	49
1.9. Моделювання процесу видавлювання біметалевої заготовки .....	54
2 Особливості роботи комплексу для математичного моделювання процесів ОМТ .....	59
2.1. Призначення програми QForm .....	59
2.2. Основні особливості системи .....	60
2.3. Можливості розрахункової програми .....	62
2.4. Робота QForm .....	64
3 Методика проведення дослідження .....	70
4 Чисельний розрахунок комбінацій матеріалів для біметалевої заготовки ..	74
4.1. Важкоутворювані біметалеві сполучення.....	74
4.2. Отримання шаруватих біметалевих заготовок видавлюванням .....	77
Висновки.....	91
Перелік літератури .....	92

## ВСТУП

Біметал – це композит, що складається найчастіше з двох шарів, шар дешевої сталі в біметалах завжди називається основною. Шар іншого ж матеріалу – плакуючим.

При цьому різняться і способи їх виробництва. Усі зростаючі вимоги промисловості до рівня властивостей використовуваних матеріалів є каталізатором для створення нових і удосконалення відомих економічно ефективних технологій їх виробництва.

Термобіметалічні матеріали належать до групи прецизійних матеріалів. Біметал застосовується:

- для карбування монет (при цьому використовуються різні спеціальні сплави);
- для виготовлення корпусів нафтохімічного та атомно-енергетичного обладнання (при цьому використовують корозійностійкий біметал);
- при виготовленні підшипників ковзання (при цьому використовуються антифрикційні біметали);
- при виготовленні вузлів ракетно-космічної техніки (при цьому використовуються біметали з особливими властивостями);
- при виготовленні біметалевих радіаторів опалення;
- в античності та середньовіччі використовувалися при виготовленні мечів (у наші дні може використовуватись для декорованих ножів «під сталь»).

Виготовлення:

- Одночасна прокатка;
- у разі біметалічної проволочки – волочінням труби зі вкладеним усередину стрижнем з іншого металу;
- Одночасне пресування;

- налив розплаву одного металу на інший, більш тугоплавкий;
- занурення у розплав;
- гальванічний спосіб;
- газотермічне напилення;
- наплавлення;
- електричним нагрівом;
- плазмовим нагрівом;
- зварювання вибухом.

Застосування нових технологій дозволяє виробляти сучасну техніку все більш досконалою. Для її виготовлення майже завжди використовуються шаруваті металеві композити, також використовують у виробництві харчової, хімічної, нафтохімічної, обладнання та іншої апаратури. Їх відрізняється: висока міцність, довговічність, тепло- та електропровідність, а також стійкість до корозії.

Біметалічні конструкції застосовуються у машинобудуванні, промисловості, сільському господарстві. У галузі суднобудування з матеріалу виробляються антикорозійні частини, що не потребують додаткової міцності. Для сільського господарства з біметалів виробляється обладнання для обробки ґрунту (біметалеві деталі не потребують заточування). У галузі приладобудування використовуються різні види пластин з біметалів, з різним температурним коефіцієнтом розширення. Труби та листи з біметалу знайшли застосування в галузі хімічного апаратобудування. Для електромереж використовуються контактні біметали.

Виробники біметалів – великі металургійні підприємства, які в ході виробництва застосовують різні технології:

- прокатка (у гарячому та холодному стані);
- налив розплавів;
- неперервне та відцентрове лиття;
- наплавлення (електрошлакове, багат шарова);
- газотермічного напилення та ін.



Також, у побуті біметалі крім ріжучого інструменту, що використовують для виробництва опалювальних мереж. В останні роки у населення користуються попитом біметалічні радіатори.

Дипломну роботу розглянуто на кафедрі загальної та прикладної фізики від 12.11.2022 року.

# 1 СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛЬНИХ ЗАГОТОВОК ТА ГАЛУЗЬ ЇХНЬОГО ЗАСТОСУВАННЯ

## 1.1 Біметал

Сучасні технології стають дедалі складнішими, тому сировина, що використовується виробниками, повинна вмещувати матеріали найвищої якості, як правило, зі спеціальними властивостями. Наприклад, нині широко використовуються шаруваті металеві композити (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Шаруваті металеві композити [1]

Біметал – це композиційний матеріал, який зазвичай складається з двох шарів. Одним із шарів цього матеріалу, як правило, є дешева сталь. Інший же шар зроблений з дорогих кольорових чи навіть дорогоцінних металів. Шар дешевої сталі в біметалах завжди називається основною. Шар дорогого ж матеріалу – плакуючим. Цей тип композиційного матеріалу зазвичай використовують, коли необхідно надати виробу особливі властивості. Також використання цього матеріалу в різних галузях допомагає економити на алюмінії, міді, бронзі, сріблі та ін. [1].

Виготовлятися такі композити можуть з різними цілями. При цьому різняться і способи їх виробництва. Усі зростаючі вимоги промисловості до рівня властивостей використовуваних матеріалів є стимулом для створення нових і удосконалення відомих економічно ефективних технологій їх виробництва. Серед таких технологій все більшу роль відіграють технології отримання біметалевих матеріалів, робочого шару який забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики виробів (зносо- та корозійностійкість, фрикційні чи антифрикційні властивості та ін.) [1].

Корозійностійкі біметалі. Основний матеріальний шар цього різновиду, що складається з низьколегованої або низьковуглецевої сталі. Плакуючий зроблений із нержавіючої сталі. Так само шар може бути мідний, нікелевий, алюмінієвий. Такі метали використовуються у вигляді тонких і товстостінних листів, наприклад, у таких галузях, як: нафтопереробна; хімічна; харчова; суднобудування (рис. 1.2) [1]

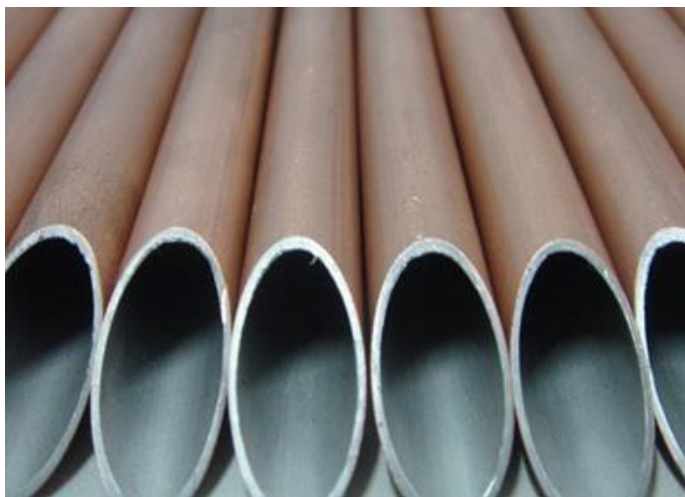


Рисунок 1.2 – Алюмінієві труби [1]

Антифрикційний. У більшості з цих матеріалів можна виготовити підшипники ковзання. Покриття антифрикційного біметалу, як правило, є бронзовим або алюмінієвим. Такі матеріали мають гладкі розсунві поверхні. Але в той же час вони не дуже сильні. Тому в цьому біметалі низьковуглецева сталь використовується як основний шар. Цей композитний матеріал у вигляді

стрічки був випущений. Надалі з цього матеріалу виготовлятимуть підшипники ковзання (рис 1.3) [1].



Рисунок 1.3 – Вкладиші підшибників [1]

Інструментальні біметалі. Цей тип матеріалу можна використовувати, наприклад, для виготовлення пилок, ножів та інших різальних інструментів. Крім усього іншого, міцність і довговічність цього біметалу відрізняються. В якості основного шару використовують низьковуглецеву сталь. Плакуючий при цьому виготовляється із твердих сплавів. Також іноді його роблять і з легованої хромом сталі (рис. 1.4) [1].



Рисунок 1.4 – Різальний інструмент [1]

Електропровідні матеріали. Цей тип біметалу зазвичай використовується на високовольтних лініях електропередач у північних регіонах. Основний шар у них виготовляється зі сталі. Плакуючий при цьому роблять із металів з

хорошою електропровідністю. Найпоширенішим є мідь. Також плакучий шар електропровідних матеріалів може бути виконаний алюмінієм. [1]

Термічні біметалі зазвичай являють собою смуги, які можна зігнути при перепадах температури. Один шар цього композиційного матеріалу, що складається з металу з високим коефіцієнтом лінійного розширення. Наприклад, це можуть бути певні сплави. Кольорові метали також часто використовують у термокомпозитах, для виготовлення таких покриттів. Інший шар матеріалів цього типу зазвичай роблять із практично нездатного до розширення сплаву нікелю та залізу. Цей біметал найчастіше використовується у виробництві різного обладнання. Це можуть бути, наприклад, термостати, захисні реле, термометри (рис. 1.5) [1].



Рисунок 1.5 – Біметалічні термометри [1]

## 1.2 Сфера застосування

В даний час, велика різноманітність видів і складів біметалів та прагнення знайти найбільш обґрунтований спосіб виробництва для шкірного виду, існує безліч способів отримання біметалів. Тисячі патентів на способи отримання різних типів біметалів зареєстровані у патентній літературі. Виробництвом біметалів зайнята велика кількість заводів. Природно, що технологія виробництва біметалу відображається обладнанням на заводі, де він виробляється [2].

Усі ці методи можна розділити на кілька категорій за їх виробничими принципами: пластичну деформацію, спричинену литтям, зварюванням пайкою, зварювання вибуховим, наплавлення, тощо. Методи, що використовують, які не вимагають пластичної деформації для виконання пластичної деформації, між компактними матеріалами утворюється міцний перехідний шар [2].

У процесі паяння, щоб запобігти поверхневому окисленню під час нагрівання, поліпшити змочуваність, розподілити припій, видалити утворену оксидну плівку та забруднювачі, потік та захисну газову середу. Пайка не спричинить змін у структурі матеріалу (наприклад, внутрішні напруги) та механічних властивостей матеріалів, що з'єднуються.

Основними недоліками цього типу є низька міцність при змінних вібраційних навантаженнях, відносно низька довговічність порівняно з іншими типами цілісних з'єднань і неможливість якісно перевірити міцність з'єднання без повного руйнування з'єднання [2].

Найпоширенішими методами отримання біметалів методом заливки є відцентрове лиття та послідовна заливка металів. Даний вид з'єднання металів менш чутливий до змінних та вібраційних навантажень.

Цей метод є найдавнішим способом, що застосовується для отримання різних видів біметалічних виробів. Метод підстав, на отриманні двох або більше шарів злитків шляхом відбивання одного або декількох шарів на твердий шар іншої композиції.

Метод отримання біметалів заливкою застосовується для отримання великих злитків масою до 13 т, та дрібних злитків вагою кілька кілограмів.

Залежно від складу, форми та ваги злитка, що вимагається, способів має варіант, що має сильне місцеве стиснення та значне сумарне стиснення. З'єднання біметалічного шару може відбуватися в процесі заливання, та під час гарячої обробки тиском [2].

Заливка рідким металом твердої пластини, поміщеної у виливницю, застосовується для отримання багатьох видів біметалів різного призначення.

Зокрема, цей спосіб застосовується для отримання корозійностійких листових біметалів сталь + нержавіюча сталь, сталь + мідь, сталь + мідні сплави, для отримання термобіметалів, у яких один шар є сплавом на основі кольорових металів, для отримання провідникових біметалів сталь + мідь, для отримання інструментального біметалу сталь + інструментальна сталь, для отримання зносостійкого смугового біметалу для відвалів плугів м'яка сталь + тверда криця, для отримання самозагострювального профільного біметалу для плужних лемешів сталь - інструментальна сталь, для отримання двошарового круглого прокату для виготовлення суднових.

Найбільш широко використовуваним методом є виробництво стійкої до корозії біметалевої біметалу для хімічної промисловості та виробництво зносостійкої стрічкової сталі для плугів.

При виробництві методу заливання корозійностійких товстих листів на металургійному заводі застосовують наступну основну послідовність технічних операцій [2].

У виливниці для відливання злитка масою 6,5-13 т поміщається спеціально підготовлений сляб з корозійностійкої сталі. Підготовка слябу полягає в його різанні з чотирьох сторін для видалення окислів (окалини) та поверхневих дефектів, у знежиренні, в приварні провух та штирів для монтажу слябу у виливниці, в обмазці слябу з двох сторін - з зовнішнього боку магнезитовим порошком для запобігання зварювання з металом і з внутрішньої сторони нашатирем для покращення зварювання з вуглецевою сталлю. У виливниці зі вміщеною в неї плитою проводиться сифонна заливка рідкої вуглецевої або низьковуглецевої сталі основного шару з мартенівської печі. Вливання металу утворює захисний шар - підливу - товщиною 50-65 мм для захисту поверхні нержавіючого слябу від окислення.

Заливання може проводитися для отримання цього тришарового біметалевого методу. У цьому випадку виливниці розміщується на двох однакових плоских пластинах, у двох протилежних стінок виливниці або один сляб у центрі виливниці [2].

Існує також спосіб, при якому дві плоскі пластини, зварені між собою по колу електрозварюванням, розміщують у центрі форми. Площини зіткнення цих слябів між собою змащені спеціальним складом для запобігання зварювання їх один з одним. В якості такого складу застосовують дрібно мелений шамот або хромомагnezит. З такого злитка після прокатки виходять два двошарові листи. Однак через складність цього методу він не є поширеним у промисловості.

Після охолодження та виймання з форми біметалічний злиток нагрівають у колодязях до температури прокатки, яка визначається хімічним складом основного та плакуючого шарів. Нагріті злитки прокочуються на блюмінгу на сляб з максимально можливою локальною швидкістю стигнення. Розміри слябу визначається розміром прокатування з нього листів з урахуванням різання металу [2].

Після охолодження зі слябів автогенним різачком, сляби очищають, потім нагрівають у структурованій печі та прокатують до товстолистого прокатного стану. Прокатані листки після правки та обрізки проходять термічну обробку, повторну правку, травлення та залишкову обробку.

Недоліком цього методу є те, що між корозійно-стійкою сталеву пластину та вуглецевою сталеву пластину може утворюватися оксидна плівка, що перешкоджає правильному склеюванню різнорідних металів під час процесу прокатки [2].

Запропоновано метод, за яким виливниці із вставленим у неї слябом з корозійностійкої сталі поміщаються у вакуумну камеру із заливанням рідкого металу через отвір, попередньо закриту алюмінієвою платівкою, яка розплавляється при ударі струменя рідкої сталі. У процесі розливання у камері підтримується вакуум.

За іншою схемою запропоновано у вакуумну камеру поміщати і хитку піч. Цей метод хоча, цілком імовірно, і може істотно покращити міцність з'єднання шарів, проте його складно застосувати при отриманні багатотонних біметалевих зливків для отримання товстолистого біметалу. Зважаючи на це



він може отримати лише обмежене застосування для отримання малих виливків зі спеціальних сплавів.

Зливки після відповідної витримки для затвердіння передавалися до нагрівальних колодязів, де нагрівалися до температури 1270-1280°C [2].

Зливки прокочували спочатку на блюмінгу 1100, а потім без проміжного нагріву на блюмінгу 900 на блюмі перетином 210x210 і 180x180 мм для подальшої прокатки на коло діаметром 130-140 і 90 мм. Прокатка на готові профілі круглого перетину проводилася на великосортних дев'яти клітьовому стані 500 [2].

При виробництві круглої біметалічної сталі основна складність полягає в тому, що форма серцевини у круглому готовому профілі відрізняється від правильної круглої форми, якщо серцевину залити в злиток, відстань від колу буде більшою. Це пояснюється тим, що при прокатці з кантуванням на 90° між окремими проходами деформація здійснюється у двох взаємно перпендикулярних площинах, якщо замість ящикової системи калібрування застосовувати калібрування за системою овал-коло [2].

Основним недоліком цього методу є те, що він має високі вимоги до якості та експлуатаційних властивостей матеріалу (висока насипна щільність, висока текучість, мала питома поверхня тощо), додаткове технічне оснащення, збільшена робоча сила та додаткова вартість. Для отримання біметалів із горизонтально розташованими шарами можна використовувати методом лиття – коли рідкий метал виливається на тверду поверхню. Різновидом цього методу є плавлення більш вогнетривких компонентів на основні сталі.

Методом (зварювання тиском), заснованим на поєднаній пластичній деформації, складових шарів, широко застосовується у виробництві біметалів. Ці методи в основному використовуються для виготовлення двошарових листів, смужок та стрічок. Вони також використовують для отримання фасонних профілів, прутків та проволочи [2].

Гаряче пресування двох або більше металів та сплавів для отримання круглих або фасонних біметалевих профілів, а також труб - це метод пластичної деформації. Існує безліч варіантів цього методу.

Перший з них полягає у гарячому видавлюванні через вічко матриці складової заготовки, що має кругле або трубчасте перетинання з концентричним розташуванням шарів. Витікаючи пруток захоплює матеріал шайби і відбувається плакування в результаті спільної пластичної деформації.

Інший варіант спільного гарячого пресування для отримання БМ полягає в одночасному видавлюванні двох різних матеріалів з двох контейнерів у загальну матрицю та з'єднанні в процесі значної пластичної деформації [2].

Третій варіант полягає в тому, щоб ввести його в вічко матриці серцевини і одночасно видавити два контейнери з іншими матеріалами в матрицю. В результаті виходить контур із складеною сорочкою в основі. Недоліком цього способу є те, що неможливість отримання виробів зі змінним поперечним перерізом при видавлюванні через одне вічко матриці або загальному прокатному шару. До недоліків також належить велике споживання енергії та швидкий знос оснащення [2].

Для виробництва біметалу можна використовувати різні технології. Зазвичай цей композитний матеріал виготовляють наступними методами: одночасним прокатуванням; волочіння або пресування; наливом розплавів; комбінованим литтям; плакуючим вибухом; наплавленням; газовотермічним розпилювачам [2].

Перш за все, якість цих матеріалів різна, оскільки фабрика повинна ретельно стежити за дотриманням технології виготовлення на всіх етапах виробництва.

Завдяки тісній співпраці та зв'язку між наукою та виробництвом можна виготовляти зносостійкі матеріали та вироби з біметалу.

Вони забезпечують ефективні рішення для оптимізації промислових конструкцій з використанням високого рівня міцності та зносостійкості [2]. Злитки прокочували спочатку на блюмінгу 1100, а потім без проміжного

нагріву на блюмінгу 900 на блюмі перетином 210x210 і 180x180 мм для подальшої прокатки на коло діаметром 130-140 і 90 мм. Прокатка на готові профілі круглого перетину проводилася на великосортному дев'яти клітьовому стані 500 [2].



Рисунок 1.6 – Радіатор [1]

Загальний обсяг споживання товстолистового корозійностійкого біметалу орієнтовно становить 20-30 тис. м<sup>2</sup> на рік. На 70-80% вона задовольняється за рахунок імпортової продукції з Німеччини, Франції та США, вартість якої у 1,5-2 рази перевищує вартість аналогічної продукції вітчизняного виробництва за однакової якості товару. [3]

Використання біметалу може підвищити довговічність і надійність різних деталей та обладнання. Оскільки це дозволяє економити дорогі кольорові метали (Ni, Cr, Cu, Mo, Ti та ін.) вартість його виробництва зменшується. Використання шаруватих композицій сприяє розробці більш досконалих дизайнерських рішень при створенні сучасних машин, обладнання. В даний час біметалі є найважливішою групою матеріалів з широким спектром властивостей.

Використання біметалічних листів, металевих проводів, багатошарових стрічок та двошарової інструментальної сталі може значно заощадити мідь, нікель, вольфрам та інші рідкісні метали. У галузях електротехніки та електроніки біметалі використовуються як провідники та деталі для безконтактних пристроїв. Як правило, металеві композиції поєднують високі

електричні ті міцні властивості з мінімальним споживанням дорогих і дефіцитних провідних матеріалів (Cu, Ag, Al і ін.). Встановлено, що біметалічні провідники, як правило, мають нижчу якість та високу корозійну стійкість. Через високу провідність міді найпоширенішим провідним біметалом є біметал із мідною обшивкою. [3]

Біметалічні контакти (Ti+Cu, сталь+Al, Cu+Al та ін.) використовують для низки процесів практичної електрохімії, при цьому значно підвищується термін служби струмопровідних деталей і суттєво знижується перехідний опір контакту.

Застосування шаруватої металевої композиції не тільки дозволяє підвищити надійність і довговічність великої деталі та обладнання, але також можна значно зекономити дорогі кольорові метали.

Основною частиною шаруватої композиції є біметал, що складається з двох металів. Основне завдання при створенні біметалевої технології виробництва – забезпечити міцний зв'язок між шарами без зміни їх початкових властивостей [3].

Ґрунтообробна машина виготовлена з біметалічних матеріалів для сільського господарства. Біметалеві частини не потрібно заточувати, тому використання у цій галузі буде розширено у майбутньому. У виробництві приладів, використовуються різні типи біметалевих пластин. Різниця між ними полягає у різних температурних коефіцієнтах розширення металів. Для отримання біметалу використовують метод прокатки або пресування одночасної різних сплавів або металів [3].

Біметалічні труби, пластини та інші компоненти дуже важливі в галузі хімічного машинобудування. Біметалічна сталь титан – це корозійностійкий матеріал. Він стійкий до азотної кислоти, хлору та морської води. В агресивних середовищах неможливо використовувати інші метали, крім титану. Біметалевий титан може продовжити термін служби виробів на десятиліття або навіть сотні років. Контактний біметал використовується в електромережі. Застосування біметалу не завжди є економічно вигідним рішенням. Для

об'єктивної оцінки необхідно врахувати витрати на переробку та виготовлення біметалу. Нарешті, ця робота пов'язана з пайкою, зварюванням, плавкою або пресованою посадкою (рис 1.7, рис 1.8). [4]



Рисунок 1.7 – Багатошарова стрічка [4]



Рисунок 1.8 – Біметалеві листи [5]

На сьогоднішній день біметал є найважливішою групою промислових матеріалів з широким спектром властивостей. Застосування біметалу може значно покращити ефективність виробництва різних деталей та обладнання у хімічній, нафтовій, сільській, транспортній, енергетичній та інших галузях промисловості [5].

Використання біметалічних листів, металевих проводів, багатошарових стрічок та двошарової інструментальної сталі може значно заощадити мідь, нікель, вольфрам та інші рідкісні метали (рис.1.9) [5].



Рисунок 1.9 - Біметалічна стрічка [5]

Одним із напрямків де метали захищаються та ефективно використовуються, є багатошарове виробництво. Це дозволяє зменшити витрату у рідкісних металах і скористатися основним технічним перевагою біметалу – здатністю поєднувати різні експлуатаційні характеристики в одному матеріалі. Важливими властивостями біметалів є теплопровідність та технологічність (здатність зварювати, згинати, штампувати). Висновок, зроблений з цієї роботи, полягає в тому, що ті самі корозійностійкі сталі та метали, що використовують у вигляді однорідних металів у подібних середовищах, широко використовують як плакуючий шар в вітчизняній та зарубіжній практиці. Сюди входять: хромонікелеві сталі з добавкою титану чи ніобію, хромисті сталі, хромонікельмолібденові сталі з титаном чи міддю та титаном; мідні сплави (латунь, бронза та томпак); нікелеві сплави (нікель, молібден); чисті метали (мідь, нікель, срібло, титан, алюміній) (рис.1.10). [5]



Рисунок 1.10 – Антикоровзійний шар [5]

В статті показано, що корозійна стійкість біметалів у даній середі визначає сферу його застосування. Корозійна стійкість визначається

матеріалом плакуючого шару. Двошарова сталь із покриттям з аустенітних хромонікелевих сталей типу 08X18H10T, що використовується для виготовлення обладнання, що працюють у більшості органічних сполучень та середовищ (таких як азотна кислота, сірчана кислота та хлоридні солі, сірчисті та вуглекислі газі). Плаковані хромонікельмолібденові пластини використовуються для виготовлення обладнання, що працює в умовах агресивних середовищ: розчинів сірчаної та фосфорної кислот, при високих температурах. Хімічна і нафтохімічна техніка споживає велику кількість корозійностійких біметалів [5].

Було показано, що у зносостійкому біметалі використовують сталь та сплави з високою зносостійкістю до плакуючого шару, а низьковуглецева сталь зазвичай використовують як базовий шар. Поєднання твердого сталевого шару з більш м'яким, може не тільки продовжити термін служби зносостійкого біметалевого листа, але і зробити виготовлені з них леза новою характеристикою – самозаточування. Біметалеві двошарові та тришарові листи та смуги широко використовують у ріжучих інструментах (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Біметалічний ріжучий інструмент [5]

Завдяки широкому використанню біметалів значно легуються високолеговані сталі з недостатньою кількістю легованих елементів (таких як хром, вольфрам, ванадій тощо) [5].

Одна з ефективних застосувань біметалів є виготовлення підшипників ковзання. У сучасних машинах через малі розміри та вміст металу, а також

завдяки високим характеристикам виробу використання підшипників ковзання, як правило, краще ніж використання підшипників кочення.

Сировиною підшипника є біметалічний пояс або біметалічний пояс із плакучим шаром із низьковуглецевої сталі та покриттям із антифрикційного сплаву.

Антифрикційний матеріал для плакування повинен мати хороші технологічні властивості, досить високу втому міцності при робочій температурі підшипника та високу стійкість до корозії олії при робочій температурі підшипника (рис.1.12) [5].



Рисунок 1.12 – Термобіметалевий датчик [5]

Широке використання біметалів у промисловості вимагає досліджень щодо формування деталей, виготовлених із цих сплавів. У роботі було встановлено, що при різанні біметалу плакування може бути пошкоджене введенням основного шару. Однак аналізована робота не передбачає способу обробки біметалів, який дозволяє уникнути внесення покриття в основний корпус та забезпечує точність та якість обробленої робочої поверхні [5].

### 1.3 Виготовлення біметалів

Біметал (БМ) в основному виготовляється шляхом одночасного прокатування (або пресування) двох різних металевих (або сплавних) заготовок. Поширені також заливка легкоплавкого металу по тугоплавкій та занурення тугоплавкого металу в розплавлений легкоплавкий метал. При методі гальванічного покриття шар більш цінного металу покривається



електролітом. Більш тверді (дорогі та рідкісні) сплави осідають на електротехнічній сталі (використовується для виготовлення ріжучих інструментів, штампів та ін.)

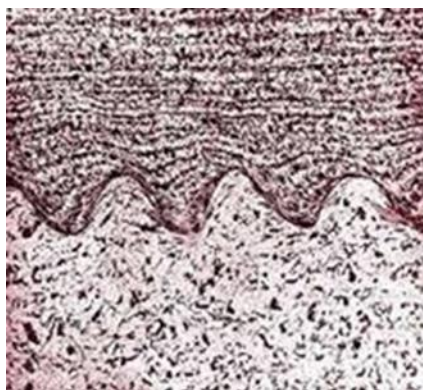


Рисунок 1.13 – Процес виготовлення біметалів [6]

Найбільш перспективним процесом, який дозволяє виготовляти біметалічні заготовки та вироби майже необмеженого розміру з різноманітних металів та сплавів, є зварювання вибухом [6].

Визначення «технології зварювання вибухом» відносяться до процесу з'єднання поверхонь двох металевих пластин, що відбувається під час швидкого зіткнення. Зіткнення металів відбувається при метанні плакуючого металу на лист основного металу вибухом заряду вибухової речовини (ВР). Важливим аспектом є процес підготовки, прозорість якого потрібна для зварювання вибухом та отримання високоякісних біметалічних листів [6].

Існуючі способи виготовлення порошку біметалу та виробів з нього шляхом формування робочого шару на пористій заготовці можна розділити на такі основні групи: отримання поверхневого шару напиленням або наплавленням на поверхню пористої заготовки; вибухове пресування, різні способи дифузійного зварювання в процесі спікання або припикання; просочення поверхневого пористого шару заготовки розплавом необхідного складу; введення в пори поверхневого шару підвищеної пористості необхідної порошкової шихти різними способами. Перспективний метод заснований на методі введення необхідних компонентів у поверхневі пори зануренням

розплаву на певну глибину під час насичення поверхневого шару спечених або твердих спечених частинок заготівлі [7].

Крім того, оскільки в процесі гарячого пресування утворюються цілісні з'єднання порошкового елемента та частини деталей, виготовлених із стандартної конструкції сталі, можна отримати біметалеві вироби.

Для виготовлення біметалевих деталей широко використовують метод випалювання порошкового шару або оболонок у щільну основу. Цей метод добре зарекомендував собі при виготовленні матеріалів з робочими шарами з антифрикційними чи спеціальними властивостями [7].

Основна перевага полягає в тому, що може бути отримано пористий робочий шар, який може бути просочений різними мастилами, так що ефективність проти тертя може бути покращена в широкому діапазоні. Цей спосіб має недоліки: фізико-механічні властивості робочого шару відносно низькі через наявність залишкових пір та посилення масляних включень, а тому його використання обмежене лише у легко завантажених деталях.

Отримання БМ найчастіше використовуваний метод гарячого пресування [7]. При отриманні біметалу, в якому обидва шари є порошком, проблема з'єднання шарів. Однак існує ще одна проблема, пов'язана з необхідністю проникнути заготовку плавкими компонентами [7]. Ця технологія забезпечує міцне з'єднання шарів.

Однак очевидно, що цей спосіб можна застосовувати лише в тому випадку, якщо бронза має досить високу температуру плавлення  $950^{\circ}\text{C}$ . При нижчому  $T_{\text{пл}}$  деформація та ущільнення сталевієї основи будуть погіршуватися [7].

Неможливо отримати біметалеві заготовки з використанням зовнішніх легкоплавких металів (таких як мідь). Неможливо отримати внутрішній шар з високим вмістом вуглецю та внутрішній шар з дуже низьким вмістом вуглецю методом лиття. Враховуючи фактичний індивідуальний діаметр, після відливання заготовку потрібно обертати і свердлити, що призведе до певних труднощів у масовому виробництві та призведе до збільшення втрат металу.

Очевидні коливання розміру заготовки небажані для подальшого перерозподілу. Відлиті біметалеві заготовки більшості металевих комбінацій можуть бути успішно використані для їх перерозподілу в труби [7].

#### 1.4 Пресування

Пресування – процес видавлювання металу із закритої порожнини контейнера через корпус основи. Площа відвернення корпусу основи менша, ніж площа поперечного перерізу вихідної заготовки [8].

Пресування – це процес, при якому попередньо розігріта заготовка, поміщена у форму, видавлюється через отвір з перетином, меншим, ніж у вихідної заготовки. Пресування робить вироби різного перерізу складними контурами. В якості вихідного матеріалу для реалізації цього способу зазвичай використовують заготовки або злитки кольорових металів та їх сплави [8].

Наразі у виробництві використовували два способи пресування металу: прямий та зворотний.



Рисунок 1.14 – Біметалічні прутки [8]

Безпосередній спосіб пресування металу полягає у розміщенні заготовки, нагрітої до певної температури, в закритій порожнині спеціальної ємності. Тиск передається йому через пуансон. В результаті метал видавлюється через отвори, розташовані у матриці.

Для методу зворотного пресування металу використовується ємність, один кінець ємності закривається прокладкою, а на заготівлю здійснюється тиск

через пуансон та матрицю. Отже, виявляється, що метал рухається у тому напрямку, де основа стикається з пуансоном [8].

На практиці метод прямого пресування є найпоширенішим, тоді як метод зворотного пресування застосовується рідко. Справа в тому, що він демонструє більш високі показники та забезпечує дуже хорошу якість поверхні готового продукту. У багатьох випадках методи прямого пресування металу можуть скласти конкуренцію прокатці.

Шляхом пресування сучасні промислові компанії виготовляють трубки та стрижні з різними контурами. У цьому випадку для виготовлення труби використовується лише метод прямого пресування, а в більшості випадків використовується протилежний метод [8].

Для виконання процесу пресування найчастіше використовують вертикальні або горизонтальні гідравлічні преси. Як правило, горизонтальні труби використовують для виготовлення великогабаритних стрижнів та труб, тоді як вертикальні труби використовують для виготовлення тонкостінних труб завдовжки 3 метри і діаметром до 40 мм, а також стрижнів малого діаметру.

Перевагами пресування є те, що:

- під час пресування матеріал набуває вигляду напруженого стану, внаслідок чого пластичність металу істотно підвищується, і тому його можна обробляти з високим ступенем деформації;
- цей метод дозволяє дуже швидко перенастроювати обладнання на виробництво деталей інших форм та розмірів;
- пресування дає можливість випускати профілі найскладніших обрисів та профілі суцільні;
- пресування дозволяє отримувати менші допуски лінійних розмірів напівфабрикатів.

До недоліків пресування слід віднести:

- істотні втрати матеріалу на відходах, зумовлені пресуванням;
- значна нерівномірність тих механічних властивостей, які виріб має за поперечним перерізом та довжиною;

– відносно невисока продуктивність процесу порівняно з прокаткою

Пресування металу – основний процес, що використовується для виробництва невеликих, але великих партій профілів, прутків та труб (рис.1.14) [8].

### 1.5 Видавлювання металу

Видавлювання металу є процесом, в ході якого виробляються порожнисті, об'ємні вироби при використанні методу видавлювання металу з замкнутих, закритих форм крізь отвір відповідного діаметру. Найчастіше для обробки за цією технологією використовуються такі матеріали як сталь та кольорові метали [9].

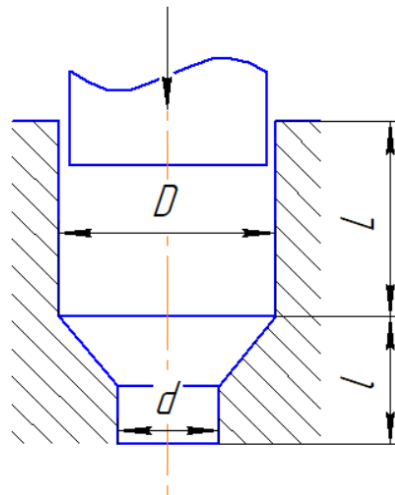


Рисунок 1.15 – Схема прямого видавлювання [9]

Даний метод обробки металів за допомогою тиску є досить поширеним. Технологія гарячого штампування передбачає нагрів металевих заготовок в залежності від складу сплаву та умов подальшої обробки. Метал деформується за допомогою спеціального інструменту. В результаті одержують поковки - заготівлі для подальшої механічної обробки (рис.1.15) [9].

Об'ємна гаряче штампування затребувана на великих виробництвах, де завжди необхідно:

- підвищувати та підтримувати продуктивність праці,
- скоротити обсяг відходів металу,
- забезпечити відмінну якість поверхні кінцевого продукту.

Ця технологія дозволяє виробляти великими тиражами металеві вироби, що відрізняються складною формою, що неможливо при використанні вільного кування [10].

При штампуванні видавлюванням відбувається витікання металу, укладеного в замкнуту порожнину, через отвір у ній, форма якого визначає поперечний переріз видавленої ділянки деформованої заготовки.

Штампування видавлюванням застосовують для отримання поковок з формою стрижня (циліндричного, конічного, ступеневого та т.п.) з потовщенням на одному кінці його. Видавлюванням отримують стрижневі елементи таких поковок [11].

Штампування видавлюванням принципово не відрізняється від процесів пресування. Останні вже давно широко поширені для виробництва прутків, профілів та труб з різних матеріалів. Цим пояснюється, що більшість досліджень присвячено саме процесам пресування. Засновниками робіт у галузі фізики процесу пресування є Н.С. Курнаков та С.Ф. Перловій. Найцінніші експериментальні та теоретичні дослідження проводивши С.І. Губкін. Великі узагальнюючі роботи за технологією пресування належить П.С. Істоміна. І.М. Павлов вивчав вплив додаткових напружень у процесі видавлювання і створив оригінальну теорію, яка пояснює утворення тріщин (ялинки). Фундаментальний узагальнюючий і оригінальний труд з теорії пресування створивши І.Л. Перлін. Безпосередньо штампуванню видавлюванням низку робіт присвятили О.В. Ребельський та Л.А. Шофман.

Із зарубіжних дослідників успішно займалися пресуванням Х. Ункель, Г. Закс та В. Ейсбейн, Є. Зібель, Є. Фангмайер. Надалі до вивчення процесів пресування був застосований метод ліній ковзання (Р. Хілл, В. Прагер і Ф. Ходж, А.Г. Грін і Д.Ф.В. Бішоп). Пізніше В. Джонсон, Х. Кудо, а також Ш.

Кобаяші розробили метод верхніх оцінок; Е. Томсен застосував метод візіопластичності [11].

Штамування видавлюванням протікає при яскраво вираженій схемі нерівномірного всебічного стиснення, що забезпечує металу високу пластичність.

Штамування видавлюванням, не відрізняючись принципово за схемою напружено-деформованого стану від процесу пресування прутків, профілів і труб, проте має свої характерні особливості. При штампуванні видавлюванням:

- відстань від торця пуансона до дна матриці в кінці робочого ходу обумовлено заданим розміром елемента поковки, а не товщиною мінімально допустимого прес-залишку;
- Довжина стрижневої частини поковки визначається її конструкцією, але в той же час можливість виконання стрижневої частини обмежена параметрами преса;
- кування витягується з штампа при зворотному ході преса за допомогою поршня, а не відокремлюється від прес-залишку, як пруток при пресуванні [11].

Початкова швидкість деформування на кривошипному пресі набагато менша, ніж у молота. Разом з тим, зменшення цієї швидкості протягом робочого ходу протікає значно повільніше, що дозволяє одержувати на пресах окремі, що мають форму відростків, елементи поковок видавлюванням – витісненням значної частини металу заготовки з порожнини закритого струмка через робоче отвір. У струмок для видавлювання надходить вихідна заготовка, рідше – після обтиску на фігурних бойках. Таке обтиснення застосовують для надання заготівлі форми, необхідної для її розміщення у струмку. Видавлюванням можна отримати готові поковки або фасонні заготовки під залишковим штампуванням у будь-який спосіб на тому ж пресі або під подальшого на іншому обладнанні. Таким чином, струмки для видавлювання можуть бути заготівельними та штампувальними (рис.1.16). [12]

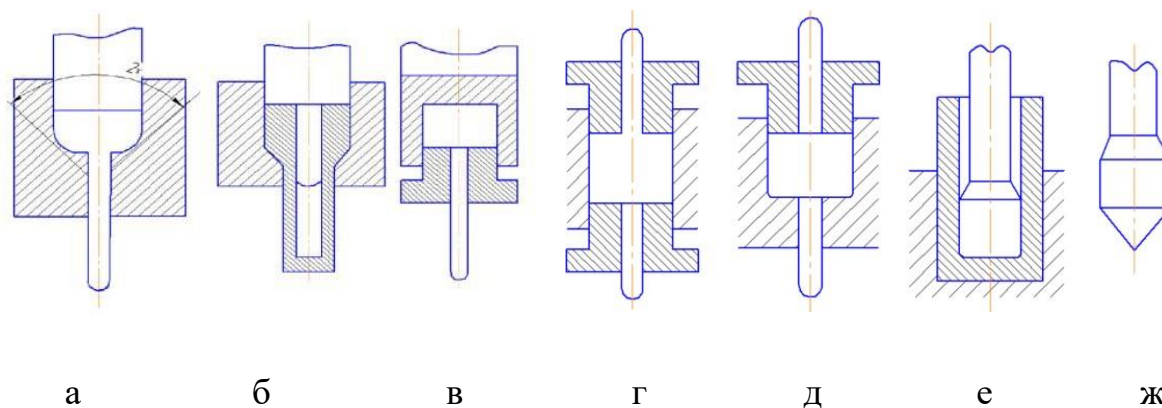


Рисунок 1.16 – Штампування видавлюванням; а, б – пряме видавлювання; в – зворотне видавлювання; г – зворотне видавлювання у двох протилежних напрямках; д – комбіноване прямого та зворотного видавлювання; е – закрыта прошивка; ж – конічний пуансон [12]

Розрізняють два основні способи видавлювання – пряме та зворотне. При прямому видавлюванні (рис. 1.16, а і б) порожнини, в яку укладають заготовку, розміщується у матриці; при штампуванні метал пуансоном витісняється з порожнини матриці крізь наявні в ній робочі отвір. При цьому весь обсяг заготівлі переміщається до робочого отвору і тренування металу об стінки порожнини, що призводить до значної неоднорідності деформації. При зворотному видавлюванні (рис. 1.16, в) порожнини, в яку укладають заготовку, розміщується в пуансоні; при штампуванні метал із порожнини пуансону витісняється матрицею крізь наявні в ній робочий отвір. При цьому в кожний момент процесу деформується лише частина заготовки, що знаходиться в безпосередній близькості до робочого отвору, а інша її частина залишається недеформованою. Відзначимо, що процес видавлювання може бути прямим або оберненим незалежно від взаємного розташування пуансона і матриці (пуансон зверху, а матриця знизу або навпаки) і від того, яка частина рухлива (пуансон рухливий, а матриця нерухлива або навпаки). Можливе одночасно видавлювання кількох відростків прямим та зворотним способами, а при вільному переміщенні контейнера 1 (рис. 1.16, г) – зворотне видавлювання у



двох протилежних напрямках. Успішно здійснюється комбінування прямого та зворотного видавлювання (рис. 1.16, д).

Різновидом видавлювання є закрита прошивка (рис. 1.16, е). При закритій прошивці оброблення метал впливає в кільцевий проміжок між пуансоном і матрицею [12].

Зворотне видавлювання вимагає менше зусиль і забезпечує більш однорідну деформацію тому, що при зворотному видавлюванні доводиться тертя об стінки матриці тільки близько робочого відвернення. При прямому видавлюванні напрямок і характер металу в матриці до надходження його в робочий отвір, а також ступінь неоднорідності деформації різко змінюються в залежності від коефіцієнта контактного тертя та інших умов деформації, а також від властивостей та стану деформованого матеріалу [12]. Процес видавлювання сталі був детально вивчений Л.В. Прозоровим.

Процес видавлювання протікає при різко вираженій схемі всебічного нерівномірного стиснення, що забезпечує високу пластичність металу. При цьому процес вимагає дуже високого тиску, що знижує стійкість матриць. Це зобов'язує застосовувати хорошу мастило і змушує зменшувати швидкість деформування [12].

Тому нестандартні кривошипні гарячі штампувальні преси, спеціально призначені для штампування видавлюванням, на відміну від звичайних роблять зі зменшеними в 1,5 – 2,0 рази числом ходів на хвилину. Крім того, у них трохи збільшений хід повзуна та закрита висота штампового простору та значно збільшений хід нижнього поршня. Останній у цих випадках має не механічний, а пневматичний чи гідравлічний привод.

При штампуванні поковок процес видавлювання починається зазвичай не одразу. Оскільки розміри поперечного перерізу вихідної заготовки менші за відповідні розміри порожнини струмка, її деформація, як і при інших способах штампування в закритих струмках, протікає в три стадії і починається зазвичай з опадку до зіткнення бочкоподібної заготовки з бічними стінками порожнини (контейнера), заповнення порожнини металом і видавлювання металу у отвір.

Залежно від співвідношення діаметра заготовки і отвір під стрижень стрижнева частина заготовки може утворитися і на всіх трьох стадіях [12].

При штампуванні із закритою прошивкою процес починається з відкритої прошивки, доки не заповниться вся порожнина матриці під пунсонів, і тільки після цього відбувається видавлювання.

Оскільки для відкритої прошивки необхідне зусилля менше, ніж для закритої, то для зниження навантаження на інструмент іноді йдуть на зменшення товщини заготовок з тим, щоб закриту прошивку по можливості замінити відкритою прошивкою і виробляти її не видавлюванням, а роздачою металу в сторони при збереженні висоти заготовки або навіть за деякого її зменшення. Велику роль при цьому відіграє форма пуансону. Поки порожнини матриці не заповнена, конічний пуансон (рис. 1.16, ж) сприяє роздачі металу в сторони і тим самим полегшує прошивку, але потім видавлювання за допомогою конічного пуансона вимагає більшого зусилля, ніж за допомогою плоского пунсона (рис. 1.16, е.) [12].

## **1.6 Гаряча прокатка біметалів**

Одним з основних промислових способів отримання широкого класу біметалів є спільна гаряча прокатка, зокрема так звана пакетна прокатка, використана для отримання корозійностійких біметалевих листів. При цьому способі складові пакет із двох або більше шарів різних металів у вигляді пластин або профілів піддається гарячій деформації на профіль. Конструкція біметалічного пакета визначається низкою факторів: кількістю шарів у багатошаровому прокаті, хімічним складом шарів, технічними можливостями обладнання для гарячої пластичної деформації, необхідним сортаментом готових профілів прокату і так далі [13].

Незважаючи на велику різноманітність технологічних процесів отримання плакованих металів способом спільної пластичної деформації, принципова схема способу зводиться до наступних операцій:

- підготовка заготовок (злитки, сляби, фасонні профілі) з металу основного шару;
- підготовка пластин, листів та профілів з металу плакуючого шару;
- складання та зварювання пакетів;
- нагрів та деформація пакетів;
- термічна обробка та оздоблення готової біметалічної продукції.

Під час прокатки між контактними поверхнями металів відбувається схоплювання – науки металевих зв'язків. Для успішного перебігу цього процесу необхідно, щоби на контактних поверхнях шарів, що підлягають з'єднанню. Зазвичай сляби та плити з металу основного шару піддають різанню та фрезеруванням. Іноді застосовують абразивну зачистку або дробоструминну обробку поверхні [13].

Підготовка контактної поверхні пластин плакуючого металу визначається тим, який метал використовують як плакуючий шар. Для корозійностійкої плакуючого шару в більшості випадків використовують хромонікелеві та хромисті сталі. Оксиди хрому погіршують схоплювання та перешкоджають міцному зчепленню шарів. Захист контактної поверхні нержавіючої сталі від окислення здійснюють по-різному [13].

У деяких випадках на контактну поверхню плакуючих пластин електролітичним способом або методом газової чи електролітичної металізації наносять шар нікелю або наплавляють тонкий шар маловуглецевої сталі. Іноді для захисту поверхні плакуючих листів від окислення їх покривають рівним шаром флюсу або хлористим амонієм.

Проміжний шар між основним і плакуючим металами використовують не тільки для захисту від окислення контактних поверхонь, але і як засіб проти взаємної дифузії елементів з одного шару в іншу, коли вона небажана. У цих випадках застосовують прокладки з фольги або електролітичні покриття з найрізноманітніших металів та сплавів: нікелю, міді, ніобію, кобальту, сплавів ніобію та кобальту з високим вмістом фосфору, залізо-креміністих сплавів. Відомо також застосування в якості проміжного шару суміші порошків чистого

заліза та нікелю з добавкою флюсу. При нагріванні та стисненні суміш спікається і утворює прошарок легованої сталі [13].

Для отримання корозійностійких плакованих металів найбільшого поширення набули симетричні чотиришарові пакети (рис. 1.18).

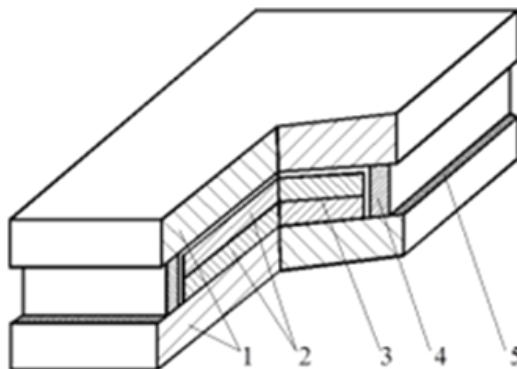


Рисунок 1.17 – Конструкція чотиришарового біметалічного пакета. 1 – основні шари; 2 – плакуючі шари; 3 – розділовий шар; 4 – сполучна планка; 5 – зварений шов [13]

Верхній та нижній сляби основного металу 1 з'єднуються через планки вуглецевої сталі 4, що укладені по периметру пластин плакуючого металу 2. Зварні шви 5 забезпечують міцність та герметичність пакету. Між планками та пластинами є зазори, що компенсують різницю у розширенні металу плакуючого та основного шарів.

У процесі гарячої прокатки виникає міцне зчеплення шарів по контактних поверхнях слябів і пластин, найчастіше через проміжні сполучні підшари, а також утворюється однорідний кант з вуглецевої сталі по периметру пакета за рахунок зварювання з'єднувальних планок з верхнім і нижнім слябами. Між пластинами плакуючого металу не відбувається схоплювання завдяки розділним шарам 3 [13].

Розділовий шар наносять товщиною 1 мм на боці пластин плакуючого металу, протилежній контактній поверхні. Зазвичай розділову пасту складають на основі магнезиту, оксиду хрому, оксиду алюмінію, діоксиду марганцю, суміші нітролаку або целюлозних лаків та оксиду магнію. Як правило, склад

розділового шару підбирається експериментальним шляхом і є предметом патентування.

Склад розділового шару, його товщина і рівномірність мають велике значення, оскільки ці параметри визначають якість поверхні плакуючого шару. Особливо важливі вогнетривкі якості розділового шару. При температурах нагріву під гарячу прокатку шар не повинен плавитись або розм'якшуватися, оскільки це призводить до її витікання або видавлювання при деформації пакета. Слід зазначити, що операції нанесення розділового шару досить важко механізувати, незважаючи на їхню простоту [13].

Для отримання двошарових листів, плакованих легко окислювальними металами: титаном, цирконієм, застосовують вакуумування пакетів або продування інертним газом. Відкачування газів з пакета здійснюється або у процесі нагрівання, або перед нагріванням пакетів. Крім того, для запобігання контактних поверхонь від окислення протягом усього періоду нагрівання в пакеті здійснюється циркуляція аргону.

Радикальним вирішенням проблеми покращення з'єднання легко окисників металів є прокатка біметалів у вакуумі. Підготовлений пакет із з'єднаних металів поміщають у піч вакуумного прокатного стану. У печі пакет нагрівають до температури прокатки, витримують протягом деякого години і прокочують у валках з обтисненням, що забезпечує повну дифузійну зварювання [13].

Широке поширення симетричного чотиришарового пакета та аналогічних йому конструкцій пакетів з великою кількістю шарів пояснюються рядом переваг. Симетричне розташування шарів з різним опором деформації щодо горизонтальної площини прокатки в принципі виключає вигин розкату у прокатних валках. Поверхня плакуючого шару знаходиться всередині та захищена від впливу пічних газів, прокатних валків.

Так як плакучий шар не має окалини, двошарові листки, отримані з таких пакетів, здебільшого не потребують травлення. Симетричний пакет має більш

високу міцність, оскільки рівномірна деформація верхньої та нижньої половин пакета знижує (хоча і не виключає повністю) напруги в зоні зварних швів [13].

Недолік симетричного пакету полягає в обмеженні верхньої межі товщини двошарових листів. Оскільки розкат, отриманий з симетричного чотиришарового пакета, складається з двох листів, товщина шкірного з них дорівнює половині товщини розкочування. Отже, при обмеженні товщини та маси вихідної заготівлі (пакету) можливостями прокатного обладнання товщина та габарити двошарових листів будуть вдвічі меншими, ніж одинарних листів, які прокочуються в цих же умовах. Інше обмеження викликано тим, що для отримання досить міцного зчеплення шарів при прокатці пакета потрібно 5-7-кратне висотне обтиснення. Вихідна товщина чотиришарового пакету для отримання листів товщиною понад 100 мм становить більше 1000 мм, що перевершує можливості більшості існуючих листових станів і неприйнятно з інших міркувань (велика нерівномірність деформації, труднощі рівномірного нагріву). Ці обставини спричинили створення спеціальних конструкцій пакетів для прокатки особливо товстих листів [13].

Одна з таких конструкцій є двошаровий несиметричний пакет із кришкою, що складається з товстого слябу вуглецевої сталі, на який розміщується плита нержавіючої сталі з нанесеними на її поверхню захисним і розділовим підшарами. На плиту корозійностійкої сталі укладається кришка на вуглецеві сталі, яка приварюється до слябів через сполучні планки (рисунок 1.18).

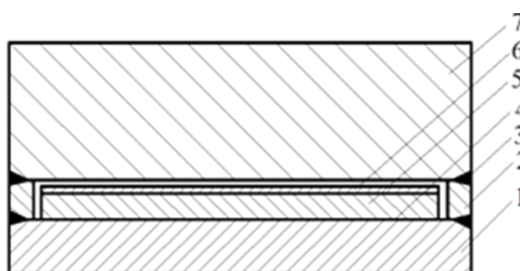


Рисунок 1.18 – Конструкція несиметричного пакета. 1 – кришка; 2 – з'єднувальні планки; 3 – зварні шви; 4 – розділовий шар; 5 – плакучий шар; 6 – проміжний підшар; 7 – основний шар [13]

Після прокатки такого пакета, яку, як правило, здійснюють кришкою донизу, кришка видаляється. Однак розкочування з несиметричного пакета в процесі прокатки згинаються, а листи, отримані з таких пакетів, схильні до викривлення [13].

Для отримання товстих двошарових листів із симетричного чотиришарового пакета запропонований спосіб подвійного (комбінованого) плакування. Спочатку прокочують звичайний за конструкцією симетричний чотиришаровий пакет, що складається з двох слябів нержавіючої сталі, між якими розміщені два листи з вуглецевої сталі. Після обрізки крайок одержують два листи нержавіючої сталі, кожний з яких плакований з одного боку тонким шаром вуглецевої сталі. Ці листи поміщають у новий пакет таким чином, щоб до поверхні слябу була звернена поверхня нержавіючої пластини, плакована вуглецевою сталлю. Для міцного зчеплення поверхонь двох однакових металів (вуглецевої) потрібно щодо невеликої сумарної обтиснення. За рахунок зниження обтиснення при одній і тій же товщині пакета можна отримувати більш товсті двошарові листи [13].

Для отримання товстих двошарових листів із симетричного чотиришарового пакета запропонований спосіб подвійного (комбінованого) плакування. Спочатку прокочують звичайний за конструкцією симетричний чотиришаровий пакет, що складається з двох слябів нержавіючої сталі, між якими розміщені два листи з вуглецевої сталі. Після обрізки крайок одержують два листи нержавіючої сталі, кожний з яких плакований з одного боку тонким шаром вуглецевої сталі. Ці листи поміщають у новий пакет таким чином, щоб до поверхні слябу було звернено поверхню нержавіючої пластини, плакуючої вуглецевою сталлю. Для міцного зчеплення поверхонь двох однакових металів (вуглецева) потрібні відносно невеликі сумарні обтиснення. За рахунок зниження обтиснення при одній і тій же товщині пакета можна отримувати більш товсті двошарові листи [13].

Пакунок зазвичай нагрівають у колодязях, камерних або методичних печах і прокочують на товстолістових станах. Режими нагріву та деформації залежать від матеріалу плакуючого шару біметалевих листів. Після прокатки листи піддають термічній обробці та подальшій обробці.

Гаряча осаджування пакетів застосовується для отримання біметалевих листів або полос невеликих розмірів. При великому розмірі заготовки для забезпечення необхідної для міцного з'єднання шарів деформації потрібно прес дуже великої потужності.

Пакет, зібраний з пластин різних сталей, сплавів або металів, що підлягають з'єднанню, нагрівають до температури гарячої обробки тиском і осаджують під бойками потужного гідравлічного пресу (рис. 1.19).

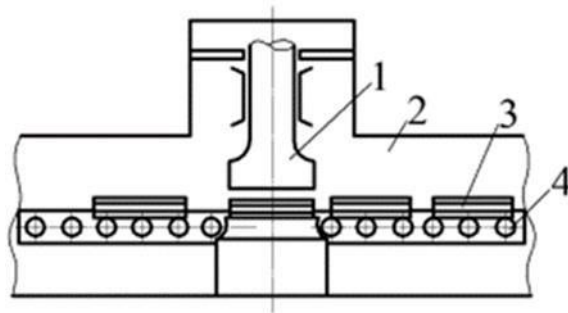


Рисунок 1.19 – Схема установки для потокового осаджування біметалевих пакетів у печі: 1 – бойок преса; 2 – робочий простір печі; 3 – біметалеві пакети; 4 – рольганг [13]

В процесі осадження внаслідок впливу великих питомих тисків, високої температури і внаслідок особливої підготовки поверхонь дотику відбувається міцне з'єднання шарів біметалу [13].

Отриману поковку прокочують у гарячому стані для отримання листів або смужок необхідних розмірів. Однак цей метод не отримав широкого промислового застосування через те, що для його здійснення в промислових масштабах потрібні потужні кувальні преси. Крім того, внаслідок значної нерівномірності деформації шарів при осіданні (через вплив підпирання сил тертя) виходить нерівномірне співвідношення шарів [13].



## 1.7 Способи отримання біметалу сталь-титан

Проблемі раціонального способу отримання сталі, плакованої титаном, і дослідженню її властивостей присвячено багато робіт як вітчизняних, так і зарубіжних авторів. Це пояснюється, з одного боку, гострою потребою різних галузей сучасного машинобудування в такому біметалі, а з іншого боку, труднощами його отримання, пов'язаною зі специфічними властивостями титану. Розчинність заліза в  $\alpha$ -Ti, вкрай мала і за кімнатної температури становить 0,05-0,10 %. За концентрації заліза понад 0,1% у сплаві утворюються інтерметалічні сполуки TiFe і TiFe<sub>2</sub>. Поява інтерметалідів у сплаві Ti-Fe значно підвищує міцність, але різко знижує пластичність біметалу. Наприклад, твердість сплаву з 0,14 % HV 199, а з 2,2 % Fe - не менше HV 450. Подовження при розриві становить відповідно 18,5 і 2,5 % [1].

Під час дугового зварювання титану із залізом не вдається отримати зварний шов із вмістом заліза в межах розчинності його в титані. Зварювання титану з вуглецевими сталями супроводжується виділенням у шві карбідів титану, які також є причиною утворення крихких тріщин. Крихкі хімічні сполуки утворюються під час взаємодії титану з більшістю металів. Задовільною пластичністю володіють тільки з'єднання Ti + Nb, Ti + Hf, у яких титан утворює низку твердих розчинів. Але задовільною зварюваністю зі сталлю володіє тільки ванадій і, почасти, ніобій, що використовується при зварюванні титану зі сталлю через проміжний матеріал.

Крім того, при зварюванні виникають труднощі через насичення титану киснем, азотом і воднем при нагріванні до температур, що перевищують 400 °C. Це також знижує пластичність зварного з'єднання. Зазначені особливості дають змогу вважати перспективним зварювання титану зі сталлю в твердому стані з мінімальним перемішуванням металів, що з'єднуються, і захистом від окислення.

У даний час існує кілька способів зварювання титану зі сталлю в твердій фазі, що дають змогу отримати з'єднання з досить високою міцністю зчеплення шарів. До їх числа належать дифузійне зварювання у вакуумі, холодне зварювання, пакетна прокатка у вакуумі, прокатка герметизованих пакетів на звичайних станах і зварювання вибухом. У зв'язку з тим, що дифузійне зварювання у вакуумі і холодне зварювання не дають змоги отримувати з'єднання на досить великій площі, економічна ефективність застосування цих способів для отримання біметалу викликає сумнів. Тому надалі розглядаються способи отримання біметалу прокаткою у вакуумі, на звичайних станах і зварюванням вибухом, як найбільш перспективні. Дослідженнями [2] встановлено, що незважаючи на високу температуру плавлення кожного з металів окремо, під час нагрівання в пакеті між пластинами цих металів утворюється евтектика з температурою плавлення  $1080^{\circ}\text{C}$ . Рідка фаза за результатами хімічного аналізу містить 33,2 % Fe і близько 66 % Ti. Після затвердіння ця з'єднання має високу твердість і крихкістю, що різко знижує міцність з'єднання.

Під час прокатки пакетів може статися викид рідкого металу під великим тиском. Тому оптимальною температурою початку прокатки вважають  $1000\text{--}1050^{\circ}\text{C}$ . Прокатка за цієї температури забезпечує найвищу міцність зчеплення шарів [3]. Вплив глибини вакууму і ступеня деформації на властивості з'єднання VT1-1 + Ст.3 досліджено в роботах [3]. Пакет сталі товщиною 9 мм і титану 3 мм нагрівали до  $1000^{\circ}\text{C}$  і деформували за один прохід на один прохід на 8-30 % у вакуумі із залишковим тиском  $0,006\text{--}2,000\text{ Па}$ .

Під час випробування міцності з'єднання на зріз встановлено, що після обтиснення 13 % у вакуумі  $1,3 \cdot (10^{-3}\text{--}10^{-2})\text{ Па}$  міцність з'єднання становила 157-215 МПа. У тому ж вакуумі після 8 %-ного обтиснення і у вакуумі порядку  $0,13\text{--}1,33\text{ Па}$  - 30-157 МПа. Частина смуг, прокатаних у низькому вакуумі, зруйнувалася під час вирізці зразків для випробувань. У роботі [4] показано, що прокатку пакетів необхідно проводити у вакуумі не нижче  $0,053\text{ Па}$ .

Дослідження впливу ступеня деформації на міцність з'єднання показують, що під час нагрівання і прокатки у вакуумі вже при обтиску 15-20 % за один пропуск забезпечується висока міцність з'єднання шарів. Збільшення обтиснень до 50 % підвищує міцність з'єднання до 245 МПа, проте подальше їх збільшення практично не впливає на міцність зчеплення. Показано також сприятливий вплив дрібності деформації на міцність з'єднання [4].

Порівняння результатів вакуумної прокатки титану ВТ1-1 з армокарбідами, сталями Ст.3, Ст.5, 09Г2 і Х18Н10Т виявляє негативний вплив вуглецю на міцність з'єднання. Так, наприклад, збільшення вмісту вуглецю в сталі з 0,028-0,450 % призводить до значного зниження міцності зчеплення від 255 до 137 МПа. Це пов'язано з тим, що вуглець під час нагрівання дифундує на кордон розділу з титаном і утворює карбіди  $TiC$ , які сприяють окрихчуванню зони з'єднання.

Під час прокатки біметалу в аргоні [4] отримано нижчі значення міцності з'єднання внаслідок появи на поверхні титану окисної плівки, що утворюється внаслідок забруднення аргону активними газами, які виділяються під час нагрівання металу і потрапляють у камеру під час посадки пакета. Необхідно застосовувати аргон підвищеної чистоти і забезпечувати його постійне очищення в процесі роботи стану.

Автори [4] роблять висновок про переважне застосування вакууму під час плакування титаном. Однак відомості про промислове застосування вакуумної прокатки біметалу сталь-титан як у зарубіжній, так і у вітчизняній літературі відсутні. У зв'язку з дефіцитністю вакуумних прокатних станів, а також малою їхньою потужністю [5], що не дає змоги прокатувати великогабаритні листи сталі з плакучим шаром з титану, в Радянському Союзі і за кордоном досліджувалася прокатка біметалу сталь-титан пакетним способом на звичайних станах.

Для захисту титану від окислення і насиченості азотом і воднем зібраний пакет герметизують і продувають інертним газом або вакуумують під час нагрівання. Існує й інший спосіб захисту поверхні титану від газового

насичення (пат. США 2998642, 3015885, 11025531), за яким для зв'язування кисню й азоту, що залишилися всередині герметизованого пакета, в нього закладають пірофорні матеріали.

Одне з перших досліджень зі зварювання титану зі сталлю під час гарячого плющення виконано Є.І. Астровим [5], при цьому сумарна деформація пакета становила 80-90 % при температурі 1000-1100°C, тобто зварювання відбувалося через рідку евтектику. Комплексне дослідження зварювання при гарячій прокатці титану ВТ1-1 з армко-залізом і вуглецевою сталлю виконано В.Л. Бринзою і І.М. Павловим [7-9]. Вони під час прокатки герметизували пакети зварюванням по периметру або нанесенням спецобмазки. Для зменшення окислення в пакет поміщали магнієву стружку. Авторами досліджено вплив ступеня деформації, швидкості прокатки, температури, тиску, товщини шару титану на міцність з'єднання. Експериментально встановлено, що зі збільшенням температури від 70 до 1000°C і ступеня деформації від 40 до 80 % міцність зчеплення шарів біметалу ВТ1-1 і сталі Ст. 2 зростає зі 163 до 483 МПа питомий тиск на валки при цьому становило 170 і 150 МПа відповідно. Міцність зчеплення з підвищенням швидкості прокатки до 0,4 м/с дещо знижується, після чого залишається практично на одному рівні, а зі зменшенням товщини шару титану збільшується з 232 за товщини 10 мм до 368 МПа за товщини титанового шару 2 мм. Найкращими умовами для прокатки є температура в інтервалі 900-1000°C і ступінь деформації в першому пропуску не менше 35-40 %.

Подальшу прокатку до заданого розміру слід проводити в максимально можливе число пропусків, у зв'язку з позитивним впливом дрібності деформації на міцність з'єднання. Слід зазначити, нерівномірність деформації шарів титану і сталі в перших пропусках. Так за загального обтиску 20,8 % обтиснення титанового шару становить 38,4 %, а сталевого – 15 % [8]. Різниця у відносних обтисканнях шарів тим більша, чим менший загальний ступінь деформації пакета. Тому за невеликих ступенів деформації в перших пропусках (5-20 %) настає розшарування пакета як результат нерівномірності деформації, тоді як за

вакуумної прокатки в інтервалі цих обтиснень розшарування біметалу не відбувається, що пов'язує з окисленням титану [9].

У роботі [10] робиться повідомлення про прокатці біметалевих листів сталь-титан товщиною 6-30 мм і розміром до 23 м. Товщина шару титану 1,5-3,0 мм. Біметал має задовільні міцносні та пластичні властивості.

Автори роботи [11] виготовили дослідну партію біметалевих листів прокаткою симетричного вакуумованого пакета при температурі 900 °С. Після прокатки біметал відпалювали 2-5 год за температури 680-850 °С. Матеріал добре витримував загин на 180° і штампувався з витяжкою після 15-хвилинного нагрівання при 600-800 °С. За даними роботи [10] гаряча прокатка пакетів з пірофорним матеріалом дала змогу отримати листовий біметал, що добре витримує вібрацію та ударні навантаження, для плакування застосовувався конструкційний титан St-60 (менше 0,07 % азоту, менше 0,01 % вуглецю, 0,3 % заліза), а як основного шару використовували конструкційну або котельну сталь. За розрахунками автора, виготовити біметал із товщиною сталевого шару менше 6 мм економічно недоцільно. Економічний ефект досягається у разі виготовлення плакованих листів з товщиною сталі понад 60 мм і з товщиною титану 1,5-3,0 мм.

Повідомлення про гарячу прокатку (800-850 °С) симетричних пакетів титан-сталь робиться в роботі [8]. Опір зрізу шарів біметалу після прокатки при ступені обтиснення понад 40 % і відпалу протягом 0,5 години при температурі 650 °С склав 150 МПа.

Розроблено технологію і виготовлено дослідну партію біметалевої стрічки з армко-заліза, плакованого титаном ВТ1-1 для приладобудування. Ковані сутунки армко-заліза і пластини титану збирали в симетричний пакет, додавали магнієву стружку і герметизували по периметру [12]. Товщина пакетів становила (5+1+1+5) мм або (10+2+2+10) мм, ширина 110-170 мм, довжина 220-320 мм.

Для вирівнювання пошарових деформацій виявилось доцільним нагрівати пакети до 850 °С і підстуджувати перед прокаткою до 700-750 °С, щоб

отримати температуру титану 800 °С, а зовнішніх шарів 700-750°С. Пакети товщиною 12 мм прокатували за режимом 1274,53 мм, а пакети завтовшки 24 мм - за шість проходів із сумарним обтисненням приблизно 90 %. Якість зварювання гарячекатаних смуг перевіряли загином на кут 180° при діаметрі оправки, що дорівнює товщині біметалу, і скручуванням смуги шириною 20-30 мм. Розширеності при цьому не виявилось. Після відпалу протягом 0,5 год за температури 600 °С, показали, що біметал мав тимчасовий опір 333-253 МПа, межу плинності 196-245 МПа, граничне відносне подовження 16-25 %. Розширень при розтягуванні не з'явилося. Після гарячої прокатки біметал протравили, розрізали на смуги завширшки 80-90 мм і піддали холодній прокатці. Матеріал виявився дуже чутливим до нерівномірності розподілу обтиснення по ширині смуги в перших пропусках.

Тому для попередження розширення довелося в першому і другому пропусках давати 30-65 % обтиснення. Остаточна товщина стрічки склала 0,2-0,3 мм.

Дослідами встановлено, що робочі валки стану холодної прокатки мають бути циліндричними або увігнутими. Бочкоподібність валків призводить до того, що в першому пропуску середина смуги тягнеться сильніше, ніж кромки, і титановий шар відділяється повністю, як би добре він не був приварений під час гарячої прокатки.

У цій же роботі показано можливість отримання стрічки товщиною 0,1-0,3 мм тільки холодною прокаткою. Для якісного зварювання при отриманні біметалу холодною прокаткою необхідно:

- 1) обтиснення в першому проході на 60-65% після знежирення і зачищення щітками;

- 2) зменшення вмісту кисню в титані до 0,07 %, водню до 0,0084 % і азоту до 0,044 %;

- 3) рівномірне обтиснення обох шарів, для чого армко-залізо слід відпалювати при температурі 600-650 °С. Наклеп біметалевої стрічки рекомендується знімати вакуумним відпалом протягом однієї години за 600-700

°С. Вакуум під час відпалу має бути не менше 1,310-2 МПа для збереження геттеруючої здатності титану;

у вакуумі глибиною 1,3 МПа (10-2 мм рт. ст.) титанове покриття сильно темніє, поглинаючи гази і втрачаючи пластичність.

У промислових умовах прокатку вакуумованих пакетів здійснено Б. С. Смирновим, О. Ф. Данилевським та ін. [14]. Для прокатки на стані 4000 збирали несиметричні пакети зі сталеві плити (Ст.3) товщиною 220 мм, титану ВТ1-1 товщиною 28 мм і кришки зі Ст.3 товщиною 45 мм. Як розділовий шар між титаном і кришкою зі Ст.3 застосовували окис магнію. Розміри пакета в плані 9001000 мм. Після обварювання по периметру пакет вакуумували до 6,7-0,1 МПа через патрубок, який потім був заварений. Нагрівання пакетів здійснювали в камерних мазутних печах при 1030-1050 °С протягом 6 годин і потім перекочували до розмірів 45 13003500 мм. Товщина титану в листі становила 15 %, розшарувань за даними ультразвукової дефектоскопії не було, опір зрізу становив 147-196 МПа. Біметал витримував загин на кут 180° в обидва боки.

У роботі [15] випробувано комбінований метод виготовлення листів титан+сталь 10Г2Б і титан+Стат.3, що складається з зварювання шарів пакета вакуумною прокаткою і подальшого розкочування на повітрі. Вплив повторних нагрівів на властивості з'єднання сталі з титаном досліджено Бринзою В. М. і Лепекіним В. С. [7]. Ними показано, що повторні нагрівання біметалу при температурах 750, 900 і 1000 °С призводять до значних змін структури перехідної зони і, як наслідок цього, до різкого зниження пластичності з'єднання. Тому для поліпшення властивостей біметалу в перехідній зоні рекомендується про водити відпал при температурі 450-500 °С. Так, шестиразовий відпал за температури 400 °С знизив вихідну мікротвердість на лінії з'єднання з HV 760 до HV 520 при одночасного зниження твердості титану і сталі.

Авторами [16] розроблена обмазка для захисту титанових сплавів від окислення такого складу: 31-35 % тальку, 16-18 % порошку рутила, 8-10 % бури, 12-14 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 0,3 %  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 17 % білої глини і 28-30 % води.

Дослідження показують, що властивість титанових сплавів, покритих шаром обмазки, після нагрівання за температури 900-1200 °С у звичайних нагрівальних пристроях істотно не відрізняються від властивостей титану після нагрівання у вакуумній печі. У висновку аналізу способів отримання біметалу сталь-титан прокаткою слід зазначити, що у вітчизняній літературі немає єдиної думки про раціональний спосіб отримання такого біметалу прокаткою. Прихильники вакуумної прокатки [9], посиляючись на результати роботи [12], де під час отримання дослідної партії біметалу прокаткою герметизованих пакетів у 30-55 % випадках мало місце розшарування біметалу, і на аналогічні нестабільні результати при прокатці пакетів сталь-титан на Комунарському металургійному заводі, висловлюють сумніви в можливості організації масового виробництва біметалу титан-сталь способом пакетної прокатки на повітрі. В свою чергу прихильники пікетної прокатки [14] на підставі своїх досліджень роблять висновки про те, що для отримання такого біметалу вакуумні стани не потрібні.

### **1.8 Інтенсивна пластична деформація при видавлюванні**

Значне подрібнення структури металів та сплавів, аж до виникнення наноструктурних станів, може бути забезпечене інтенсивною пластичною деформацією (ІПД) [14]. Наведені технологічні схеми ІПД мають низку переваг. По-перше, можна виготовити масивні зразки для проведення механічних випробувань. По-друге, у одержуваних з порошків матеріалах може бути істотно знижена залишкова пористість. По-третє, ці методи можна використовувати для отримання наддрібнозернистої структури не тільки у модельних, а й у промислових сплавах, що дозволяє говорити про перспективи промислового застосування. До таких методів можна віднести і перспективний спосіб обробки металів ІПД видавлюванням для подрібнення структур [14]. Основні технологічні етапи цього методу наведені на рисунку 1.20.



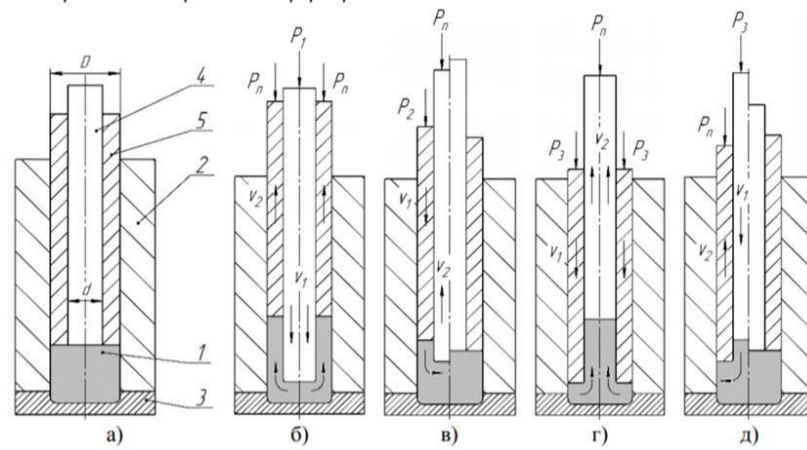


Рисунок 1.20. – Схема процесу ПД видавлюванням: а – вихідний стан; б – зворотне видавлювання «склянки»; в – утворення вихідної форми радіальним видавлюванням з «склянка»; г – зворотне видавлювання стрижня з потовщенням; д – утворення вихідної форми радіальним видавлюванням з стрижня з потовщенням; 1 – заготівля; 2 – матриця; 3 – плита підкладна; 4 – суцільний пуансон; 5 – порожнистий пуансон;  $P_1 - P_3$  – сили видавлювання на різних стадіях;  $P_n$  – сила протитиску ( $0 \leq P_n < P_2$ ,  $0 \leq P_n < P_3$ );  $D, d$  – діаметри пуансонів;  $v_1, v_2$  – швидкості руху інструментів [14]

Заготівлю 1 поміщають у матрицю 2, встановлену на спеціальній плиті 3. Висота матриці перевищує висоту заготовки. На заготівлю встановлюють суцільний 4 і порожнистий 5 пуансони, які по черзі здійснюють деформування. На рис. 1.21 подань алгоритм, що демонструє різні комбінації деформування при інтенсивній пластичній деформації видавлюванням.

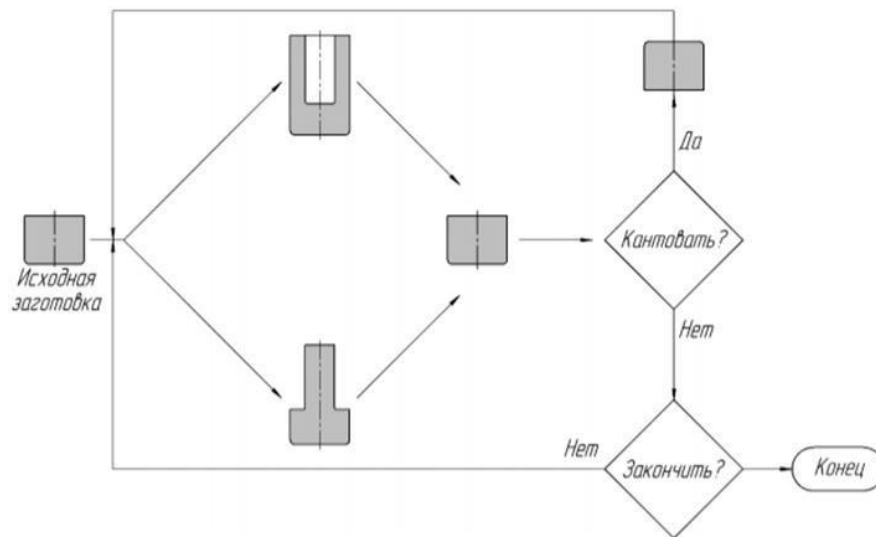


Рисунок 1.21 – Алгоритм комбінації деформування [14]

На основі розробленого алгоритму сформовано матрицю різних варіантів (табл. 1.1) процесу ПД видавлюванням, де 0 і 1 – булеві змінні, відповідні виконання деформування 1 або невиконані 0. Таблиця 1.1 – Морфологічна матриця варіантів ПД витіскуванням [14]

Специфіка структуроутворення та деформаційного зміцнення при переході до інтенсивних пластичних деформацій, вперше була відзначена та систематично вивчена у роботах В.І. Трефілова, Ю.І. Мільмана та С.А. Фірстова. В.І. Трефілов та С.А. Фірстів із співробітниками виявили, що зі зростанням деформації у матеріалі формується якісно новий вид дислокаційної структури – сильно зорієнтовані осередки. Основна їх особливість – це неперервне збільшення кутів зорієнтувати зі зростанням деформації при слабкому зменшенні поперечних розмірів. Як потім виявилось, подібна еволюція структури притаманна й іншим металам. Трефілів В.І. з співробітниками запропонували оцінювати деформаційне зміцнення при інтенсивних деформаціях з позицій зменшення розміру зерна – у граничному випадку до розміру сильно зорієнтовані осередки. Його точка зору про радикальну зміну механізму зміцнення отримала чисельні підтвердження і в даний час визнається багатьма вченими [14].

Виходячи з сказаного, можна зробити висновок, що спрямований і неперервний у процесі пластичної деформації рух дисклінацій повинен призводити до фрагментації структури металу, тобто розбиття його на мікрообласті, зорієнтовані на кути порядку декількох градусів. Чим більше буде ступінь пластичної деформації, тим дрібніше повинні бути фрагменти і більший їх розворот щодо один одного (рис.1.22).

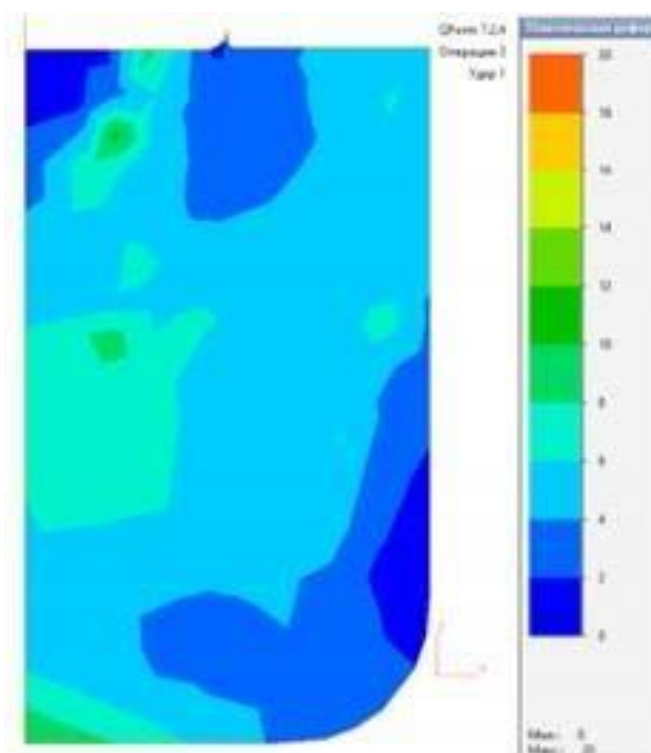


Рисунок 1.22 – Розподіл пластичної деформації при витискуванні [14]

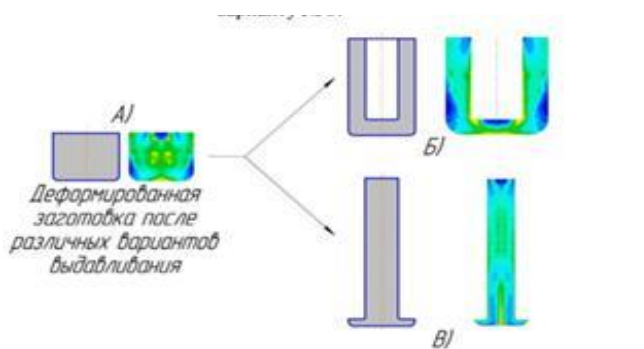


Рисунок 1.23 – Алгоритм формування результатів: а) заготівля з накопиченим ступенем деформації після реалізації одного з варіантів

видавлювання; б) напівфабрикат типу «склянка»; в) напівфабрикат типу «стрижень із потовщенням» [14]

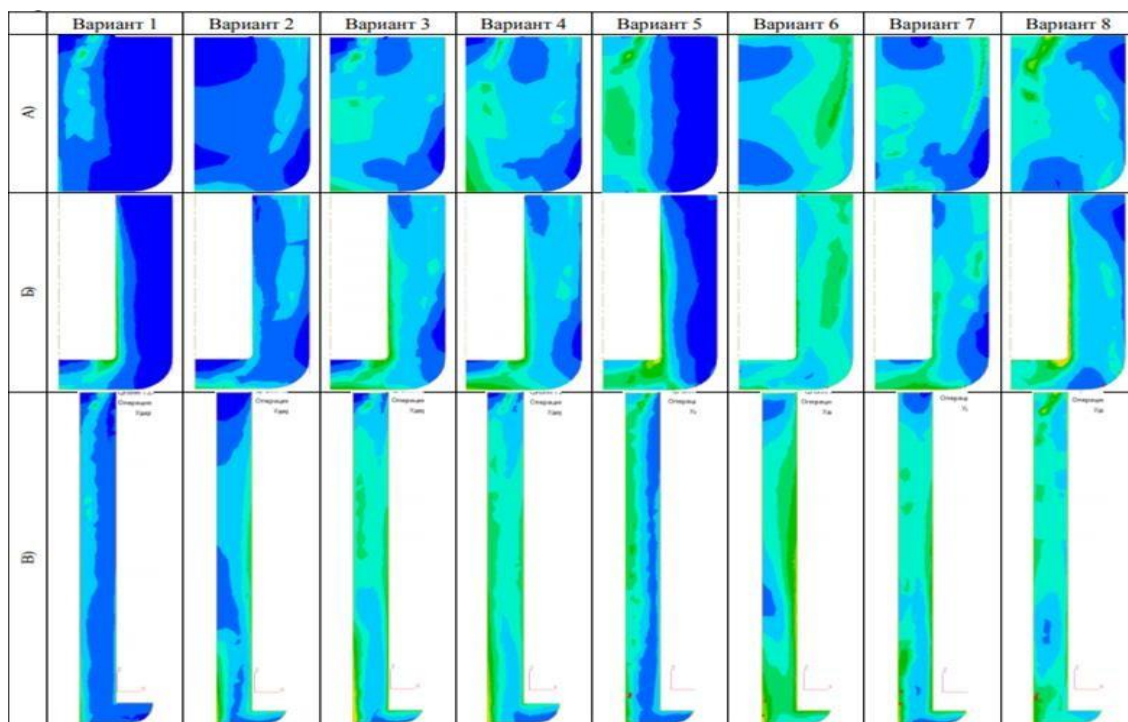


Рисунок 1.24 – Імітаційне моделювання з різних варіантів витіскування [14]

Аналізуючи рисунок 1.24 за результатами імітаційного моделювання після різних варіантів видавлювання, можна зробити висновок, що [14]:

1) інтенсивність деформацій по перерізу циліндричної заготовки розташовано нерівномірно та використання її у подальшій обробці неперспективне. Можливе застосування окремих варіантів, наприклад, варіант №5 ( $\epsilon_{cp} = 7$ ), коли деформація в основному сконцентрована в центральній частині на осі Z (зняття певної версти на токарному станку з подальшим використанням міцної серцевини у різних деталях). Для використання накопичених деформацій найбільш раціонально пропонується видавлювати циліндричні заготовки зміцнені різними варіантами видавлювання за алгоритмом наведеним на рис. 1.23.

2) для отримання зміцнених трубних заготовок або циліндричних напівфабрикатів із міцною стінкою пропонується використовувати варіант

№6 з додатковим видавлюванням металу на останній операції у «стакан» – деформації за такої схеми видавлювання розподіляються найбільш рівномірно по всьому перетину напівфабрикату ( $\epsilon_{cp} = 8$ ).

3) для отримання різних зміцнених по всьому перетину стрижневих заготовок необхідно використовувати варіанти видавлювання № 3, 4, 7, 8 з видавлюванням на останній операції «стрижня з потовщенням» ( $\epsilon_{cp} = 7$ ). Якщо необхідні стрижневі заготовки з міцною серцевиною та м'яким зовнішнім шаром, то необхідно використовувати варіант №5 з видавлюванням на останній операції «стрижня з потовщенням» ( $\epsilon_{cp} = 5$ ). Можливе отримання стрижнів зі зміцненою периферичною частиною та м'якою серцевиною, для цього необхідно провести деформування за варіантом № 2 або 6 з видавлюванням на останній операції «стрижня з потовщенням» ( $\epsilon_{cp} = 7 \div 9$ ).

Висновки:

1. Розглянутий спосіб перспективний для здійснення ПД у великогабаритних заготовках, у тому числі з інтерметалідів та інших матеріалів.
2. Напружено-деформований стан дозволяє забезпечити інтенсивні пластичні деформації заготовок без руйнування та дефектів.
3. Зіставлені результати імітаційного моделювання та ПД у заготовках з можливим застосуванням цих результатів для отримання заготовок або напівфабрикатів.

### **1.9 Моделювання процесу видавлювання біметалевої заготовки**

Щодо біметалевих дротів і прутків, для яких характерним є плакучий шар виконаний з міді і стержня з алюмінію, застосовується електропровідність міді і невеликі вагу алюмінію. Біметалі Al-Cu широко застосовуються в різних галузях промисловості, головним чином електротехніці, електроніці та телекомунікації [15]. На першому етапі мало місце розтягування шарів біметалу, що спричинило виникнення поперечних тріщин приповерхневих шарів, попередньо зміцнених під час підготовчих операцій. Тріщини

призводять до відкриття чистого металу та внаслідок впливу великого тиску між шарами (виступаючого внаслідок кінематики процесу видавлювання) призводять до наближення до атомного відстані. З цього випливає, що для з'єднання видавлювальних металів слід правильно розтягувати з'єднувальні шари, до моменту виникнення мікротріщин і призвести до великого одиничного тиску між сполучаються шарами [15].

На першому етапі деформації в матрицях під кутом нахилу  $\varphi=105^\circ$ , найбільша напруга виступає в місці, де шар стрижня є у контакті з дном горизонтального каналу, тоді практично цілий тиск штемпеля буде направлений у цю зону. На цьому етапі велика інтенсивність напруги з'являється також у зоні внутрішньої кутової частини, що викликано раптовою зміною напрямку течії металу, головна частина якого переміщається у бік горизонтального каналу (рис 1.25 а).

Для цього етапу характерним є невстановлений характер течії шарів, шари пристосовуються до зони деформації. У зв'язку з меншою пластичністю плакіра, можна спостерігати відшаровування шару плакіра від стрижня в області зовнішньої кутової частини матриці головної частини заготовки (рис. 1.25, а).

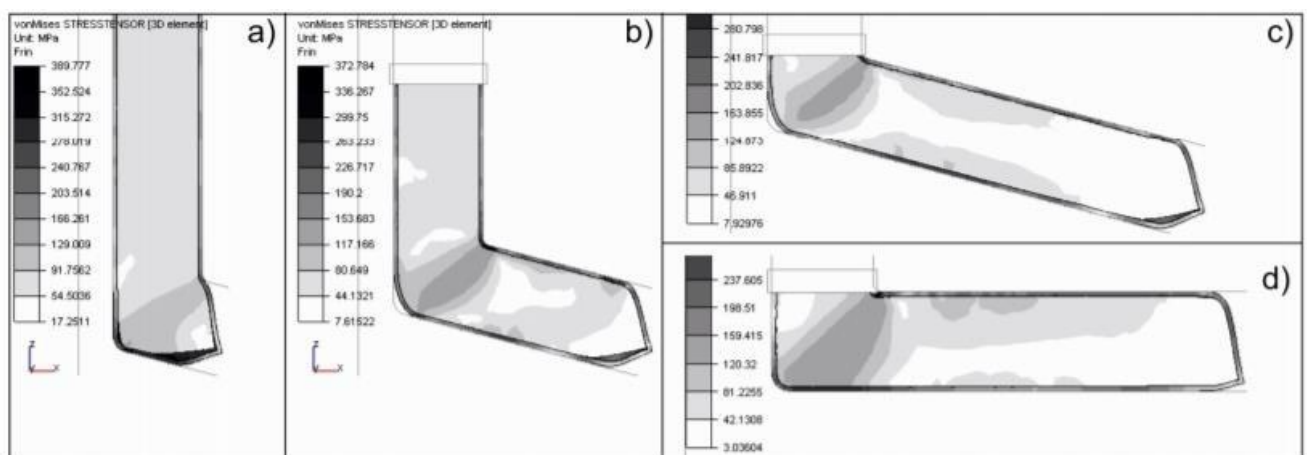


Рисунок 1.25 – Інтенсивність напруги для біметалу що деформується в матриці під кутом.  $\varphi = 90^\circ$ : а – I етап (початковий); б – II етап (встановлена течія); в – III етап (кінцевий); і для матриці під кутом  $\varphi = 105^\circ$ ; г – III етап [15]

На іншому етапі формується зона пластичної течії, яка у зв'язку з низьким коефіцієнтом тривання, є несиметричною і пересунутою у бік горизонтального каналу. На цьому етапі найбільша інтенсивність напруги виступає в плакуючого шару, в області внутрішньої кутової частини матриці, тому що в цьому місці з'являється найбільша розтягуюча напруга вздовж напрямку течії металу. У зоні деформації можна спостерігати незаповнення зовнішньої кутової частини матриці металом, яке має місце до кінця процесу (рис. 1.25, б). На останньому етапі характер течії шарів у зоні пластичної деформації змінюється. Натомість значення напруги підлягають уніфікації уздовж перерізу горизонтального каналу, найбільші значення виступають у нижнього шару плакіра, де напруга рівномірно розміщена уздовж цього шару, а найменші значення виступають на осі стрижня (рис. 1.25, в). [15]

Під час витискування біметалу в матриці під кутом нахилу  $\varphi=90^\circ$  можна помітити загальне збільшення напруги після відношення до матриці під кутом нахилу  $105^\circ$ , у всьому перерізі, у всіх етапах процесу, що очевидно у зв'язку з великою мірою деформації заготівлі. Тільки на першому етапі процесу, у матриці  $\varphi=105^\circ$  виступає значна концентрація напруги на дні каналу, їх максимальні значення є трохи більшими, ніж для матриці  $90^\circ$ , для якої напруга рівномірно розміщена уздовж стіни горизонтального каналу. У зв'язку з рівномірно розміщеним напругою в цій зоні і загальним збільшенням сили витискування, не спостерігається розшарування в головній частині заготівлі. Після входу обох шарів у горизонтальний канал, має місце встановлена течія, де найбільша напруга виступає у зоні проникнення каналів, у плакуючі шари, особливо у внутрішній кутовій частині і при нижній стіні горизонтального каналу (мал. 1.25, г). З точки зору можливості з'єднання шарів під час процесу рівне каналне кутове пресування істотним фактором є розміщення нормальної напруги на межі шару під час всього процесу. (Рис. 1.26) [15]

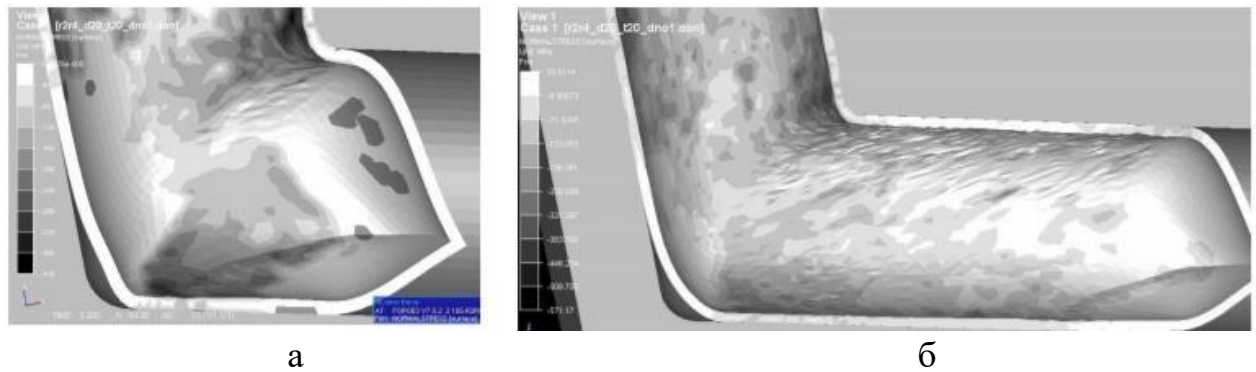


Рисунок 1.26 – Розміщення нормальної напруги на поверхні плакуючого шару: а) на початковому (невстановленому); б) на встановленому етапі деформації у матриці під кутом  $\varphi = 105^\circ$  [15]

На першому етапі можна спостерігати локальну концентрацію нормальної зрізуючої напруги на поверхні плакуючого шару (рис. 1.26, а). Найбільші значення напруги з'являються при внутрішній кутовій частині матриці перед входом шару в зону пластичної деформації, зате при зовнішній кутовій частині матриці, велика концентрація напруги виступає у місці контакту з дном горизонтального каналу. Значення напруги в цих зонах становить близько 300 МПа.

В інших місцях стику між шарами заготовки, з'являється менша зрізуюча напруга. В області зовнішньої кутової частини і головної частини заготовки, шару розшаровуються, що є наслідком присутності плюсової розтягуючої напруги (р.с. 1.26, а і рис. 1.25, а). На наступному етапі має місце встановлена течія шарів про локальні максимум розміщені на тих же областях, але при значно збільшених значеннях. Максимальні значення складають близько 500 МПа на встановленому етапі (рис. 1.27, б), до 700 МПа на кінцевому етапі. [15]



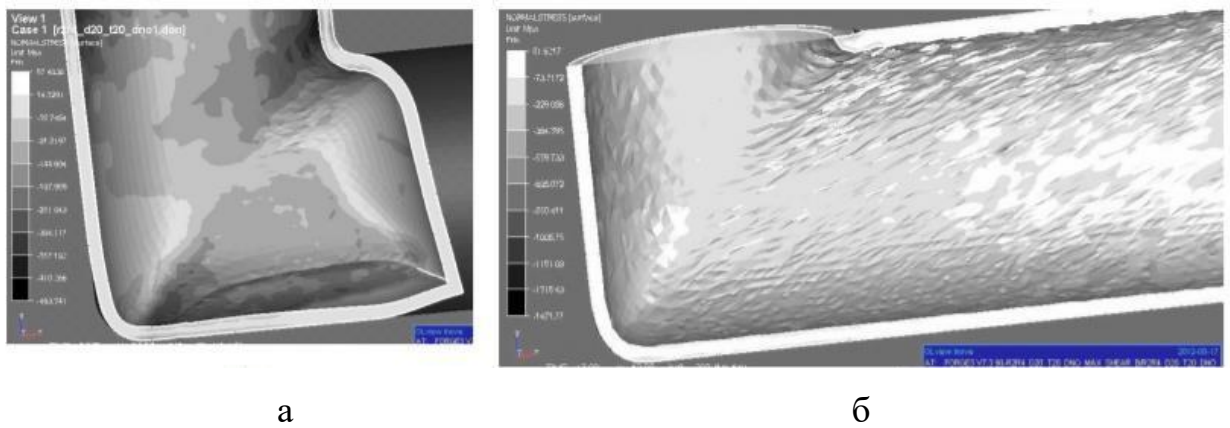


Рисунок 1.27 – Розміщення нормальної напруги на поверхні плакуючого шару а) на початковому (невстановленому); б) на встановленому етапі деформації у матриці під кутом  $\varphi = 90^\circ$  [15]

У матриці  $\varphi=90$  необхідність робити великі сили витискування для деформації заготовлі, що призводить до кращого виконання зовнішньої кутової частини на першому етапі процесу (рис. 1.27, а). Найбільше напруга на цьому етапі виступає в тих самих областях, що у матриці  $\varphi=105^\circ$ , максимальних значень досягають – 450 МПа. На другому і третьому етапі виступає повне виконання кутової частини матриці і однорідність напруги в горизонтальному каналі, значення під час цих етапів збільшуються до – 1000 МПа (рис. 1.27, б). Можна зазначити, що нормальне навантаження в зоні зовнішньої кутової частини перед входом у зону пластичної деформації має невеликі значення біля – 100 МПа а після входу біметалу в зону горизонтального каналу, вони піддаються різкому стисканню і досягають максимального значення, яке виступає від початку горизонтального каналу до головної частини зразка [15].

## 2 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ QFORM

QForm 2D/3D – програмний комплекс для моделювання і оптимізації процесів обробки металів тиском. Програма ґрунтована на методі кінцевих елементів, розробляється фірмою "QuantorForm" (Великобританія). Сфера застосування QForm включає процеси об'ємного штампування (холодної і гарячої), кування, пресування, вальцювання, розкочування, плющення і тому подібне (рис.2.1). Qform – професійне технічне програмне забезпечення, використано для моделювання, аналізу і оптимізації металевих процесів формування, що забезпечують чудову надійність.

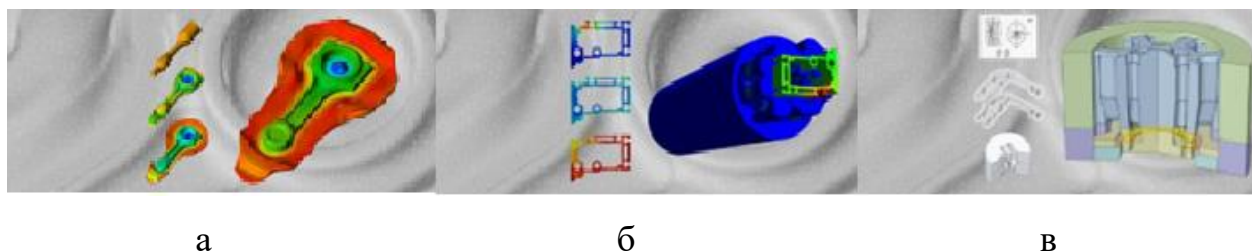


Рисунок 2.1 – Моделювання металу: а – об'ємне штампування; б – пресування;  
в – штамп

### 2.1 Призначення програми QForm

Програми комп'ютерного моделювання процесів ОМТ7 призначені для аналізу великих деформацій металу (ми часто говоримо "течії металу") у технологічних процесах типу штампування, пресування, плющення та ін. При цьому моделюється саме формозмінення металу, розподіл температури, деформацій і напруги, як у заготовці, що деформується, так і в робочих інструментах (штампах, вальцях, матриці пуансоні), які випробовують значні навантаження.

Поняття точності припускає хорошу відповідність результатів, здобутих моделюванням, реальним процесам як щодо формозмінення (заповнення штампів, можливе утворення складок та інших дефектів), так і за іншими параметрами (температура, зусилля деформації і так далі).

## 2.2 Основні особливості системи

QForm є повнофункціональним об'єктно-орієнтованим додатком Windows. Простий і інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс робить систему доступною та легкою у використанні навіть для початкових користувачів персональних комп'ютерів. Завдяки наявності анімаційної системи допомоги та підказки система зручна у вивченні.

Повністю інтегрована архітектура QForm забезпечує синхронне виконання робіт будь-якої частини програми. Немає жодного жорсткого розділення системи на препроцесори та постпроцесори. Візуалізація процесів формозмінення відбувається одночасно з розрахунком, що дозволяє негайно інтерпретувати отримувані результати та вносити до технології необхідні зміни [21].

Під час підготовки початкових даних користувач оперує виключно технологічними поняттями і спілкується з системою на звичній мові конструктора-технолога, а майстер підготовки початкових даних у режимі "живлення-відповідь" дозволяє швидко і легко ввести всі необхідні для розрахунку параметри.

QForm забезпечує автоматичне формування розрахункових моделей (розбиття на кінцеві елементи), що дозволяє забезпечити високу точність розрахунку, не залежну від кваліфікації користувачів. QForm дозволяє проаналізувати всю технологічну ланцюжку отримання поковки, включаючи нагрів, охолодження та пластичну деформацію на всіх переходах, зміну властивостей матеріалу. Імітаційне моделювання такої технологічної цепочки виконується автоматично і дає можливість користувачеві швидко та ефективно

проаналізувати декілька різних варіантів за принципом "що, якщо" [20]. З усіх перерахованих особливостей найбільш суттєва відмінність системи QForm від аналогів полягає у її граничній простоті для користувачів. Це абсолютний рекорд, який "КванторФорм" тримає на ринку САЕ-систем моделювання пластичної деформації вже кілька років. Програма зрозуміла і доступна будь-якому технологіві як з вищим освітою, так і без неї.

Аналіз об'ємного штампування в системі QForm може бути виконаний в одній площині, коли форма штампованої деталі є тілом обертання. В цьому випадку досить ефективно виконується аналіз у протяжному перерізі, що проходить через вісь деталі. Такий же ефективний аналіз у перерізі для випадку, коли тіло має витягнуту в одному напрямку форму (наприклад, балка). Тут розрахунок виконується для поперечного перерізу. Якщо деталь по довжині має змінний переріз, то досліджується де що найбільш характерних перерізів. І третій, найбільш складний випадок – коли штампована деталь не має яскраво виражених площин перерізу. У цьому випадку вирішується тривимірне завдання, яке досі у всьому світі вважається найбільш складним і, на жаль, поки що не має відповідального рішення. Аналіз процесів пластичної деформації з використанням методу кінцевих елементів істотно відрізняється від міцного аналізу. Однією з важливих особливостей у міцності аналізу є припущення про несуттєвий формозмінений навантажений вироб, тому для виконання міцного аналізу в розрахунковій моделі досить побудувати тільки одну звичайно-елементну сітку. При аналізі процесів пластичної деформації необхідно простежити та проаналізувати всю історію формозмінення від заготівлі до готової поковки.

Тому доведеться вирішувати сотні і навіть тисячі нелінійних завдань, перш ніж користувачеві буде видано рішення кінцевої конфігурації. До речі, це одна з головних причин, через які рішення тривимірних завдань у галузі штампування істотно відстає від рішення тривимірних завдань у галузі міцного аналізу.

### 2.3 Можливості розрахункової програми

Робиться розрахунок холодного, теплого і гарячого об'ємного штампування. Кількість інструментів може бути задана до 20 з довільним напрямом руху. Висока точність розрахунку течії металу. Передбачається виникнення різних штампувальних дефектів, таких як незаповнення гравюри, затиски і простріли. Характер течії металу може бути оцінений по Лагранжевих лініях, що розраховуються, в заготівлі. Передбачено також трасування розрахункової інформації у будь-якій матеріальній точці заготівлі в процесі формозмінення.

Геометрія інструменту і заготівлі в процесі розрахунку течії металу апроксимується квадратичними поверхневими кінцевими елементами. Сітка усередині заготівлі і інструментів створюється на основі лінійних тетраедрів. Для 3D розрахунку початкові геометричні дані імпортуються в QShape – тривимірний графічний модуль QForm, з CAD систем користувача у форматі \*.STEP/IGES. Для 2D розрахунку плоскі геометричні дані імпортуються в QDraft – двовимірний графічний модуль QForm, з CAD систем користувача у форматі \*.DXF. Повністю автоматичне створення первинної адаптованої звичайно-елементної сітки. В процесі розрахунку сітка перебудовується автоматично без втручання користувача. Процес покрокового розрахунку здійснюється з повним автоматичним налаштуванням кроку і приросту. Заготівля розглядається як жорстко-пластичне тіло, що деформується в неізотермічних умовах. Можливий розрахунок порошкових (пористих) матеріалів в 3D. Охолодження/нагрів може бути розрахований як термопружне завдання.

Наприклад, після гарячого штампування можна розрахувати зміну форми і порахувати виниклу напругу в тілі після охолодження. Інструмент розраховується як пружно-пластичне тіло в ізотермічних умовах. Можливий розрахунок переміщення заготовки під дією гравітації з урахуванням впливу

тертя і інерції, а також визначення її положення перед штампуванням в інструменті із складною поверхнею.

Опір деформації матеріалу заготівлі залежить від деформації, температури і швидкості деформації. Інші властивості матеріалу, такі як щільність, теплопровідність, теплоємність, модуль Юнга, межа плинності, залежать від температури. У базі даних QForm містяться більше 1000 марок сталей, а також інші сплави на основі кольорових металів. Технологічний процес штампування розглядається як технологічний ланцюжок, який може складатися з 2D і 3D операцій, між якими заготівля передається автоматично. На заготівлі можливе завдання до 3 площин симетрії.

Між вертикальними площинами симетрії може бути будь-який кут. Можливий розрахунок з ротаційною симетрією, наприклад штампування валетом. Програма забезпечує розрахунок варіантів в пакетному режимі. Заготовка може бути відновлена з частини до цілого при розрахунку технологічного ланцюжка. Робиться оцінка зносу інструменту в процесі штампування. Враховується вплив бандажних кілець при розрахунку напруги і деформацій в 3D інструменті. При розрахунку 2D інструменту може розглядатися складений інструмент з проміжками і натягом. Деформація заготовки може бути порахована на механічному, ексцентриковому або кривошипному пресах, молотах, як шаботних так і бесшаботних гвинтових і гідравлічних пресах.

Параметри процесу (час, кінцеве положення інструментів, температура і т. д.) задаються за допомогою інтуїтивно-зрозумілого помічника завдання початкових даних, що забезпечує повноту даних і оберігає від помилок.

Можливості програми

- моделювання кування
- моделювання об'ємного штампування (холодної та гарячої)
- моделювання вальцювання і плющення
- моделювання процесів розкочування
- моделювання екструзії (пресування профілів)

- моделювання термообробки
- моделювання зміни мікроструктури під час технологічного процесу

#### Переваги

- можливість імпорту геометричних даних з більшості CAD;
- просте завдання початкових даних в майстрові;
- редаговані бази матеріалів, мастил і устаткування

#### Недоліки

Відсутня можливість написання призначених для користувача підпрограм для постобробки даних, що обмежує можливості використання програми в дослідних цілях.

В новій версії програми QForm 7 ця функція була додана.

## 2.4 Робота QForm

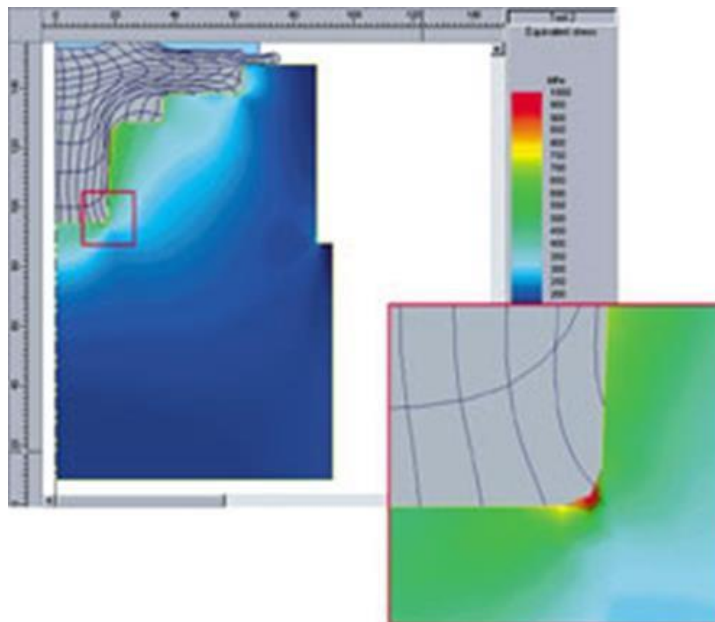
Наприклад, при виборі гарячого об'ємного штампування заготовка має бути нагріта до заданої температури (наприклад, для сталі нагрів матеріалу заготівлі здійснюється до 1200° С). У печі вона нагрівається рівномірно за усім обсягом. У момент витягання заготовки з печі починається процес її охолодження на повітрі. Тому першим етапом є моделювання охолодження рівномірно нагрітої заготовки після виходу з печі.

На цьому етапі вводяться вже готові дані по геометрії заготовки, з бази даних вибирається її матеріал, задаються температура нагрітої заготовки і час її охолодження на повітрі.

Наступний етап аналізу – охолодження частини нагрітої заготовки, що є у контакті з нижньою частиною штампу. Початковий стан заготовки наслідуює з попереднього переходу. Користувач задає тільки час охолодження заготовки на нижній частині штампу до моменту її зіткнення з верхньою частиною штампу, а також такі параметри, як тип мастила (наприклад, графіт з водою) і температура штампу (наприклад, 200°С – типова температура нагріву штампу для гарячого об'ємного штампування).

У разі коли поковку передбачається отримувати за один перехід, призначається завершальний етап – безпосередній процес пластичного формозмінення заготовки. В якості початкових даних користувач з бази даних вибирає прес (наприклад, механічний), задає відстань між верхньою і нижньою частинами штампу в закритому стані (фактично це товщина облоя). Дані про інструмент і заготовку автоматично передаються з попереднього переходу.

На цьому побудова ланцюжка фізичного перетворення заготовки закінчується, і програма запускається на розрахунок. Ні на одному з етапів від користувача не було потрібно якісь спеціальні знання, окрім чисто технологічних. Усю роботу, пов'язану з побудовою звичайно-елементної сітки і з її подальшою модифікацією в процесі виконання розрахунку, програма виконала автоматично непомітно для самого користувача. Проте, якщо подивитися на автоматично згенеровану сітку, можна побачити, що вона неоднорідна і має найбільшу щільність там, де відбуваються найбільш інтенсивні деформації (рис. 2.2).



2.2 – Інтенсивність напруги в деформуючому інструменті

На кожному кроці деформації будується своя звичайно-елементна сітка, з таким розрахунком, щоб складові її елементи за формою були як можна ближчі



до рівносторонніх трикутників (відомо, що якщо елемент спотворений, наприклад сильно витягнутий, то точність апроксимації істотно падає). Автоматична перебудова сітки на кожному кроці деформації – дороге задоволення, але якщо цього не робити, то на наступному кроці аналізу витягнуті кінцеві елементи приведуть до істотного зниження точності оцінки. Творцям QForm за десять років роботи в області моделювання процесу пластичного моделювання вдалося розробити ефективний алгоритм швидкої і якісної перебудови сіток. На це йдуть всього частки секунди на кожному кроці деформації.

Кожен етап процесу моделювання користувач може спостерігати як після закінчення розрахунку, так і під час виконання комп'ютерного аналізу. Зокрема, він може спостерігати:

- як змінюється температура поковки (з точною її оцінкою у будь-якій точці досліджуваного перерізу, що цікавить його);
- конфігурацію так званих лагранжевих ліній, які з фізичної точки зору є не що інше, як волокна макроструктури матеріалу;
- як розподіляються накопичені деформації усередині і на поверхні поковки;
- в якій послідовності заповнюються порожнини інструменту і так далі.

На кожному етапі можлива побудова різних графіків. Наприклад, залежність зміни зусилля від часу на етапі пластичної деформації.

Отримана в результаті чисельного моделювання поковка може бути віддана додатковому аналізу на предмет її подальшої механообробки.

Відомо, що однією з переваг застосування об'ємного штампування при виготовленні деталі в порівнянні з литтям є забезпечення більш високої якості виробу. Це пов'язано з тим, що кристалізація металу у міру охолодження відливання йде від центру до її поверхні, і хаотична орієнтація кристалічних зерен усередині матеріалу частенько залишає бажати кращого по відношенню до напряму дії основних навантажень, що сприймаються деталлю.

Використання операції штампування дозволяє досягти в цілому більш високих властивостей металу, забезпечити необхідну орієнтацію волокон і тим самим додатково підвищити міцність деталі.

Але тут є один нюанс, який також слід враховувати. Річ у тому, що в переважній більшості випадків форма поковки відрізняється від форми деталі, що виготовляється, тому її віддають механообробки. В результаті деякі волокна виявляються такими, що підрізають. Щоб це візуально контролювати, QForm показує зображення контура деталі, накладене на зображення поковки (рис. 2.3).

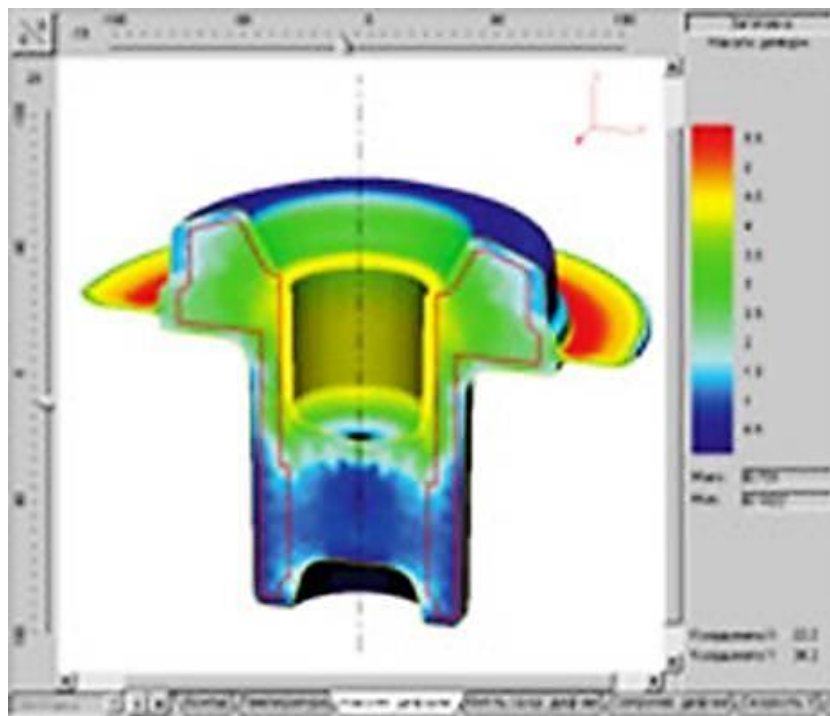


Рисунок 2.3 – Контур деталі, накладений на поковку із зображенням течії (ліворуч) і з розподілом накопиченої степені деформації

Крім того, властивості матеріалу за об'ємом поковки будуть неоднаковими в силу нерівномірної деформації і, отже, зміцнення.

Інформація по розподілу деформації також представляє інтерес для фахівця з термообробки. Проаналізувавши усі дані по накопиченій деформації,

він може призначити які-небудь режими подальшої термообробки деталі, що особливо важливо для холодного об'ємного штампування.

І останнє, на що слід звернути особливу увагу, – це виконання аналізу напруженого стану деформованого інструменту. Тут за допомогою системи QForm користувач має можливість враховувати пружні деформації інструменту, поковки, що призводять до відхилення форми, від заданої, прогнозувати появу пластичної деформації в критичних зонах інструменту, що при великій кількості циклічних навантажень призводить до утворення тріщин (рис. 2.4).

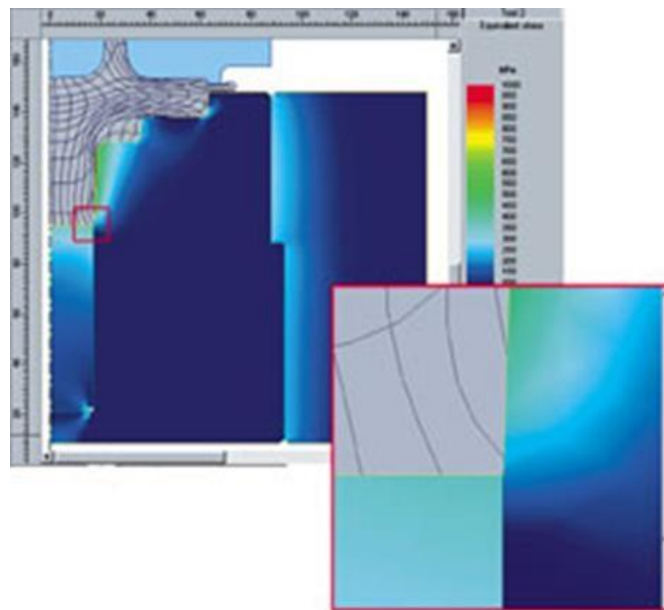


Рисунок 2.4 – Застосування складеного інструменту забезпечує зникнення пластичної зони [20]

Інформація по розподілу деформації також представляє інтерес для фахівця з термообробки. Проаналізувавши усі дані по накопиченій деформації, він може призначити які-небудь режими подальшої термообробки деталі, що особливо важливо для холодного об'ємного штампування.

Основним завданням QForm є заміна натурального експерименту комп'ютерним моделюванням. Технологу пропонується інструмент, за

допомогою якого він міг би проектувати штампи і поковки, проводити дослідження не виходячи в цех до штампу, а перебувати за комп'ютером, вивчаючи процеси пластичної деформації і вносити всі необхідні зміни.

QForm універсальний комплекс для математичного моделювання процесів обробки металів тиском. У програмі вдається поєднати унікальний інтерфейс з широкою функціональністю, завдяки цьому, моделювання стає легшим.

QForm поставляється з великою базою даних деформованих матеріалів, інструментальних матеріалів, обладнання та мастил. Завдяки всім цим особливостям, програма популярна не тільки серед дослідників, але і серед інженерів-технологів.

### 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вихідні данні наведені на рисунку 3.1, що відповідає гарячій штамповці видавлювання на механічному пресі.

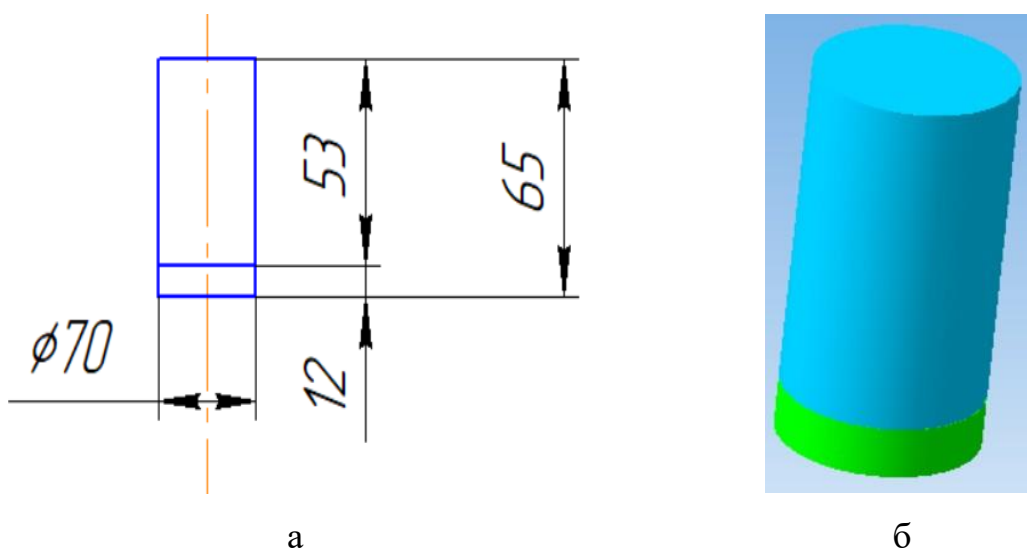


Рисунок 3.1 – Вихідна заготовка: а – ескіз біметалевої заготовки; б – 3D-модель заготовки.

Вихідна дані до розрахунку:

Механічний прес – 25 МН

Масило для верхнього і нижнього інструментів – машина олива і графіт.

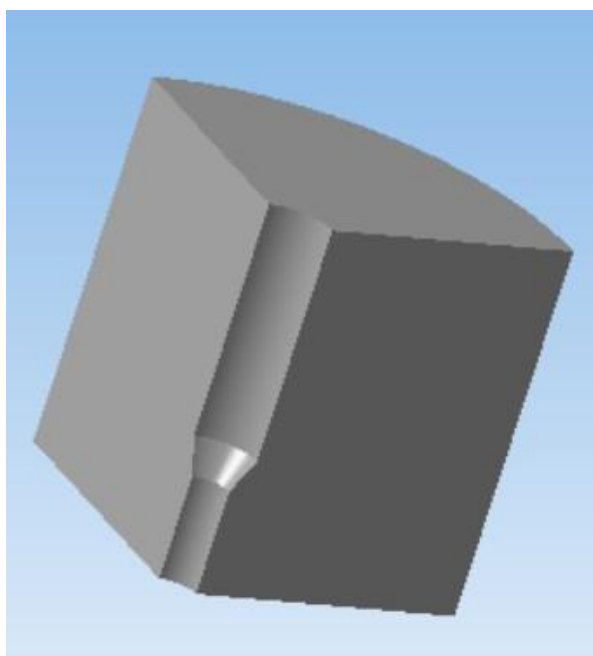
Матеріал інструменту – 5ХНМ Технологічні параметри процесу:

Температура інструменту і штампа – 100°C

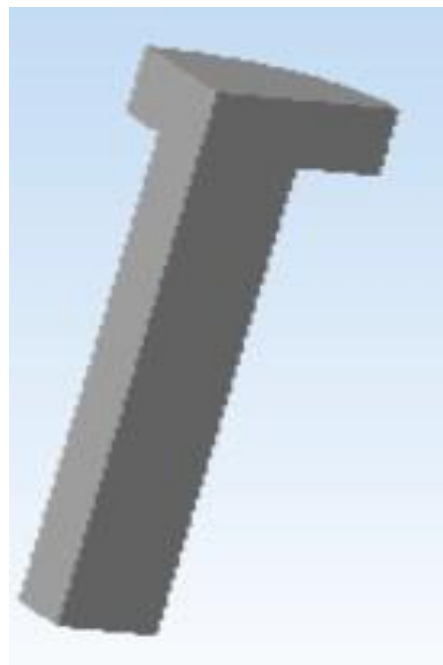
Час транспортування заготовки від печі до пресу – 3 с  
Час охолодження заготівки в штампі – 2 с

Кінцева відстань між інструментами – 5 мм

На першому етапі підготовки були створені моделі штампа і заготовки в програмному забезпеченні КОМПАС 3D V14 (рис.3.2).



а



б

Рисунок 3.2 – Отримання моделей для подальшого використання:

а – контейнер; б – пуансон;

На наступному етапі зберігаємо моделі у форматі \*.STEP або \*.IGES, після того відкриваємо в програмі QShape, яка розроблена для підготовки об'єктів геометрії для подальшого моделювання у QForm.

Геометричні моделі складаються з геометричних об'єктів, що відображають у вигляді структури у відповідних вікнах зображених на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Типи геометричних об'єктів в QShape

Об'єкти, наведені на рисунку 3.3, це - поверхні, ребра, ланцюжки і границі. У списку Faces знаходяться всі поверхні, з яких складається тіло. У Edges – ребра, NarrowFaces – вузькі поверхні, TinyEdges – малі ребра. Проводимо виправлення і видалення дрібних дефектів поверхонь.

Вибираємо об'єкт Shell і генеруємо сітку, після чого його поверхні розбиваються на трикутні кінцеві елементи В місцях де великий градієнт деформації, великий температурний градієнт, сітка автоматично подрібнюється. Після розбиття задаємо імена нашим об'єктам (рис. 3.4).

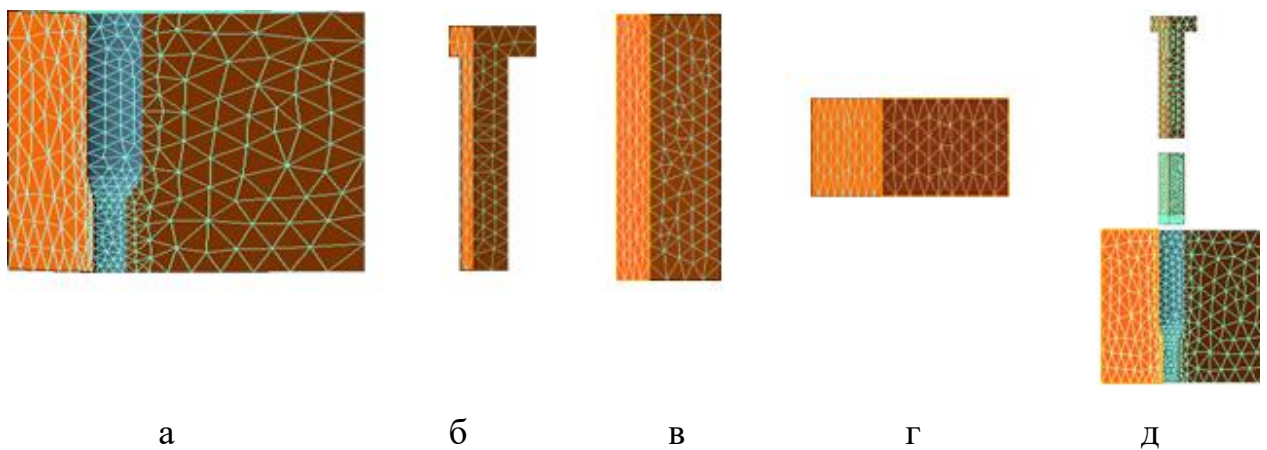


Рисунок 3.4 – Позиціонування об'єктів:

а – контейнер; б – пуансон; в – верхня деталь; г – нижня деталь; д – штамп

Для подальшого моделювання в QForm зберігаємо наш файл, з позиціонувати об'єктами, в форматі \*.SHL, призначений для моделювання деформації заготовки та розрахунку напружень в інструментах. На цьому підготовка необхідних даних завершена.

Головною задачею QForm є прогнозування також оптимізація процесів обробки металів тиском, натурного досвіду в комп'ютерний прогнозування.

Присутність підготовки початкових відомостей оперує тільки науково-технічні міркуваннями також контактує з концепцією в звичайному стилі конструктора-технолога, але Спеціаліст підготовки початкових відомостей у

порядку "проблема-відповідь" дає можливість стрімко також просто впровадити всі без винятку необхідні відомості з метою розрахунку.

QForm гарантує механічне розвиток обчислених модифікацій, то що дає можливість гарантувати значну достовірність розрахунку, ніяк не підходить з кваліфікації користувачів.

QForm – тільки одна програма прогнозування пресування профілів, яка розраховує загальну деформаційних проблему. Множинні індустріальні дослідження виявили, то що деформування приладу здатний породжувати області негативних також позитивних ухилів в окремих складових спочатку безпосереднього недеформованого паска, то що призводить до суттєвих змін в швидкості напрямки використаного матеріалу.



## 4 ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК КОМБІНАЦІЙ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БІМЕТАЛЕВОЇ ЗАГОТОВКИ

Розглянувши деякі комбінації металів при моделюванні процесу видавлювання біметалевої заготовки в програмі QForm, визначили вплив факторів гарячої деформації на перебіг процесу.

Під час розрахунків було виявлено поєднання, які неможливо утворити в заданій моделі деформування, а також поєднання, рекомендовані до виконання.

### 4.1 Важкоутворювані біметалеві сполучення

В ході роботи було проведено декілька дослідів, які показали що сприятливим для формоутворення біметалевої заготовки при видавлюванні є західний кут матриці, рівний  $60^\circ$ . При видавлюванні із кутом  $120^\circ$  спостерігаються значні мертві зони, які гальмують процес деформації.

Наведені технологічні схеми мають низку особливостей:

1. Матеріал верхньої частини заготовки Ст.45; матеріал нижньої частини заготовки М1; температура нагріву заготовки  $t=800^\circ\text{C}$ ; західний кут матриці  $120$  град.; температура нагріву інструменту  $t_{\text{інстр}}=100^\circ\text{C}$  (рис. 4.1).

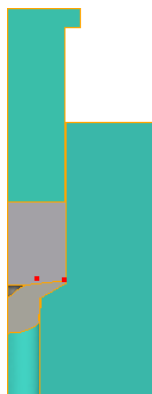


Рисунок 4.1 – Процес розшарування

2. Матеріал верхньої частини заготовки Д16; матеріал нижньої частини заготовки М1; температура нагріву заготовки  $t=500^{\circ}\text{C}$ ; західний кут матриці – 120 град (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Процес розшарування

3. Матеріал верхньої частини заготовки Ст.10; матеріал нижньої частини заготовки М1; температура нагріву заготовки  $t=900^{\circ}\text{C}$ ; західний кут матриці 60 град (рис. 4.3).

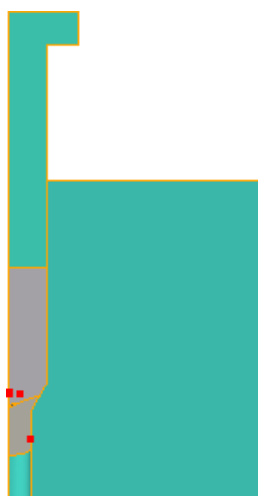


Рисунок 4.3 – Процес розшарування

Таблиця 4.1 – Варіанти комбінацій важкоутворюваних біметалевих сполучень

Варіанти	Матеріал верхньої частини	Матеріал нижньої частини	Західний кут матриці	t° нагріву заготовки	t° нагрів. інструменту
1	Ст 45	М1	120°	800°C	100°C
2	Ст 45	М1	120°	900°C	100°C
3	ХН75МБТЮ	М1	120°	900°C	100°C
4	Д16	М1	120°	500°C	100°C
5	Ст 45	Д16	60°	300°C	100°C
6	Ст 45	М1	60°	900°C	100°C
7	Ст 45	Д16	60°	300°C	100°C
8	40ХН2М2	М1	60°	950°C	100°C
9	Ст 10	М1	60°	900°C	100°C
10	Ст 10	Д16	60°	300°C	100°C
11	Ст 10	М1	60°	250°C	100°C

Рекомендовано виконувати західний кут матриці величиною 60 град. При великому західному куті (120 град.) спостерігаються зони застою, де метал заготовки значно вистигає. Було розглянуто комбінації твердого і м'якого металів, які при видавлюванні розшаровуються. Це пояснюється тим, що механічні характеристики міді та сталі, цілковито різні. Мідь більш пластична при вказаній температурі нагрівання і тече швидше, ніж вуглецева сталь. Центральні шари знаходяться під дією деформаційного розігріву і їхня пластичність вища, а зовнішні шари дещо охолоджуються через контакт з інструментом. Враховуючи таку схему деформації, відбувається розшарування металів біметалічної заготовки в передбачуваній зоні з'єднання. При комбінації міді з алюмінієм (4 варіант), виявили, що відбувається ковальське зварювання матеріалів при видавлюванні. Це пояснюється схожими механічними характеристиками матеріалів. Але процес повністю здійснити не вдалося через

геометричну модель штампу. Тому рекомендовано для такого варіанту з'єднання використовувати матрицю із меншим західним кутом та меншим відношенням діаметрів заготовки до готового виробу ( $D/d < 2$ ).

#### 4.2 Отримання шаруватих біметалевих заготовок видавлюванням

Під час проведення досліджень було виявлено комбінації матеріалів та рекомендовану геометрію штампового інструменту, які забезпечують утворення біметалевої заготовки.

Розглянемо, технологічні схеми деформації:

1. Матеріал верхньої частини заготовки Д16; матеріал нижньої частини заготовки М1; температура нагріву заготовки  $t = 500^\circ\text{C}$ ; західний кут матриці 60 град.; температура нагрівання інструмента  $t_{\text{інстр}} = 100^\circ\text{C}$  (рис. 4.4).

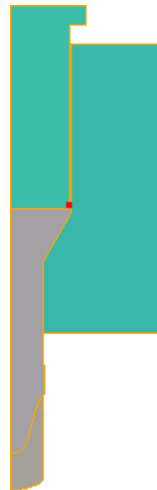


Рисунок 4.4 – Формоутворення біметалевої заготовки -  
комбінація Д16-М1

В зоні контакту заготівки з інструментом температура знижується через втрати тепла, на кінцевій частині заготівки спостерігаємо підвищення температури, що пояснюється високою теплопровідністю міді та деформаційним розігрівом (рис. 4.5).

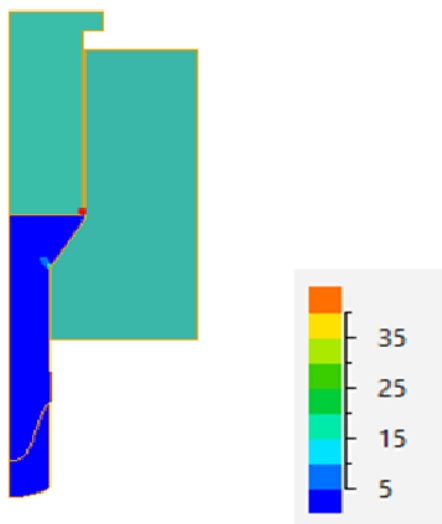


Рисунок 4.5 – Діапазон температур заготовки, комбінація Д16-М1

Швидкість деформації рівномірна, тільки в західній частини матриці спостерігаються деякі збільшення.

Пластична деформація відносно рівномірна, дещо знижена у зоні контакту пуансона з заготовкою, що характерно для даного процесу. В кінцевій частині заготівки пластична деформація також знижена – це пояснюється вистиганням заготівки (рис. 4.6).

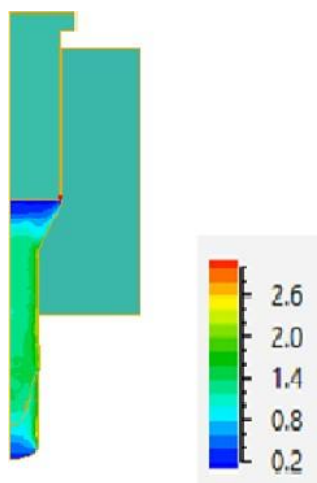


Рисунок 4.6 – Діапазон пластичної деформації, комбінація Д16-М1

Максимально інтенсивність напруження спостерігається в активній зоні деформації, що пояснюється збільшеною швидкістю деформації через градієнт

перерізів заготовки; в стрижневій частині заготовки – відносно рівномірно (рис. 4.7).

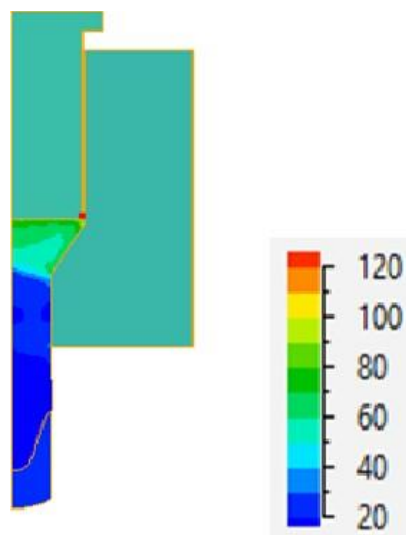


Рисунок 4.7 – Діапазон інтенсивності напруження, комбінація Д16-М1

В активній зоні деформації спостерігається напруження стиснення з характерними від'ємними значеннями. В стрижневій частині напруження змінюються на позитивні розтягуючі (рис. 4.8).

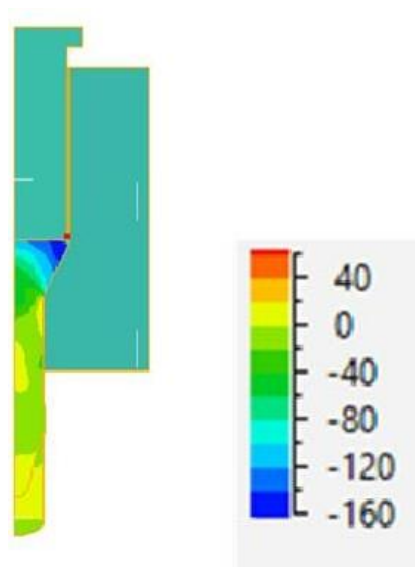


Рисунок 4.8 – Діапазон середньої напруга, комбінація Д16-М1

Аналізуючи розподіл вектора швидкості деформації, можна сказати, що у верхній частині заготовки (в активній зоні деформації) метал тече повільніше, а у стрижневій частині – швидше. Це пояснюється градієнтом перерізів заготовки (рис. 4.9).

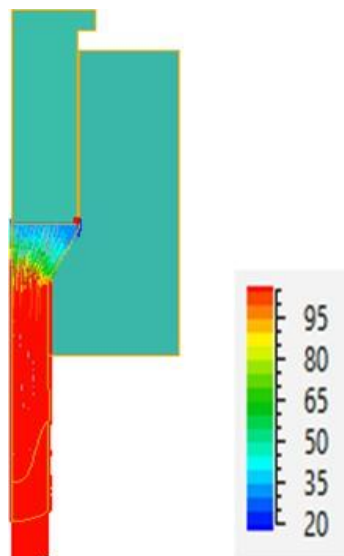


Рисунок 4.9 – Діапазон вектору швидкості, комбінація Д16-М1

В ході розрахунків, було обчислено розподіл температурного поля інструменту в зоні його контакту із нагрітою заготовкою. Температура інструменту  $100^{\circ}\text{C}$ , а температура заготовки –  $500^{\circ}\text{C}$ . У зоні контакту спостерігається теплообмін та деяке підвищення температури (рис. 4.10).

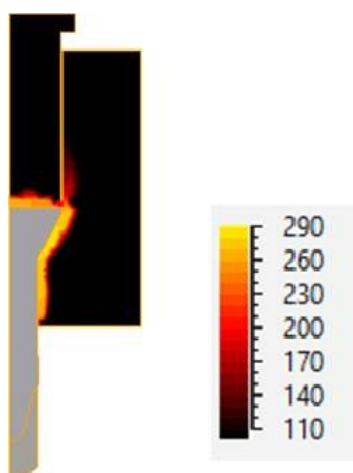


Рисунок 4.10 – Діапазон сумісного температурного поля заготовки та інструменту, комбінація Д16-М1

Було побудовано графік залежності зусилля деформації видавлювання від часу перебігу процесу (рис. 4.11). Максимальне зусилля деформації становит 0,506 МН і спостерігається в момент входження заготовки у західний отвір матриці.

Инструмент 1 - Усилие, МН

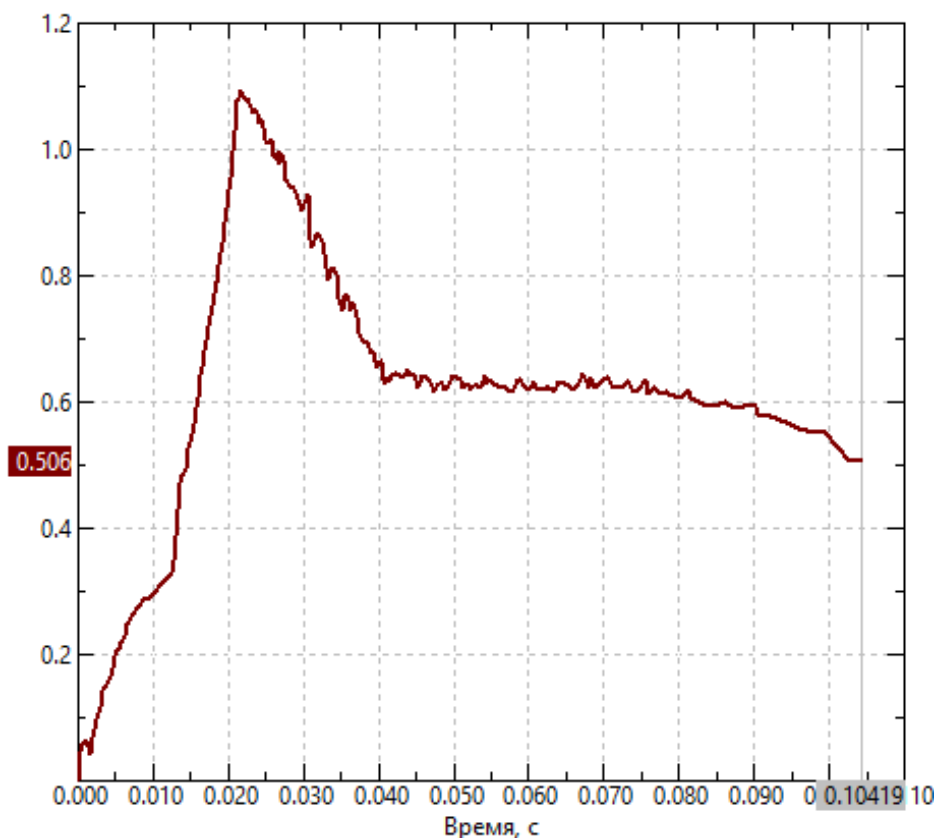


Рисунок 4.11 – Графік залежності зусилля деформації від часу, комбінація Д16-М1

1. Матеріал верхньої частини заготовки Mg; матеріал нижньої частини заготовки M1; температура нагріву заготовки  $t=250^{\circ}\text{C}$ ; температура нагрівання інструменту  $t_{\text{інстр}} = 80^{\circ}\text{C}$ ; західний кут матриці – 60 град (рис. 4.12).



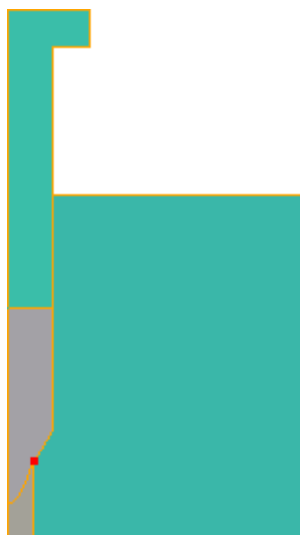


Рисунок 4.12 – Формоутворення біметалевої заготовки,  
комбінація Магній-М1

В зоні контакту заготовки,  $t_{\text{інст}}=60^\circ$ , а температура заготовки  $250^\circ\text{C}$ , йде теплообмін вниз на контактній заготовки, що пояснюється низькою теплопровідністю (рис. 4.13).

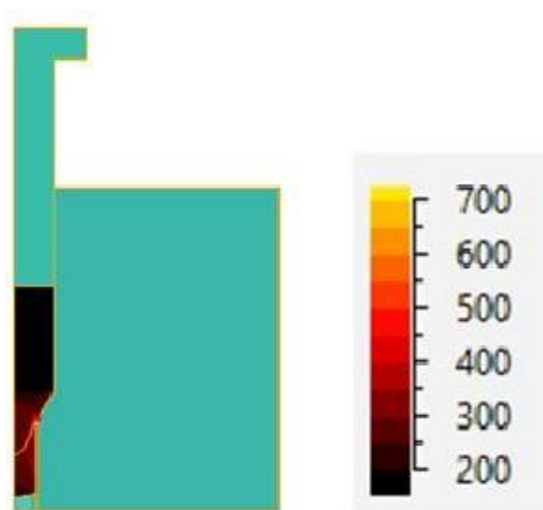


Рисунок 4.13 – Діапазон температури заготовки,  
комбінація Магній-М1

Швидкість деформації по всій заготівки рівномірна, тільки в західній частині кута спостерігається деякі зміни (500 МПа) (рис. 4.14).

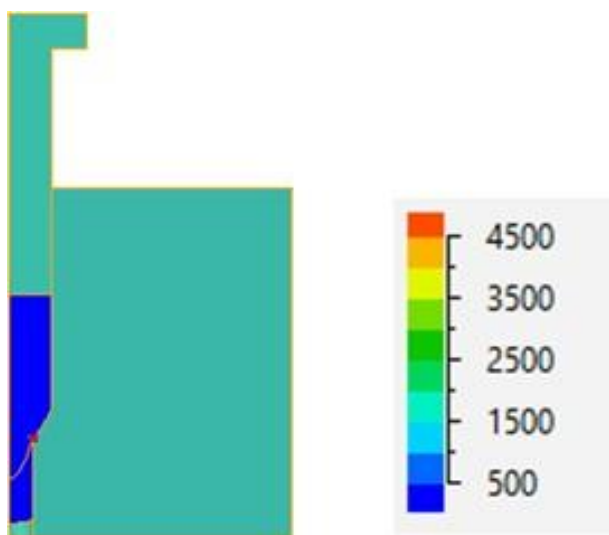


Рисунок 4.14 – Діапазон швидкості деформації,  
комбінація Магній-М1

Пластична деформація відносно рівна, але трішки збільшена в зоні взаємодії пуансона на заготовку, що не дуже характерно для цього процесу в кінцевій частині заготовки. Також визначили, що відбувається вистигання заготовки після деформації (рис. 4.15).

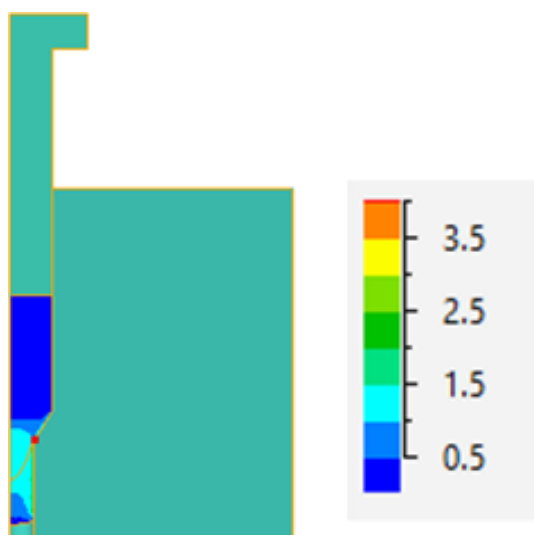


Рисунок 4.15 – Діапазон пластичної деформації,  
комбінація Магній-М1

В зоні заготовки спостерігається постійне зміння інтенсивність напруження 40-280 МПа (рис. 4.16).

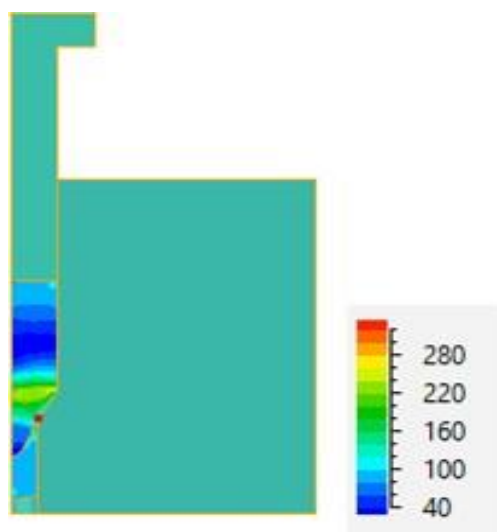


Рисунок 4.16 – Діапазон інтенсивного напруження, комбінація Магній-М1

В активній зоні деформації спостерігається стиснення із характерними позитивними значеннями порядку 500 МПа, а розтягування 100 МПа (рис. 4.17).

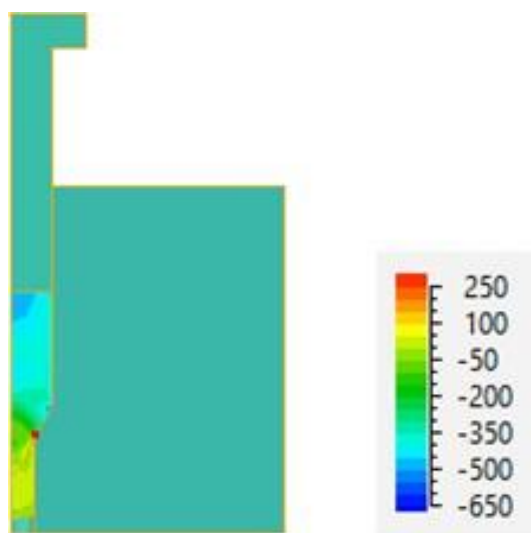


Рисунок 4.17 – середня напруга – діапазон, комбінація Магній-М1

В зоні деформації, спостерігаємо, підвищення швидкості витікання металу в стрижневій частини заготовки, в порівнянні із активної зони деформації (рис. 4.18).

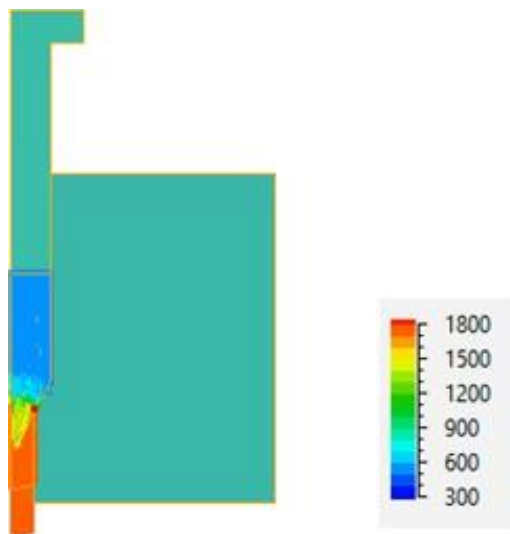


Рисунок 4.18 – вектор швидкості – діапазон, комбінація Магній-M1

В зоні контакту, при  $t_{\text{інстр}}=60^\circ$ , а при температури нагріву заготовки  $250^\circ\text{C}$ , відбувається збільшення температури (рис. 4.19).

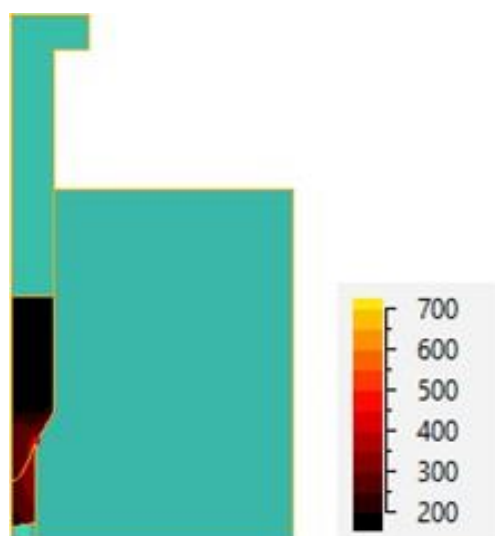


Рисунок 4.19 – Діапазон сумісного температурного поля заготовки та інструменту, комбінація Магній-M1

Було побудовано графік залежності зусилля деформації видавлювання від часу перебігу процесу (рис. 4.20). Максимальне зусилля деформації становить 0,0500 МН і спостерігається в момент входження заготовки у західний отвір матриці

Инструмент 1 - Усилие, МН

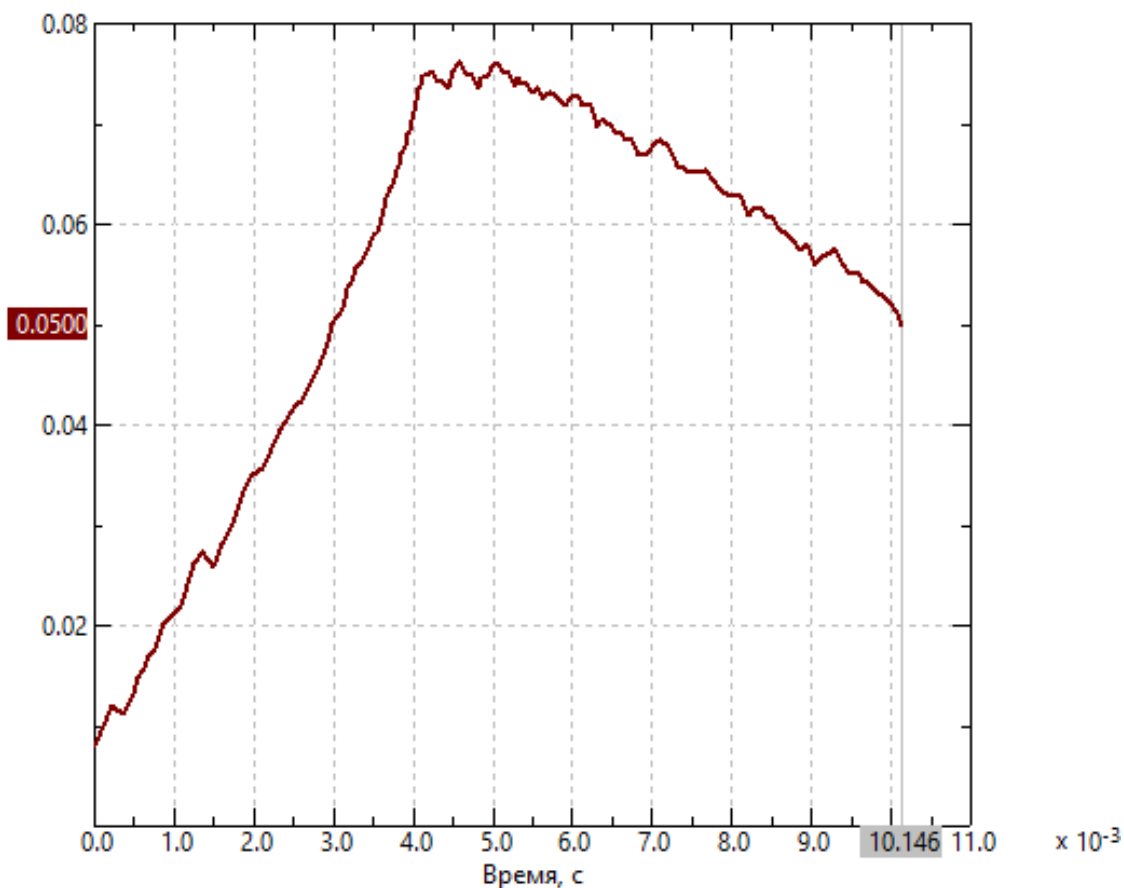


Рисунок 4.20 – Графік залежності зусилля деформації від часу, комбінація Магній-М1

3.Матеріал верхньої частини заготовки М1;

Матеріал нижньої частини заготовки нікелевий сплав (НПА1);

Температура нагріву заготовки  $t=950^{\circ}\text{C}$ ;

Температура нагрівання інструмента  $t_{\text{інст}} = 100^{\circ}$ ; Західний кут матриці  $60^{\circ}$  (рис. 4.21).



Рисунок 4.21 – Формоутворення біметалевої заготовки,  
комбінація мідь (М1) – нікелевий сплав (НПА1)

В зоні контакту заготовки відбувається збільшення температури, тому в стрижневій частині заготовки температура збільшується, це пояснюється тим, що метал тече швидше (рис. 4.22).

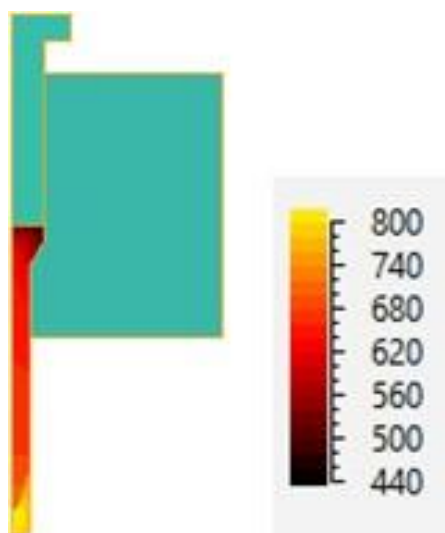


Рисунок 4.22 – Діапазон температури заготовки, комбінація мідь (М1) -  
нікелевий сплав (НПА1)

Швидкість деформації по всій заготовці рівномірна, і становить близько 10 мм/с (рис. 4.23).

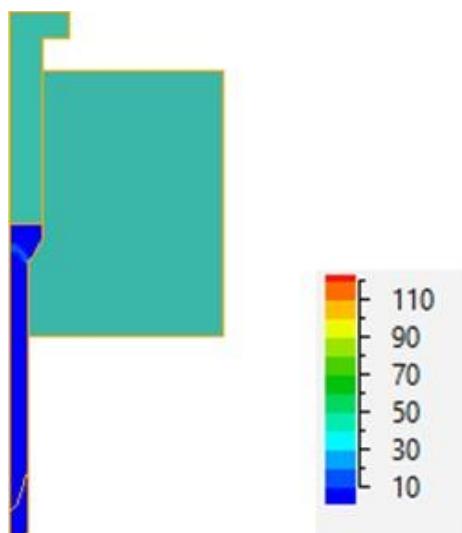


Рисунок 4.23 – Діапазон швидкості деформації, комбінація мідь (М1) – нікелевий сплав (НПА1)

В зоні контакту пуансона із заготовкою, спостерігається дещо менші значення пластичної деформації (0,2 МПа) в порівнянні із західної частини матриці (2,0 МПа), де саме відбувається інтенсивність деформації (рис. 4.24).

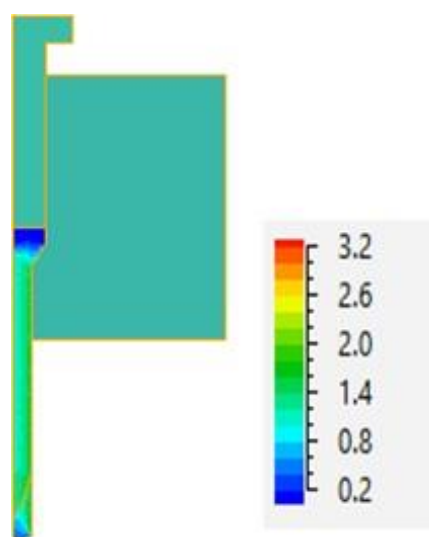


Рисунок 4.24 – Діапазон пластичної деформації, комбінація мідь (М1) - нікелевий сплав (НПА1)

В стрижневій частині заготовки інтенсивність напруження відносно рівномірна і становить 20 МПа. В активній зоні деформації інтенсивність напруження становить 50...110 МПа (рис. 4.25).

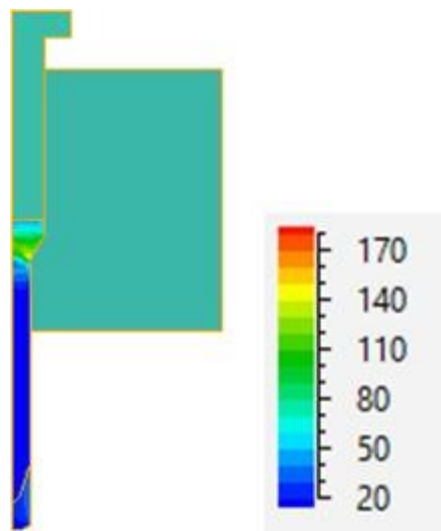


Рисунок 4.25 – Діапазон інтенсивності напруження, комбінація мідь (М1) – нікелевий сплав (НПА1)

В активній зоні деформації спостерігається напруження стиснення із характерними позитивним значеннями (рис. 4.26).

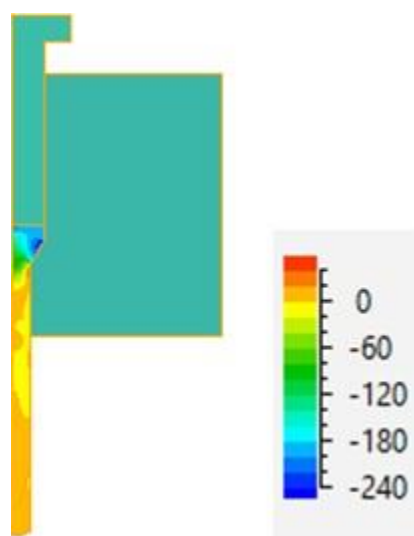


Рисунок 4.26 – Діапазон середньої напруги, комбінація мідь (М1) – нікелевий сплав (НПА1)



В активній зоні деформації метал тече повільно, а в стрижневій частині швидкість збільшена, що пояснюється градієнтом перерізу (рис. 4.27).

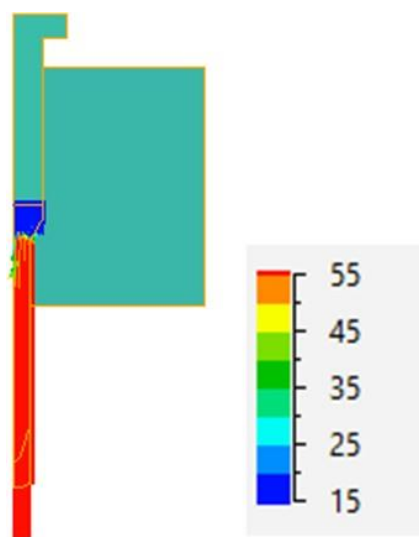


Рисунок 4.27 – Діапазон вектора швидкості, комбінація мідь (M1) – нікелевий сплав (НПА1 температура  $t_{\text{інстр}}=100^{\circ}\text{C}$ , а температур заготовки  $950^{\circ}\text{C}$

В зоні контакту заготовки відбувається збільшення температури (рис. 4.29).

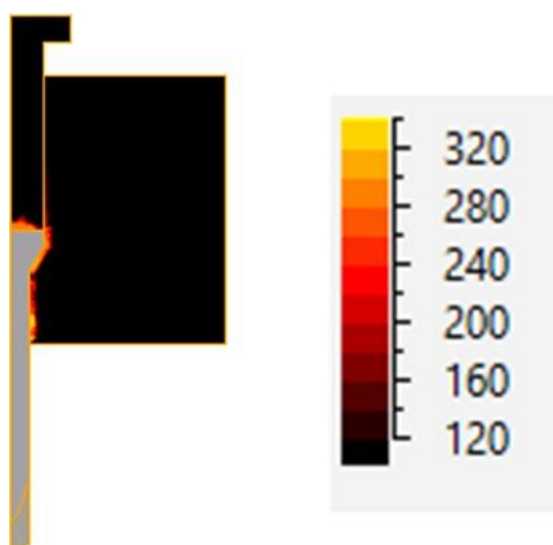


Рисунок 4.29 – Діапазон сумісного температурного поля заготовки та інструменту, комбінація мідь (M1) – нікелевий сплав (НПА1)

Було побудовано графік залежності зусилля деформації видавлювання від часу перебігу процесу (рис. 4.30). Максимальне зусилля деформації становить 0,02211 МН і спостерігається в момент входження заготовки у західний отвір матриці.

Инструмент 1 - Усилие, МН

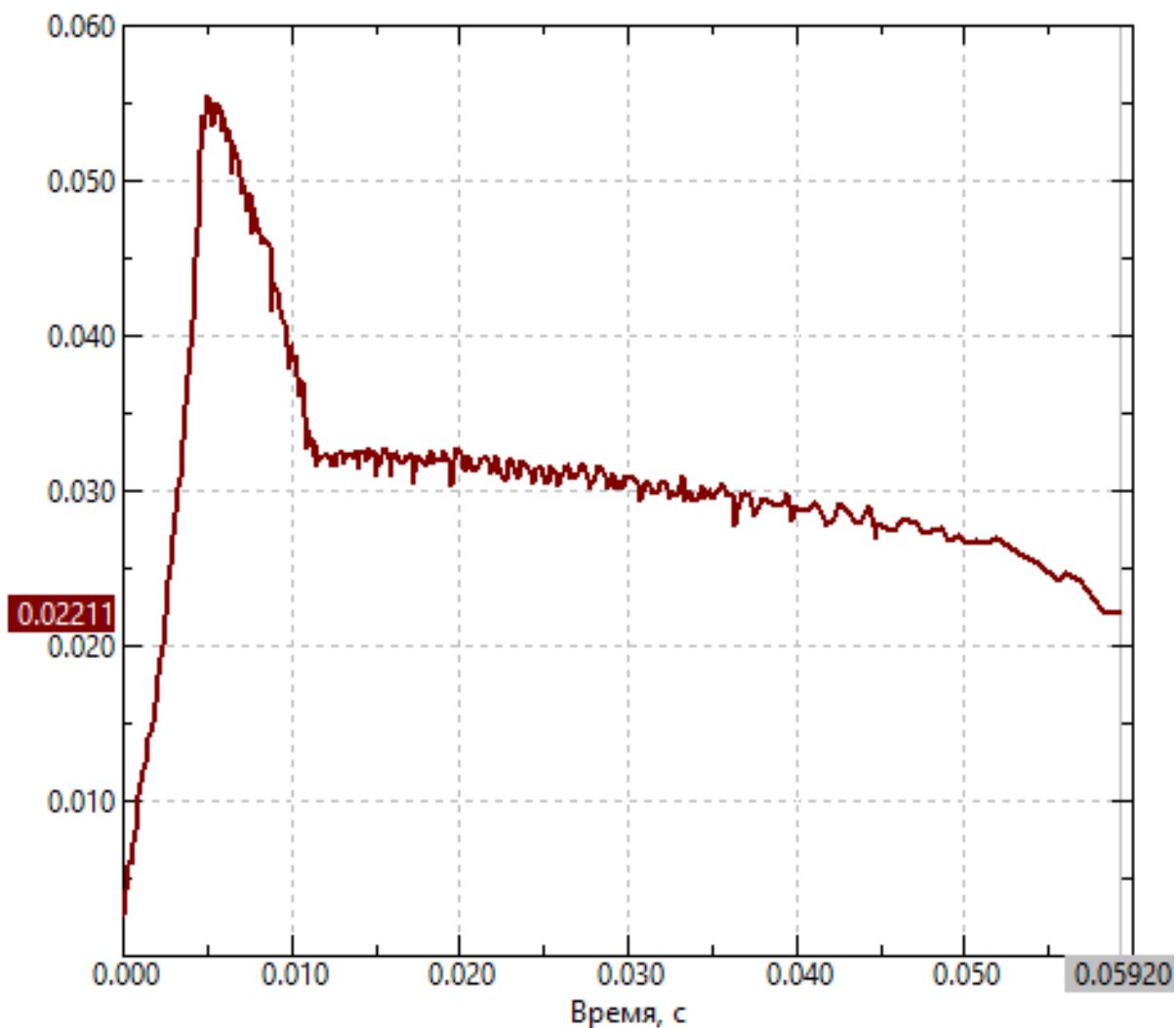


Рисунок 4.30 – Графік залежності зусилля деформації від часу, комбінація мідь (М1) – нікелевий сплав (НПА1)

В таблиці 4.2. наведені варіанти комбінації матеріалів для отримання біметалевих матеріалів.

Таблиця 4.2 – Варіанти комбінації матеріалів для отримання біметалевої заготовки видавлюванням

Варіанти	1	2	3
Матеріал верхньої частини	Д16	Mg	M1
Матеріал нижньої частини	M1	M1	Ni
Західний кут матриці	60°	60°	60°
t° нагріву заготовки	500 °	250°	950°
t° нагрівання інструмента	100°	80°	100°

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Проведено класифікацію біметалів та розглянуто існуючі способи виробництва заготовок.
2. Визначено деякі комбінації металів, які придатні для створення шаруватої біметалевої видавленої заготовки.
3. Здійснено прогнозування та оптимізацію процесу формування шаруватої біметалевої заготовки.
4. Запропоновані рекомендації для процесу деформації:
  - західний кут матриці має становити  $60^\circ$ ;
  - відношення діаметрів заготовки до видавленої деталі  $D/d \leq 1,7$ ;
  - рекомендовано наступні поєднання матеріалів - алюміній – мідь (та їх сплави), магній – мідь (та їх сплави), нікель – мідь (та їх сплави).
5. Встановлено, що максимальна зносостійкість досягається за рахунок застосування спеціальної технології виробництва, яка передбачає повну автоматизацію процесу наплавлення, що дозволяє контролювати основні його параметри.
6. Створено моделі штамп, пуансона і заготівки в програмному забезпеченні КОМПАС 3D.
7. Спроектовано збірний штамп.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Що таке біметал де він застосовується? [Електронний ресурс]. - Промисловість. Режим доступу:<https://fb.ru/article/426779/chto-takoe-bimetall-i-gde-primenyetsya>
2. Голованенко С. А. Виробництво біметалів. Метод отримання біметалів: навч. вид. / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров: за заг. ред. Р. М. Голубчик. Москва: вид. Металургія, 1966. 303 с.
3. Макаровська С. В. Біметали, застосування в машинобудуванні/ С. В. Макаровська, А. Перевозніков, К. Сьомін // індив. проект. Іркутськ: 2016. С. 5 – 6.
4. Застосування біметалів. [Електронний ресурс]. Технології. Режим доступу: <http://him-apparat.ru/bemetall/>
5. Сиротенко Л. Д. Застосування біметалічних матеріалів машинобудування. / Л. Д. Сиротенко, Є. С. Шликов, Т. Р. Абляз // Електронний науковий журнал. Сучасні проблеми науки та освіти. 2015, № 2 частина 1.
6. Біметалічні листи, біметалічні стрічки. [Електронний ресурс]. Біметал. Режим доступу:<http://www.supplysteel.ru/bimetall.php>
7. Енциклопедія з машинобудування XXL. Виробництво біметалів. [Електронний ресурс]. Москва: Велика ріс. Енциклопедії. 1967. Режим доступу: <https://mash-xxl.info/info/57132/>
8. Технологія пресування. Пресування металів. [Електронний ресурс]. - Машинобудування. Режим доступу: <http://gk-drawing.ru/line-module/metalworking/metals-pressing.php>
9. Стаття про метал. Чорна металургія. [Електронний ресурс]. - Видавлювання металу. 2015. Режим доступу: <http://metall4all.ru/articles/chernaya-metallurgiya/vydavlivanie-metalla/>

10. Охріменко Я. М. Технологія ковальсько-штампувального виробництва. Штампування видавлюванням: підручник для вузів/Я. М. Охріменко. Вид. 2-ге, перероб. та дод. Москва: Машинобудування, 1976. 560 с.
11. Сторожев М. В. Теорія обробки металів тиском. Видавлювання: підручник для вузів/М. В. Сторожев, Є. А. Попов. Вид. 4-те, Москва: Машинобудування, 1977. 423 с.
12. Брюханов А. М. Кування та об'ємне штампування. Особливості штампування на кривошипних гарячештампувальних пресах: навчальний посібник для машинобудівних вузів. / О.М. Брюханов. - Вид. 4-те, перероб. та дод. Москва: Машинобудування, 1975. 408 с.
13. Товарознавство. Отримання біметалів ЗМД. [Електронний ресурс]. Прокат біметалічних матеріалів у гарячому стані. Режим доступу: [https://studbooks.net/1422105/tovarovedeni/poluchenie\\_bimetallov](https://studbooks.net/1422105/tovarovedeni/poluchenie_bimetallov)
14. Технічна енциклопедія. Біметали. [Електронний ресурс]. Додатковий Том. 1936. Режим доступу: <https://azbukametalla.ru/entsiklopediya/b/bimetally.html>
15. Дія Г. І. Інноваційні технології інтенсивної пластичної деформації / Г. І. Дія, Ш. Г. Берскі, К. С. Сехман // Моделювання процесу видавлювання біметалічних заготовок AL-CU через кутовий канал. Інститут обробки металів тиском та інженерії безпеки. Польща. 2015. с. 685-689
16. Медведєв Є. Б. Особливості формозміни оболонки біметалевого електрода свічки запалювання ДВЗ, отриманого прямим видавлюванням із заготовки з поперечною шаруватістю / Є. Б. Медведєв, О. М. Абрамов, А. Є. Медведєв // Ковальське штампувальне виробництво. 2008. №12, с. 43-47