

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій»

(повне найменування кафедри)

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Розробка технології плакирування вибухом для отримання  
циліндричних біметалевих катодів»

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи ІФ-412м

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Технології та устаткування зварювання»

КУЛІШ Є.Д.

(прізвище та ініціали)

 21.12.2023


Керівник БІЛОНІК І.М.

(прізвище та ініціали)

 21.12.23

Рецензент МІТЯЄВ О.А.

(прізвище та ініціали)


 21.12.23

2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інженерно-фізичний факультет  
Кафедра «Інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій»  
Ступінь вищої освіти магістр  
Спеціальність 131 Прикладна механіка  
(код і найменування)  
Освітня програма (спеціалізація) «Технології та устаткування зварювання»  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

  
Завідувач кафедри ІТЗ та МК  
**О.С. КАПУСТЯН**

« 15 » грудня 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТА(КИ)

КУЛІЩА Євген Даниловича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка технології плакирування вибухом для отримання циліндричних біметалевих катодів  
керівник проєкту доцент, кандидат технічних наук, БІЛОНИК Ігор  
Методійович,

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові.)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р. №\_\_

2. Строк подання студентом проєкту \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Креслення виробу, матеріал виробу, умови експлуатації
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)





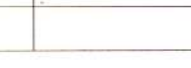

1. Стан питання. Електроімпульсна технологія. Плакування вибухом
2. Конструкція біметалевого циліндричного катоду
3. Технологія плакування вибухом
  - 3.1. Очищення кумулятивним струменем
  - 3.2. Підготовка поверхні. Ультразвукове очищення
  - 3.3. Визначення технологічних параметрів виробництва
4. Структура зварного з'єднання
5. Контроль якості
6. Охорона праці, довкілля та заходи щодо цивільної оборони

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Конструкція біметалевого циліндричного катоду. Технічні умови. Матеріал.
-


2. Технічна сутність процесу зварки вибухом
3. Технологія плакування вибухом. Підготовка поверхні.
4. Визначення технологічних параметрів виробництва.
5. Структура зварного з'єднання.
6. Контроль зварного з'єднання ультразвуком.

6. Консультанти розділів проекту


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5	Білоник І.М., доцент, к.т.н.		
6.	Нестеров О.В.		
НК	Корнієнко Д.Б. старший викладач		 21.12

7. Дата видачі завдання «23» жовтня 2024 року.


### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз вихідних даних	24.10.23	
2	Електроімпульсна технологія плакування	5.11.23	 Викорано.
3	Плакування вибухом. Зварка вибухом	10.11.23	
4	Розробка технології плакування вибухом. Визначення технологічних параметрів виробництва.	15.11.23	
5	Аналіз структури зварного з'єднання	25.11.23	
6	Контроль зварного з'єднання ультразвуком	28.11.23	
7	Охорона праці	13.12.23	
8	Виконання креслень та додатків	15.12.23	

Студент(ка)

 21.12.2023. Євген КУЛШІ  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту

 Ігор БІЛОНІК  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## ВСТУП

У сучасному індустріальному виробництві високовольтного електрообладнання велике значення приділяється вибору та оптимізації матеріалів для електродів. Одним із перспективних напрямків у цьому відношенні є використання біметалевих циліндричних катодів, які дозволяють покращити робочі характеристики високовольтного електрообладнання та забезпечити його довговічність.

У біметалевому матеріалі поєднуються властивості, які неможливо отримати в окремо взятому металі або сплаві. У металургійній промисловості використовуються різноманітні методи створення такої металопродукції. Існує чотири основні способи виготовлення біметалів: наплавлення, зварювання вибухом, лиття та обробка тиском, яка включає деякі способи волочіння, пресування, і прокату.

У даному дослідженні розглядається технологія плакування вибухом, що виявляється ефективним методом для отримання біметалевих циліндричних катодів. Використання вибухових технологій у синтезі матеріалів для акумуляторів дозволяє отримати високоякісні покриття з високим ступенем адгезії до основи, що сприяє підвищенню стабільності та провідності катодів.

Обґрунтування вибору даного методу та вивчення його впливу на структуру та властивості отриманих біметалевих циліндричних катодів є актуальним завданням, яке сприятиме подальшому розвитку електрохімічних систем і покращенню їхньої продуктивності. В результаті дослідження можливо отримати не лише нові наукові знання, але й конкретні рекомендації для вдосконалення виробничих процесів у сфері енергетичних технологій.

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 86 аркуша.; 2 таблиці; 71 джерел; 24 рисунків.

КАТОД, ПЛАКУВАННЯ ВИБУХОМ, ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНА ТЕХНОЛОГІЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ТЕХНОЛОГІЯ, СВАРНЕ З'ЄДНАННЯ, ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ.

Об'єкт дослідження – розробка технології плакирування вибухом для отримання циліндричних біметалевих катодів.

Мета дипломної роботи – розробити технологію плакирування вибухом для отримання циліндричних біметалевих катодів.

Розроблено технологічний процес плакирування вибухом циліндричного біметалевого катоду. Визначена кількість заряду та підібрана технологічна оснастка для плакирування вибухом.

У ході дипломного проекту було також здійснено: аналіз сучасних методів плакування деталей (електроімпульсна технологія: електрогідравлічна та електромагнітна, плакування вибухом). Оглянута конструкція біметалевого циліндричного катоду, технічні умови, матеріали. Ретельно розглянута технологія плакування вибухом для отримання біметалевого циліндричного катоду. Виконано дослідження структури зварного з'єднання.

Виконані: плакати по аналіз сучасних методів плакування деталей, розроблена технологія плакирування вибухом для отримання біметалевого циліндричного катоду.

## ABSTRACT

EN: 86 sheets.; 2 tables; 71 sources; 24 drawings.

CATHODE, EXPLOSION PLATING, ELECTRO-IMPULSE TECHNOLOGY, ELECTROMAGNETIC TECHNOLOGY, WELDED CONNECTION, ELECTRO-HYDRAULIC TECHNOLOGY.

The object of the research is development of an explosion cladding technology to produce cylindrical bimetallic cathodes.

The aim of the diploma work is to develop the explosion cladding technology for obtaining cylindrical bimetallic cathodes.

A technological process of explosion plating of a cylindrical bimetallic cathode has been developed. The amount of charge is determined and the technological equipment for blast plating is selected.

In the course of the diploma project, the following was also carried out: analysis of modern methods of cladding parts (electro-pulse technology: electro-hydraulic and electromagnetic, explosion cladding). The design of the bimetallic cylindrical cathode, technical conditions, materials were reviewed. The explosion plating technology for obtaining a bimetallic cylindrical cathode is carefully considered. A study of the structure of the welded joint was carried out.

Completed: posters on the analysis of modern methods of plating parts, developed explosion plating technology for obtaining a bimetallic cylindrical cathode.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
Реферат .....	4
Abstract .....	5
Зміст.....	6
Перелік скорочень .....	7
1. Стан питання.....	8
1.1 Електрогідравлічна технологія.....	9
1.2 Електромагнітна технологія.....	14
1.3 Плакування вибухом.....	15
1.4 Мета та завдання роботи .....	31
2 Конструкція біметалевого циліндричного катоду .....	31
3 Технологія плакування вибухом.....	33
3.1 Очищення кумулятивним струменем .....	33
3.2 Підготовка поверхні. Ультразвукове очищення .....	35
3.3 Визначення технологічних параметрів виробництва.....	37
3.4. Схема підготовки .....	46
4 Структура зварного з'єднання .....	48
4.1 Схема відбору зразків .....	48
4.2 Дослідження макроструктури зварних з'єднань.....	49
4.3 Мікроструктура та твердість зварного з'єднання.....	51
5 Контроль якості .....	55
5.1 Область застосування й основні види НМК.....	55
5.2 Контроль зварного шву ультразвуковим методом .....	59
6 Охорона праці.....	62
Висновки .....	79
Перелік джерел посилань .....	80

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВР – вибухова речовина

ЕМС – електромагнітна сила

ЗШ – зварювальний шов

МНК – методи неруйнуючого контролю

НШЗ – навколошовна зона

УЗК – ультразвуковий контроль

УСГ – ударно стиснутий газ

## 1 СТАН ПИТАННЯ

У вітчизняній та зарубіжній промисловості все ширше застосовують методи листового штампування, засновані на використанні енергії вибуху бризантних речовин, пороху та вибухових газових сумішей, електричних розрядів у рідині, імпульсного електромагнітного поля та інших імпульсних енергоносіїв, які відносяться до нових і основних методів удосконалення заготівельно-штампувальних цехів у виробництві літальних апаратів та їх двигунів.

Високошвидкісна обробка металів з використанням імпульсних навантажень набуває все більшого поширення в області плакування, листового штампування та штампування тонкостінних деталей з труб завдяки ряду основних переваг високошвидкісного деформування: відсутність пружності при обробці більшості важкодеформуємих матеріалів; збільшення межі міцності деяких металів майже на 50% та збільшення межі плинності ряду сталей при стисканні майже на 300%; підвищене зміцнення порівняно з холодною прокаткою за однакового ступеня деформації; підвищена точність виготовлення деталей, які економічно не вигідно чи фізично неможливо формувати іншими методами [1].

Відмінною рисою високошвидкісних методів штампування є також те, що при їх застосуванні відпадає потреба в пресовому устаткуванні, яке потрібно при здійсненні будь-яких методів штампування. Як технологічне оснащення тут необхідна лише матриця або пуансон, а роль частини штамп у відповідь, зокрема, грає передавальне середовище, в якому проводиться вибух і через яку енергія вибуху у вигляді ударної хвилі впливає на заготівлю, деформуючи її за формою інструменту (пуансона або матриці). Такий технологічний процес універсальний і для нього не потрібна тривала підготовка виробництва, тому високошвидкісні високоенергетичні способи

застосовуються для штампування деталей, виготовлення яких іншими методами при дослідному та дрібносерійному виробництві недоцільно.

Існує декілька способів електроімпульсного плакування [2]:

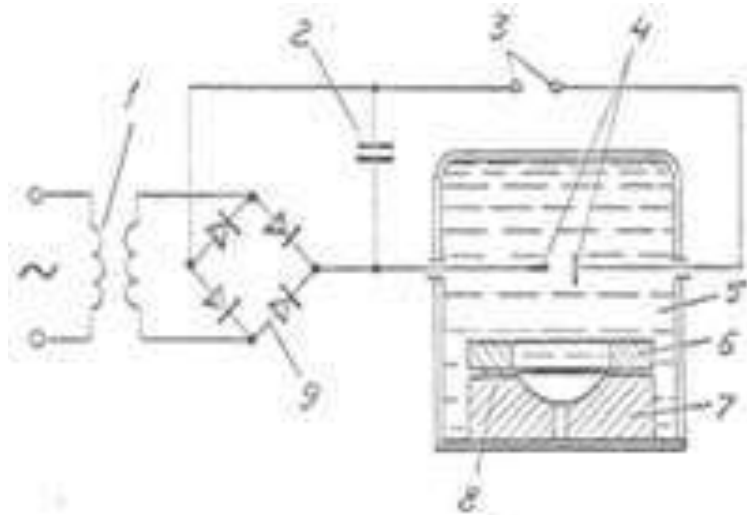
- електрогідравлічне плакирування;
- електромагнітне плакирування;
- плакирування вибухом або сварка вибухом.

### 1.1 Електроімпульсна технологія. Електрогідравлічне плакирування

Електроімпульсна технологія штампування успішно використовується не тільки для формування деталей електроімпульсним способом, а й для плакирування. Цей процес характеризується потужним короткочасним електричним розрядом в рідкому середовищі, яка створює ударну хвилю, що впливає на заготовку.

На рисунку 1.1.1 показано схему установки для електрогідравлічного штампування (плакирування).

Змінний струм трансформується в струм вищої напруги, потім пропускається через випрямляч 9 і потрапляє в так званий розрядний контур, що складається з конденсаторів 2 і іскрового робочого зазору між електродами 4, що знаходяться в резервуарі 5 з водою. Як тільки на конденсаторах досягається потенціал певної величини, відбувається пробій зазору у повітряному розряднику 3 і накопичена в конденсаторах електроенергія дуже швидко виділяється у вигляді іскрового розряду в робочому зазорі між електродами. Потужний іскровий розряд подібний до вибуху. В результаті розряду в рідині виникає ударна хвиля, яка, дійшовши до заготовки 8, утримуваної кільцем притискним 6, надає на неї силовий вплив і здійснює деформування заготовки по матриці 7.



1 - трансформатор; 2 - конденсатор; 3 - повітряний розрядник; 4 - іскровий робочий зазор; 5 – резервуар; 6 - кільце притискне; 7 – матриця; 8 – заготовка; 9 – випрямляч.

Рисунок 1.1.1 - Схема установки для електрогідравлічного штампування (плакирування) [2]

Якщо для повного деформування заготовки одного імпульсу недостатньо, то робочий цикл може бути повторений. Як і при штампуванні вибухом, під заготівлею в порожнині матриці створюється вакуум. Електрогідравлічне штампування застосовується на багатьох операціях листового штампування для виготовлення таких невеликих та середніх розмірів (до 1000-1500 мм, товщиною до 3 мм) деталей, як різні елементи жорсткості, окантовки, напівпатрубки, закінцівки, обичайки, обтічники і т.д.

Процес відрізняється імпульсним характером та високою швидкістю застосування навантаження. Конденсатори розряджаються протягом 40-50 мксек. і виділяють електроенергію величезної потужності, що обчислюється мільйонами джоулів на секунду; у робочому проміжку розрядника виникають тиски, рівні сотням МПа; ударна хвиля, що розповсюджується в рідині з високою швидкістю, несе в собі велику енергію, частина якої витрачається на корисну роботу деформування.

З точки зору фізичної сутності силового впливу на заготовлю електрогідравлічне штампування аналогічне штампування вибухом у воді. Змінювати форму ударної хвилі в цьому випадку можна шляхом зміни взаємного розташування електродів і застосування так званої ініціюючої тяганини, яка з'єднує електроди в робочому зазорі розрядника. Залежно від того, застосовується або не застосовується ініціююча тяганина, електрогідравлічне штампування поділяється на два способи [3-4].

Метод електрогідравлічного плакирування є найбільш перспективних серед методів плакирування найбільш привабливим.

Порівняно з традиційними методами обробки металів тиском електрогідравлічне плакирування має такі переваги:

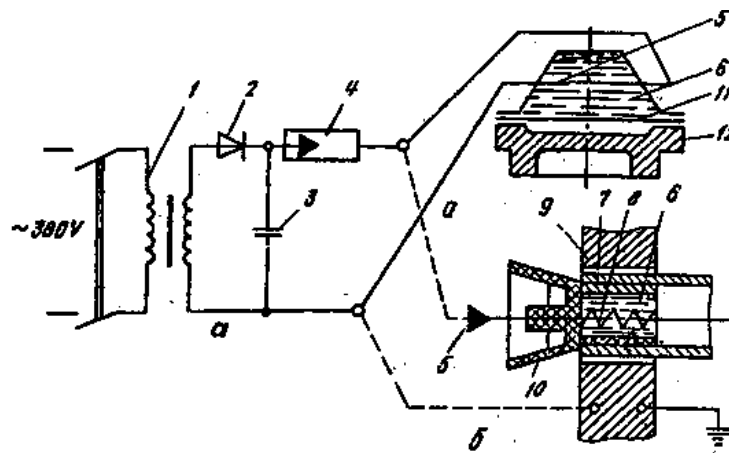
- спрощується та здешевлюється технологічне оснащення, що сприяє скороченню термінів технологічної підготовки виробництва та зменшенню витрат на освоєння нових виробів;
- підвищується точність деталей, що штамнуються, через зменшення пружнення і збільшення швидкості деформування;
- з'являється додаткова можливість поєднання ряду операцій, що виконуються в одному штампі;
- збільшується гранична глибина штампування та критичний ступінь деформації через локалізації впливу та високих швидкостей деформування; розширюються технологічні можливості процесу.

З точки зору фізичної сутності силового впливу на заготовлю електрогідравлічне штампування аналогічне штампування вибухом у воді. Змінювати форму ударної хвилі в цьому випадку можна шляхом зміни взаємного розташування електродів і застосування так званої ініціюючої тяганини, яка з'єднує електроди в робочому зазорі розрядника.

Якщо електроди з'єднані дротиком [5], то при розряді компенсаторів внаслідок великої потужності енергії, що виділяється, «вибухає» тяганина, по якій проходить струм в кілька тисяч ампер, і перетворюється на пару за час, що обчислюється мікросекундами. При цьому вздовж осі дроту виникає

газовий канал з величезним тиском, що зумовлює миттєве розширення парів і виникнення потужної ударної хвилі, яка аналогічна хвилі, що виникає при підриві заряду лінійної форми. Дріт, що вибухає, дає можливість керувати напрямком і формою ударної хвилі. Застосування ініціаторів розряду у вигляді тяганини (з алюмінію, вольфраму, танталу та інших металів) дозволяє, крім того, у кілька разів зменшити робочу напругу [5]. Але слід зауважити, що підключення тяганини до електродів подовжує робочий цикл.

Сутність електрогідравлічного ефекту полягає в тому, що при високовольтних імпульсних розрядах рідини створюються потужні гідравлічні тиски. Ультразвукові явища, що при цьому виникають, можуть бути використані для різних технологічних цілей і, в першу чергу, для штампування складних деталей з високоміцних матеріалів. Принципові схеми електрогідравлічного штампування та розвальцювання труб показані на рис. 1.1.2.



(а) електрогідравлічне штампування

(б) розвальцювання труб

1 – трансформатор; 2 – випрямляч; 3 – конденсаторна батарея; 4 – формуючий проміжок; 5 – електроди; 6 – рідина; 7 – труба; 8 – провідник; 9 – трубна дошка; 10 – патрончик; 11 – заготовка; 12 – матриця

Рисунок 1.1.2 - Принципова схема електрогідравлічного штампування (а) та розвальцювання труб (б) [5]

За допомогою автотрансформатора та високовольтного трансформатора 1, що живляться від мережі змінного струму, напруга через випрямляч 2 подається на конденсаторну батарею 3. Накопичена енергія, завдяки пробною формуючого проміжку 4 при заданій напрузі, виділяється в робочому проміжку між двома електродами 5.

Залежно від потужності трансформатора час зарядки конденсаторів - може бути від десяти часток секунди до десятків секунд. У цьому час розряду вимірюється мікросекундами. У зв'язку з цим процес набуває характеру вибуху. При порівняно невеликій потужності генератора імпульсних струмів у каналі розряду виникають високі температури (десятки тисяч градусів) та гідравлічні тиски до десятків тисяч атмосфер.

При цьому можливий безпосередній пробій рідини 6 або вибух провідника 8. Останній випадок найчастіше застосовується при розвальцювання труб 7 у трубній дощці 9 з використанням спеціальних патрончиків 10 (рис. 1.1.2,б).

Як видно з рис. 1.1.2,а, заготовка 11 в процесі деформування приймає форму матриці 12. Електрогідравлічне штампування характеризується рядом стадій, що послідовно відбуваються: формування провідного каналу між електродами; виділення у зоні каналу основної частки енергії, запасеної в конденсаторах; утворення хвиль стиснення та пульсація газового міхура після розряду; взаємодія ударної хвилі та гідропотоку із заготовлю.

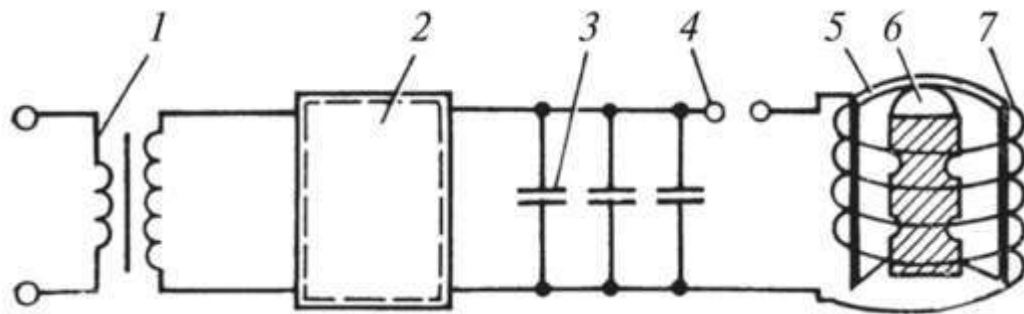
Вимоги до технологічного оснащення при електрогідравлічному плакируванні приблизно такі самі, як і при плакируванні вибухом. Для великосерійного виробництва або штампування деталей з калібруванням, матриці та інші елементи установок повинні бути виконані з міцних сталей. Для дослідного та дрібносерійного виробництва можна застосовувати більш дешеві та легко оброблювані матеріали.

Головними недоліками електрогідроімпульсного штампування (плакирування) є обмежена енергоємність установки, невисока стійкість електродів, велике розсіювання енергії ударної хвилі. Це значно ускладнює

можливість застосування цього методу для отримання біметалевих (особливо габаритних) виробів методом плакирування.

## 1.2 Електромагнітна технологія

Сутність процесу електромагнітного імпульсного плакирування полягає у наступному (рис. 1.2.1).



1 – трансформатор; 2 – випрямляч; 3 – батарея конденсаторів; 4 – розрядник; 5 – заготовка; 6 – оправка; 7 – соленоїд

Рисунок 1.2.1 - Схема електромагнітного імпульсного плакирування [2]

Заготовка 5 поміщається в полі соленоїда 7. При замиканні розрядника 4 імпульс струму, накопичений в батареї конденсаторів 3, проходить через обмотку соленоїда, осердя якого є оправлення 6. При цьому виникає миттєве магнітне поле, яке наводить в заготівлі вихрові струми. При взаємодії магнітного поля соленоїда з вихровими струмами виникають сили, спрямовані нормалі до поверхні заготівлі і використовувані для формозміни. Чим більший струм і швидкість його зміни в обмотці соленоїда, тим більше його магнітне поле та ЕМС, що індуюється в заготівлі, і тим більше сили, що формують заготівлю. Для зарядки батареї конденсаторів в ланцюг включені трансформатор 1, що живиться від промислової силової мережі, що підвищує до (100 000 В) і випрямляч 2 [5].

Електромагнітним штампуванням можна виготовляти деталі з листових та трубчастих заготовок. На плоских листових заготовках можна виконувати розділові операції, відбортування за внутрішнім та зовнішнім контурами, згинання з підсіканням, витяжку та ін. При виготовленні деталей із трубчастих заготовок виконуються розділові, формувальні, складальні, зварювальні та комбіновані операції.

Однією з особливостей електромагнітного плакирування є те, що деформація заготівлі відбувається без використання будь-яких проміжних середовищ та деталей. Ця особливість процесу дає можливість проводити плакирування (штампування) з підігрівом заготівлі у вакуумі або у захисних середовищах.

Головними недоліками електромагнітного штампування (плакирування) є також обмежена енергоємність установки, та неможливість обробляти не електропровідні матеріали. Це робить неможливим застосування цього методу для отримання біметалевих виробів методом плакирування з не електропровідних матеріалів.

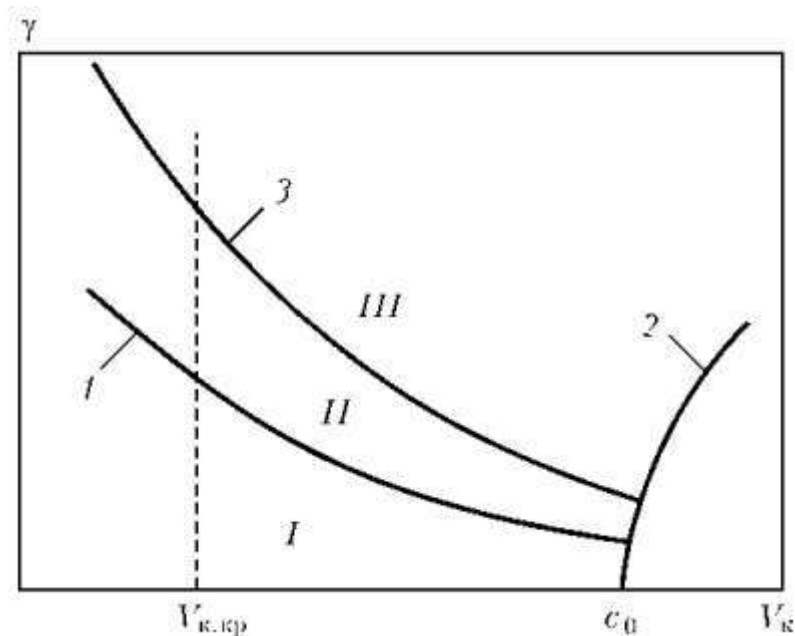
### 1.3. Плакирування вибухом

Зварювання вибухом - процес отримання міцного з'єднання двох або декількох металевих тіл, що відбувається при їх зіткненні. Прискорення тіл, що зварюються, до необхідної швидкості здійснюється, як правило, під дією енергії вибуху, що виділяється при детонації вибухових речовин (далі ВР). Зварювання вибухом використовують для виготовлення багат шарових (найчастіше біметалічних) листів, смуг, циліндричних виробів, композиційних матеріалів волокнистої будови з різноманітних металів і сплавів, у тому числі з тих, зварювання яких іншими способами утруднено.

При зварюванні вибухом [6] утворення з'єднання відбувається в результаті деформаційного впливу на матеріали, що з'єднуються, що характеризується високою швидкістю їх зіткнення при малій тривалості контактної взаємодії. Численні теоретичні та експериментальні дослідження цього процесу свідчать про те, що він гармонійно вписується в ряд твердофазних способів з'єднання металів, що протікають в умовах термосилового впливу за єдиною схемою тристадійної топохімічної реакції з утворенням фізичного контакту при зминанні поверхневих мікронерівностей, активації контактних поверхонь, що реалізується в основному дислокаційному каналу, та об'ємної взаємодії зі злиттям дискретних вогнищ взаємодії та релаксацією напруг. Таке трактування природи утворення сполуки у твердій фазі передбачає, з одного боку, дискретність процесу утворення осередків взаємодії (активних центрів), з іншого - колективність взаємодії атомів у полі цих активних центрів. Процес схоплювання-«зшивання зв'язків» на контактних поверхнях представляється бездифузійним [7-11], а природа утворення з'єднання незалежно від характеру та інтенсивності термодформаційної взаємодії - єдиною. Відмінності полягають у кінетиці протікання окремих стадій процесу, що визначається температурно-швидкісними умовами деформування металів, ступенем локалізації та механізмами деформації.

Як і будь-який інший спосіб отримання нероз'ємного з'єднання тиском, процес зварювання металів вибухом характеризується безліччю взаємопов'язаних і взаємозалежних розподілених параметрів [12], сукупність яких визначає деформаційні, температурні та часові умови формування сполуки у твердій фазі. Однак підходи до оцінки ролі цих параметрів у освіті з'єднання на різних етапах дослідження були різними. Спочатку, виходячи з гідродинамічних уявлень про процес зварювання вибухом, згідно з якими критеріями формування з'єднання є самоочищення поверхні кумулятивним потоком і хвилеутворення, основними параметрами зварювання були кут зіткнення і швидкість точки контакту  $V_k$ .

Р. Вітман [14] першим, аналогічно роботам з вивчення кумуляції, зробив спробу теоретичного опису [15-16] в координатах  $\gamma - V$  до характерних областей та їх меж (рис. 1.3.1), які потім неодноразово уточнювалися у пізніших роботах [17 - 27]. Графік наведено з роботи [13].



1, 3 – нижня та верхня межі; 2 – надзвуковий кордон; I – область «докритичних» режимів (зварювання відсутнє); II – область зварювання вибухом; III – область «поза межних» режимів

Рисунок 1.3.1. Характерні області та межі зварювання вибухом [13]

Відповідно до Р. Вітману зварні з'єднання можна отримати у II області, обмеженій чотирма лініями. Праворуч вона обмежується кривою, розрахованою з критичних умов струмеутворення. Правіше межі 2 існують ударні хвилі, пов'язані з точкою контакту, а кумуляція відсутня. Зварні з'єднання в цій галузі зазвичай отримують не вдається. Положення кривої 2 визначається залежністю критичного кута утворення кумулятивного струменя  $\gamma'$  від  $V_k$ , вперше встановленого в роботах [15, 16], де показано, що струмінь при надзвукових режимах зіткнення може існувати тільки при перевищенні  $\gamma'$ .

Зліва II область обмежена прямою  $V_{к.кр}$  - швидкістю, при якій відбувається перехід від хвилеподібного шва до безхвильового, що залежить

від числа Рейнольдса та твердості (по Віккерсу) і щільності металів, що зварюються [14].

Очевидно, що з низки причин це умова не витримує серйозної критики, оскільки перехід до безхвильового (рівномічного) шва при малих швидкостях контакту визначається не тільки  $V_k$ , але і кутом зіткнення  $\gamma$  (або швидкістю зіткнення  $V_c$ ) [12, 29], і в той же час для утворення міцного з'єднання процес хвилеутворення зовсім не обов'язковий, у зв'язку з чим цей кордон немає практичного значення. Зверху II область обмежена кривою 3 (див. рис. 1.3.1), положення якої визначається теплофізичними властивостями матеріалів, що зварюються і може бути розраховано з умови застигання розплавів до моменту приходу в зону з'єднання хвиль розрідження [14]. Розрахунок проводиться з використанням роботи [13]:

$$V_{c \max} = \frac{1}{N} \cdot \left( \frac{T_{\text{пл}} \cdot C_0}{V_k} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot c \cdot C_0}{\rho_1 \cdot \delta_1} \right)^{1/4}, \quad (1.3.1)$$

де  $N \approx 0,1$  - коефіцієнт;

$C_0$  – швидкість звуку;

$\lambda$  - теплопровідність;

$c$  – теплоємність;

$\rho_1 \delta_1$  - питома маса пластини, що метається.

Положення нижньої межі (див. рис. 1.3.1, крива 1) за Р. Уїтманом визначається критичним тиском зіткнення, що забезпечує пластичний перебіг у навколошовній зоні (НШЗ), і обчислюється через мінімально необхідну для зварювання швидкість зіткнення. Розрахунок проводиться з використанням роботи [13]:

$$\gamma_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\sigma_B}{\rho \cdot V_{\text{л}}^2}}, \quad (1.3.2)$$

Такий опис і зображення в координатах, що характеризують головним чином «геометрію» зіткнення пластин при зварюванні вибухом, з'явилося на початковому етапі вивчення цього процесу піонерським, хоч і базувалося на суто «механістичних» передумовах формування з'єднання, створило фундамент та дало імпульс для конкретизації положення меж процесу іншим дослідникам, які запропонували відповідні залежності, що пов'язують критичне значення кута зіткнення  $\gamma_{кр}$  з твердістю за Віккерсом HV [18, 19], межею плинності  $\sigma_t$  [25, 26, 30], межею міцності  $\sigma_b$  [17], опором деформований.

Разом з тим зіставлення розрахункових даних щодо цих залежностей положень нижньої межі зварювання з експериментальними показало в ряді випадків значне розходження, що зазначається, наприклад, у роботах [18, 19]. Таку розбіжність зазвичай пов'язують з оксидними плівками, що не враховуються, на поверхнях, чистотою їх обробки та ін., роль яких, безумовно, очевидна. Однак загальним недоліком всіх наведених вище моделей, що й обумовлює розбіжність експериментальних і розрахункових даних за запропонованими залежностями, є та обставина, що в них неврахованими залишилися значно більш «вагомими» параметри і насамперед масові характеристики металів, що стикаються.

Автори роботи [26] у пізнішій роботі [31], ґрунтуючись на даних [32], спробували визначити нижню межу з урахуванням усередненої маси  $m \sim m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$  (тут  $m_1$  і  $m_2$  - одиничні, що припадають на одиницю площі поверхні, маси відповідно пластини, яка метається та нерухомої пластин) і виділення із загальної енергії, що витрачається на пластичну деформацію приконттактних шарів металу при зварюванні вибухом  $W_2$  [33] її частки, що локалізується в зоні шириною, що дорівнює розмаху (двом амплітудам). Розрахунок проводиться з використанням роботи [13]:

$$V_{c.кр} = \sqrt{\frac{\sigma_{0,2}}{2 \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{V_k^2}{C_0^2}\right)}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot E_{ст}}{\frac{\sigma_{0,2} \cdot \delta_1 \cdot \delta_2}{(\delta_1 + \delta_2)}}}\right), \quad (1.3.3)$$

де  $V_{c.кр}$  - критичне значення (за аналогією з критичним кутом зіткнення, що визначається положенням нижньої межі зварювання) швидкості зіткнення пластин;

$E_{ст} = 0,8 \cdot 2a_{ср} \cdot T_{пл}$  - енергія, необхідна, на думку авторів [31], для утворення сполуки;

$T_{пл}$  - температура плавлення металів, що зварюються;

$\delta_1, \delta_2$  - товщини відповідно метається і нерухомої пластин.

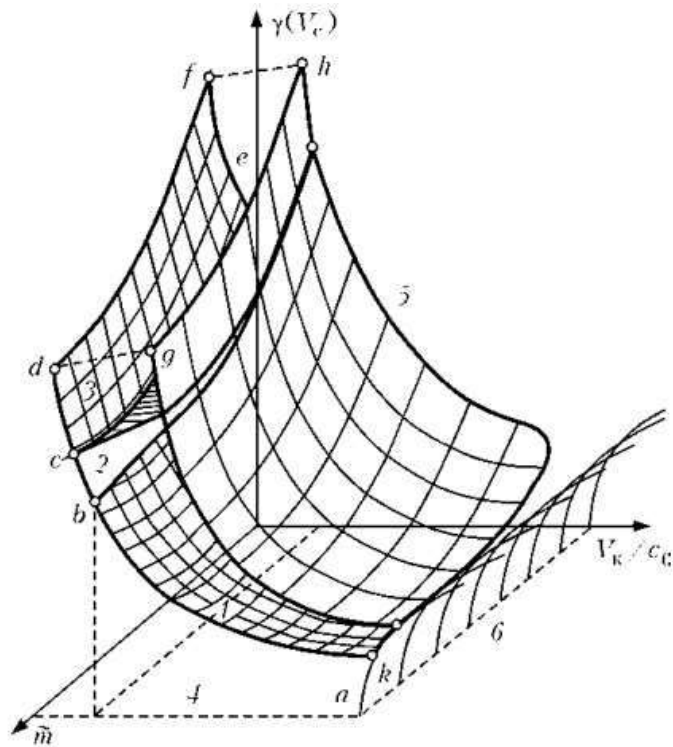
Такий підхід, на жаль, невиправданий з цілого ряду причин. По-перше, при зварюванні вибухом абсолютної більшості різнорідних металів ( $Fe + Al$ ;  $Ti + Al$ ;  $Mg + Ti$ ;  $Mg + Cu$ ;  $Al + Cu$  та ін) якісне з'єднання формується з безхвильовим кордоном. По-друге, первинне схоплювання та утворення зварного з'єднання при зварюванні навіть однорідних металів на нижньому кордоні відбувається в умовах, коли процес хвилеутворення ще просто немає [14, 19, 34]. Крім того, не аргументований вибір і самого критерію - зони завширшки дві амплітуди хвилі. Очевидно, що пов'язувати явище схоплювання з ефектом хвилеутворення при високошвидкісному зіткненні не можна, - останній лише сприяє інтенсифікації пластичної деформації, надаючи їй у цілому швидше небажаний для зварювання періодичний, суттєво нестаціонарний характер із наявністю вихрових зон та оплавів.

Істотному просуванню вперед у цьому питанні сприяло встановлення принципово важливих фактів: значний вплив усередненої маси шарів  $m \sim$  на процес формування сполуки, існування її критичних  $m_{кр}^{\sim}$  та граничних  $m_{гр}^{\sim}$  значень (при заданих  $V_c, V_k, \gamma$ ), що створило передумови до переосмислення суто механістичної інтерпретації критичних умов (меж) зварювання, що описуються лише гідродинамічними явищами в координатах  $\gamma - V_k$ , та

фундаментальна основа для формування енергетичного підходу до процесу, що вивчається. Уявлення про «процес утворення струменя металу з області точки контакту як про необхідний і достатній фізичний процес, що визначає можливість отримання з'єднання» [19], по суті ідентичні уявленням плівкової гіпотези, що розвивається ще в 1950-х роках С. Б. Айнбіндер з співробітниками [35, 36] і що виходить з того, що термодинамічна ймовірність захоплення обумовлена зменшенням вільної енергії системи при зникненні двох вільних поверхонь, чим виключається необхідність визначення термодинамічної дозволеності процесу утворення міжатомних зв'язків.

З урахуванням масових характеристик матеріалів, що зварюються, положення основних областей зварювання вибухом може бути трансформовано в простір параметрів (рис. 1.3.2). Подібне перетворення носить принциповий характер, оскільки, по-перше, будь-якій точці простору в координатній системі  $m \sim - V_c - V_k$  відповідає згідно з роботою [33] певне значення енергії  $W_2$ , що витрачається на пластичне деформування металу, а характерним поверхням, наведеним на рис. 1.3.2, - цілком конкретний енергетичний стан системи пластин, що стикаються.

По-друге, встановлення взаємозв'язків  $m \sim$  зі становищем критичних меж процесу створило реальний фундамент для об'єднання позицій так званих металофізичної та гідродинамічної наукових шкіл дослідників даного складного процесу, оскільки з додаванням до площини  $\gamma - V_k$ , що описує «зовнішні» гідродинамічні явища при косих зіткненнях, масової осі з'явилася можливість дати енергетичну, "внутрішню" інтерпретацію процесу захоплення металів без відкидання існуючих уявлень.



1, 2 - відповідно «традиційний» та безхвильовий режими; 3 – аномальне хвилеутворення; 4 – докритичні режими; 5 – розвинена кумуляція; 6 - надзвукові режими

Рисунок 1.3.2. Положення основних характерних областей зварювання металів вибухом [13]

Підхід до опису процесу захоплення та формування зварної сполуки з енергетичних позицій органічно впливає з теорії твердофазних топохімічних реакцій [7–10], згідно з якою для перебігу останніх атоми на межі поділу металів необхідно перевести в активований стан, повідомивши їм певну кількість енергії при зварюванні вибухом шляхом локалізованої та інтенсивної пластичної деформації.

Простір параметрів, в якому можливе одержання зварних з'єднань, схематично представлено на рис. 1.3.2 замкнутою фігурою, розсіченою в передній частині площиною, перпендикулярної осі  $m \sim i$  обмеженою зверху та знизу двома поверхнями  $adf$  (нижня межа) та  $kgh$  (верхня межа), між якими розташовані три характерні області, що відрізняються феноменологією пластичного перебігу та відповідним їй профілем залишків

металу в НШЗ. З'єднання металів з близькими механічними властивостями, що одержуються в області традиційних режимів зварювання (рис. 1.3.2, область 1) відрізняються високою міцністю і синусоїдальним профілем лінії розділу. В області 2 умови пластичного перебігу несприятливі для розвитку хвилеутворення внаслідок рівності кута зіткнення і кута між вектором швидкості бугра деформації і поверхнею пластин [29], що викликає отримання прямолінійної межі розділу при високій міцності з'єднання шарів. Зварні з'єднання з аномальними хвилями, що існують в області 3, також мають високі властивості міцності.

Правіше області зварювання розташована докладно вивчена в роботах [15, 16, 18] область 6, в якій існують ударні хвилі, пов'язані з точкою контакту, і зварні з'єднання зазвичай отримати не вдається. Область великих кутів зіткнення (область 5) відповідає режимам розвиненої кумуляції і, як і область 6, не має практичного значення для зварювальних технологій.

У міру наближення до поверхні  $ad_f$  знизу (при постійних масових характеристиках системи, що зварюється) енергія  $W_2$  [33] збільшується пропорційно  $V_c^2$ , що призводить до залучення в пластичне деформування великих обсягів металу, прилеглого до межі розділу контактуючих шарів, і при досягненні деякого критичного рівня, Постійного для кожної пари матеріалів, що зварюються [12, 37], з'єднання стає рівноміцним.

Положення нижньої межі зварювання, як видно з рис. 1.3.2, істотно залежить від масових характеристик зварюваної системи (усередненої маси  $\tilde{m}$ ) і зміщується у бік менших значень динамічного кута  $\gamma$  або швидкості з наголосом  $V_c$  при збільшенні  $\tilde{m}$  (рис. 1.3.3).

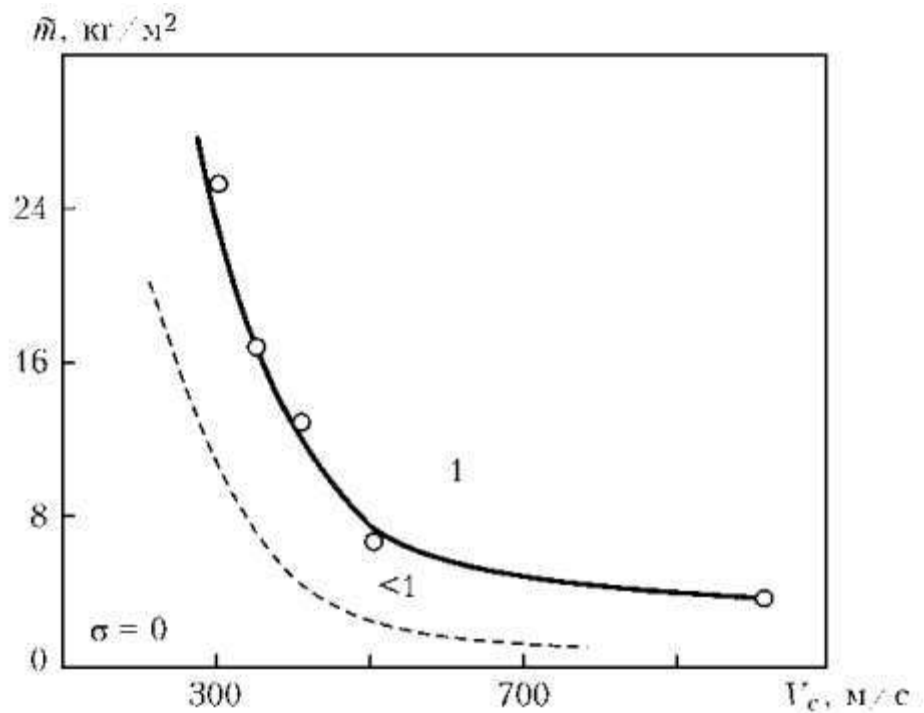


Рисунок 1.3.3 - Положення нижньої межі зварювання сталі 12X18H10T зі сталлю Ст3 залежно від усередненої маси  $\bar{m} \sim$  пластин, що зварюються (штрихова крива - межа захоплення, нанесена умовно) [13]

Таким чином, відповідно до існуючих енергетичних уявлень утворення міцної сполуки відбувається при перевищенні деякого критичного рівня енерговитрат, що залежать, в першу чергу, від швидкості зіткнення зварюваних пластин і їх маси (або товщин). Однак основний параметр енергетичної групи  $W_2$  - енергія або робота, витрачена на пластичну деформацію металу НШЗ, - хоч формально і пов'язаний з умовами зіткнення та масовими характеристиками (тобто товщинами) елементів, що зварюються, але описує лише в узагальненому вигляді кінцевий результат їх високошвидкісної взаємодії, не розкриваючи взаємозв'язків між іншими фізичними параметрами процесу - тиском, часом його дії та температурою у зоні з'єднання.

У роботах [12, 38] для взаємопов'язання тиску і часу було запропоновано новий параметр - деформуєчий імпульс тиску  $I_d$ . Розрахунок  $I_d$  проводиться з використанням роботи [13] що описується рівнянням:

$$I_d = \int_0^{\tau_0} p(\tau) d\tau = \int_0^{\tau_c} p_{\max} \cdot e^{-\tau/\theta} d\tau \quad (1.3.4)$$

де  $p_{\max}$  - піковий тиск у точці контакту пластин, що зварюються;

$\tau_c$  – час протікання пластичних деформацій за точкою контакту (або час зварювання);

$\theta$  - постійна часу, що характеризує темп спаду тиску в зоні з'єднання (для алюмінію і сталі Ст3  $\theta$  становить приблизно 0,565 і 0,96 мкс).

Інтегральний параметр  $I_d$  власне визначає енергетичні умови формування сполуки. Так, тиск  $p$ , що діє на приконтактні шари з'єднання протягом деякого часу, здійснює певну роботу з пластичного деформування металу в них. При цьому чим вище рівень тиску і триваліша його дія, тим більша частина кінетичної енергії  $W$  елемента, що метається, витрачається на пластичну деформацію металу НШЗ  $W_2$ , визначаючи, в кінцевому рахунку, енергетичний баланс в системі.

Таким чином, деформуючий імпульс тиску  $I_d$  є деяким «містком» до параметрів «мікрорівня» [39], пов'язуючи тиск, що воєдино змінюється в часі в зоні з'єднання (пікове значення якого визначається швидкістю зіткнення зварюваних елементів) і час його дії з кінематикою та енергетикою процесу, з одного боку, і ступенем пластичної деформації, повнотою протікання активаційних процесів у зоні контакту й у результаті міцністю з'єднання шарів, - з іншого.

Узагальнення великої кількості експериментальних даних дозволило визначити (за аналогією з критичними енерговитратами [37]) деяке критичне значення деформуючого імпульсу тиску, нижче якого рівномірне з'єднання отримати неможливо. В узагальненому вигляді виявлена закономірність, що зв'язує міцність зварної сполуки Ст3 + Ст3 зі значенням  $I_d$  представлена на рис. 1.3.4. На цю ж координатну площину нанесено експериментальні точки, перераховані з даних інших дослідників. Видно, що збільшення міцності зварного з'єднання починається приблизно з 0,9...1 кН·с/м<sup>2</sup>, рівномірною вказана композиція стає, починаючи приблизно з 3,5...3,7 кН·с/м<sup>2</sup>, що

дозволяє в першому наближенні вважати це значення критичної величиною деформуючого імпульсу тиску  $I_{д.к р}$  для цієї пари матеріалів.

Значення деформуючого імпульсу загалом можна регулювати або шляхом варіювання товщин зварюваних пластин, змінюючи тим самим тривалість дії тиску в зоні з'єднання, або зміною пікового тиску в зоні з'єднання за рахунок швидкості стикання  $V_c$ . При вирішенні ж практичних завдань зварювання вибухом конкретних композицій, коли товщини елементів, що зварюються, як правило, строго лімітовані, єдино прийнятним залишається другий шлях. Проте суто гіпотетично нижню межу зварювання вибухом у координатах «тиск  $p$  - час  $\tau$ » можна уявити гіперболічною залежністю, зображеною на рис. 1.3.5. Тут осі тиску і часу певною мірою еквівалентні відповідним осям  $\gamma(V_c)$  і  $\tilde{m}$  раніше побудованої області зварювання (див. рис. 1.3.2).

Третя координатна вісь  $V_k$  (див. рис. 1.3.2) може бути зіставлена з ще одним важливим фізичним параметром процесу - температурою металу  $T$  в зоні з'єднання, яка, відповідно до теорії топохімічних реакцій, сприяє утворенню сполуки в твердій фазі, збільшуючи, з одного боку, частоту виходу дислокацій у зону з'єднання (частоту утворення активних центрів), з іншого, - зменшуючи час активації, тобто час, протягом якого відбувається схоплювання металів у межах активних центрів до їхньої природної релаксації.

Початкова теплова ситуація в зоні з'єднання при зварюванні вибухом нерозривно пов'язана з розподілом максимальних пластичних зсувних деформацій по перерізу зварених елементів [12, 43]. При цьому в деякому довільному елементарному шарі металу товщиною  $d_y$ , який віддаляється від лінії з'єднання на відстань  $y$ , тепло що виділилося пропорційно до елементарної роботи деформування. Розрахунок проводиться з використанням роботи [13]:

$$\delta \cdot A_D = S_k \cdot g_{\max}(y) dy, \quad (1.3.5)$$

де  $S_k$  - опір деформації, чисельно дорівнює динамічній межі плинності  $\sigma_T^d$  ;  
 $g_{\max}(y)$  - поточне значення максимальної зсувної пластичної деформації.

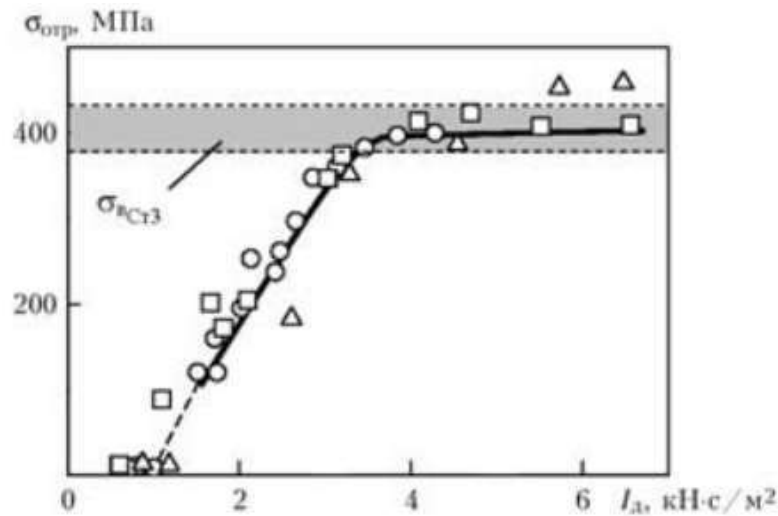


Рисунок 1.3.4 - Вплив деформуєчого імпульсу тиску  $I_d$  на міцність  $\sigma_{отр}$  біметалу з низьковуглецевої сталі: □, △ - дані А. Н. Кривенцова, В. Г. Шморгуна, В. А. Проніна; ○ - дані авторів [13]

Повна питома (віднесена до одиниці площі зварного зразка) робота деформування (або, що те саме, енергія, витрачена на пластичну деформацію металу НШЗ) може бути обчислена шляхом інтегрування. Розрахунок проводиться з використанням роботи [13]:

$$A_D = S_k \int_0^{\delta} g_{\max}(y) dy, \quad (1.3.6)$$

Зробивши припущення, що тепло у всіх шарах виділяється одночасно, нескладно оцінити теплову ситуацію в НШЗ зварного з'єднання, тобто розрахувати початкові температурні поля.



Рисунок 1.3.5 - Гіпотетичне уявлення нижньої межі зварювання в координатах «тиск  $p$  – час  $\tau$ » [13]

Згідно з роботою [13], для довільного шару у температура в початковий момент часу  $t=0$  з урахуванням виразу (5) дорівнює:

$$T(y) = \frac{S_k \cdot g_{\max}(y)}{c \cdot \rho} + T_0, \quad (1.3.7)$$

Тепер, знаючи закон зміни  $g_{\max}(y)$  за товщиною пластини, можна для довільного перерізу побудувати початкові температурні поля (рис. 1.3.6).

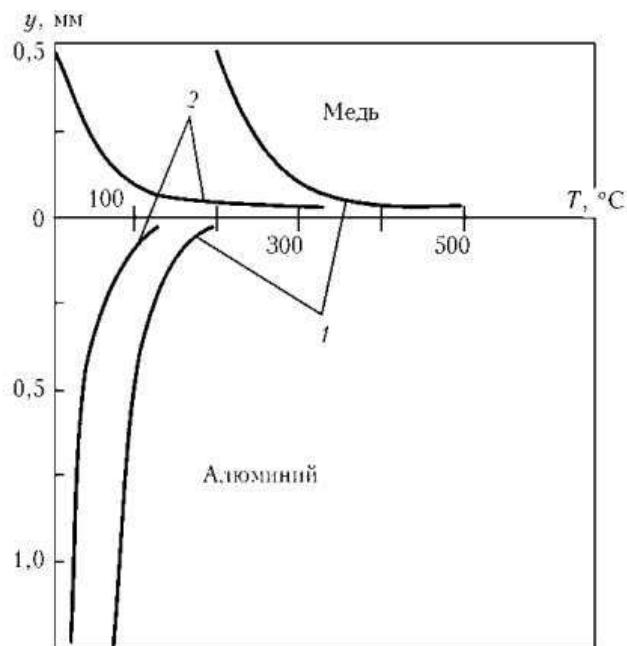


Рисунок 1.3.6 - Розподіл температур у перерізі звареного вибухом мідно-алюмінієвого композиту: 1 –  $V_k = 2600$ ; 2 –  $V_k = 2000$  м/с [13]

Слід зазначити, що зі збільшенням швидкості точки контакту  $V_k$  температура приконтактних шарів матеріалів, що зварюються, істотно зростає (у граничному випадку, при наближенні до навколосвукових швидкостей, в зоні з'єднання відбувається їх оплавлення, а в з'єднанні спостерігається суцільний прошарок оплавленого металу), що згідно з основними положеннями теорії топохімічних реакцій «полегшує» процес схоплювання, а необхідні рівні часових факторів утворення сполуки можуть бути знижені [13].

Таким чином, з урахуванням усіх поданих вище міркувань можна перейти до відображення нижньої межі зварювання металів вибухом у координатах «тиск  $p$  – температура  $T$  – час  $\tau$ » (рис. 1.3.7), контури якої не суперечать існуючим уявленням та положенням меж зварювання, побудованим раніше [13].

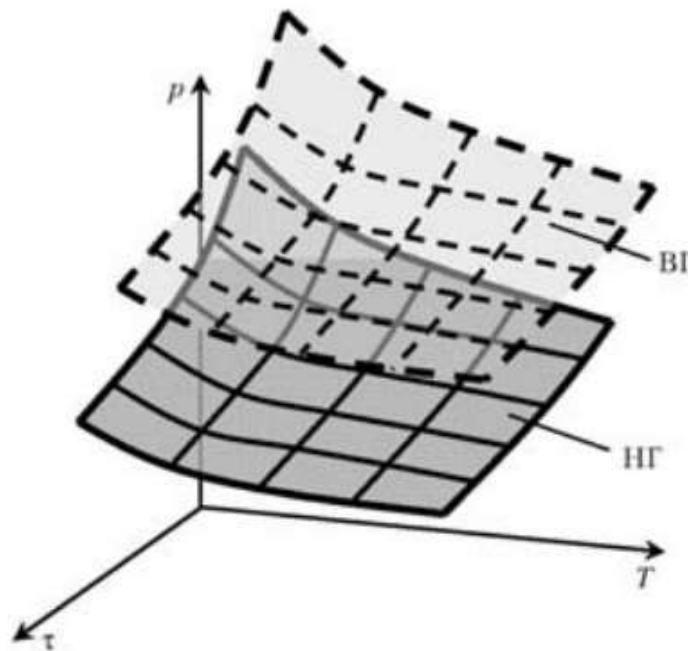
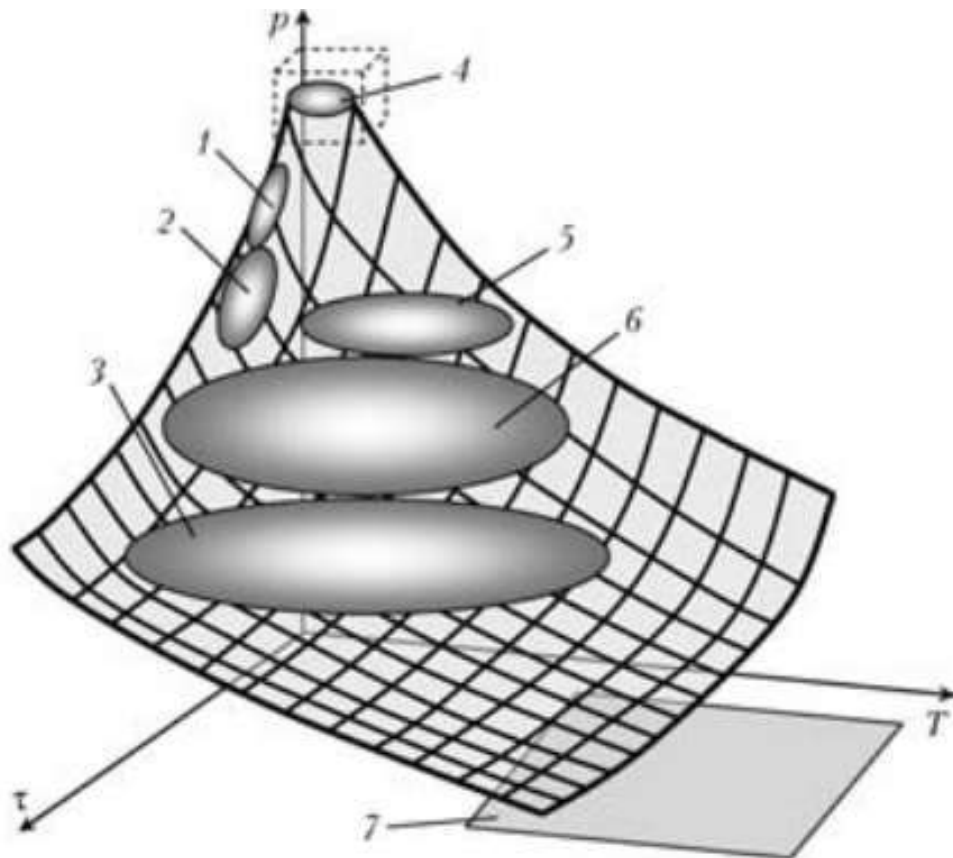


Рисунок 1.3.7 - Область зварювання вибухом у координатах « $p$ – $T$ – $\tau$ » (НГ та ВГ - відповідно нижня та верхня межі зварювання) [13]

Цікавим є зіставлення розташувань у цих координатах областей параметрів, притаманних різних способів зварювання (рис. 1.3.8) яке викладено у роботі [13].

Отже, згідно з [13], зварювання вибухом (як і магнітно-імпульсне) з характерними для неї досить малими часами утворення з'єднання та екстремальна високими тисками займає верхній кут координатної області. Інші способи розташовуються значно нижче. Це ще раз свідчить про те, що зварювання вибухом не є якимось «екзотичним», окремим процесом з'єднання металів, а логічно вписується в коло відомих способів, органічно їх доповнюючи [13].



- 1 - холодне зварювання ( $p$ , МПа;  $\tau$ , мс;  $T \sim 0,2 T_{пл}$ );
- 2 - зварювання прокаткою в холодну ( $p$ , МПа;  $\tau$ , мс;  $T \sim 0,2 T_{пл}$ );
- 3 - дифузійне зварювання ( $p$ , кПа;  $\tau$ , с;  $T \sim 0,9 T_{пл}$ );
- 4 – звар-ня вибухом, магнітно-імпульсне звар-ня ( $p$ , ГПа;  $\tau$ , мкс;  $T \sim 0,6 T_{пл}$ );
- 5 - зварювання прокаткою ( $p$ , МПа;  $\tau$ , мс;  $T \sim 0,7 T_{пл}$ );
- 6 - контактне зварювання ( $p$ , МПа;  $\tau$ , мс;  $T \sim 0,8 T_{пл}$ );
- 7 - зварювання плавленням ( $p$ , Па;  $\tau$ , с;  $T > T_{пл}$ ).

Рисунок 1.3.8 - Области параметрів різних способів зварювання в координатах  $p$ - $T$ - $\tau$  [13]

#### 1.4 Мета та завдання роботи

Отже, згідно з огляду вищевказаних методів плакирування впливає, що метод плакирування вибухом є найбільш високопродуктивним процесом, який забезпечує високу якість з'єднання біметалевих матеріалів. Тому мета та завдання роботи полягає у розробці технології плакування вибухом для отримання циліндричних біметалевих катодів (поверхня сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72, серцевина М1 ГОСТ 859-2014).

## 2 КОНСТРУКЦІЯ БІМЕТАЛЛЕВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО КАТОДУ

Питання отримання біметалевих циліндричних катодів з різнорідних матеріалів, які трудно зварюються (нержавіюча сталь та мідь, титан та алюміній і т.п.) є дуже актуальним.

Наприклад, біметалевий циліндричний катод представлений на рис. 2.1.

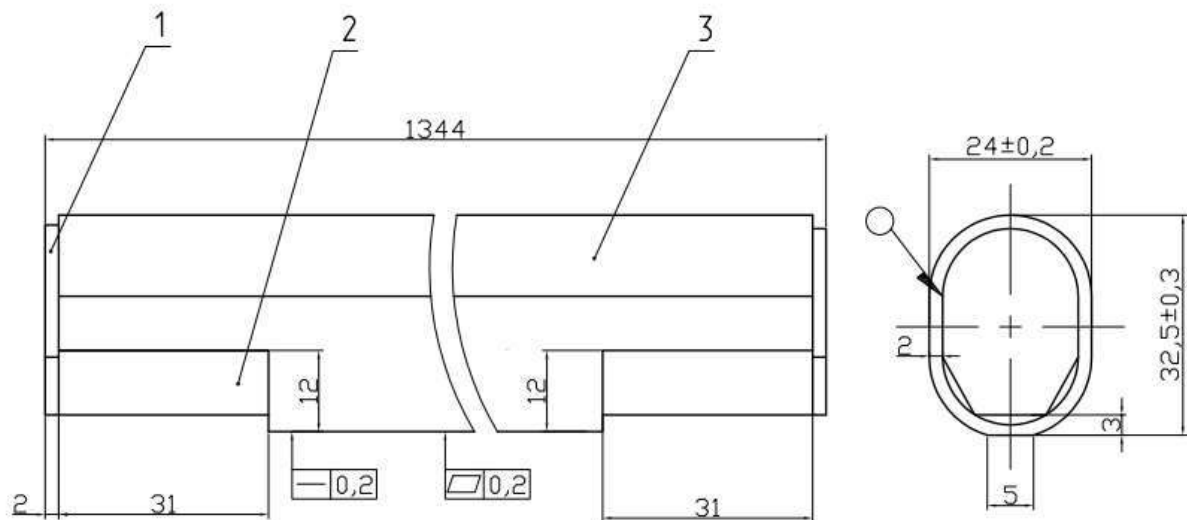
Трубчастий довгомірний катод з нержавіючої сталі та міді представляє собою стрижень овальної форми довжиною 1344 мм. В середині катоду – мідь М1 плакована шаром нержавіючої сталі 12Х18Н10Т товщиною 2 мм. На кінцях катоду є фрезеровані пази. По торцях катоду приварені кришки 1 з нержавіючої сталі.

Зварний шов кришок по торцях катоду виконано по ГОСТ 14771-76.

Допуски форми: допуск площинності та прямолінійності – 0,2 мм, що на довжині більше 1 метру вимагає великої точності плакування шару нержавіючої сталі на мідну серцевину катоду.

Допуски на лінійні розміри не позначені на кресленні – по 12 квалітету.

Вимоги до сплошності плакованого шару – не менше 95% від загальної площі з'єднання. Контроль – ультразвуком.



1- кришка (сталь 12X18H10T ГОСТ 53332-72); 2 - стрижень (мідь М1 ГОСТ 859-2014); 3 - оболонка (сталь 12X18H10T ГОСТ 53332-72)

Рисунок 2.1 - Трубчастий катод з нержавіючої сталі та міді

Відповідні методи виготовлення подібних трубчастих довгомірних деталей і з'єднань високоміцних та різнорідних сталей і сплавів, що важко деформуються та зварюються, мають суттєві недоліки, пов'язані з експериментальною обробкою параметрів формоутворення через можливе руйнування заготовлі в процесі деформування, а також з наявністю великого обсягу ручних доводочних робіт.

Тому дуже актуальним є створення технологічних процесів та обладнання, що дають можливість отримувати біметалеві з'єднання високої якості та продуктивності.

## **3 ТЕХНОЛОГІЯ ПЛАКИРУВАННЯ ВИБУХОМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО КАТОДУ**

### **3.1 Підготовка поверхні**

Для зварювання вибухом, як для будь-якого процесу зварювання тиском у твердій фазі, найбільш важливим є стан поверхні матеріалів, що зварюються, механічні та хімічні властивості основного і плакуючого шарів, якості підготовки і шорсткості зварюваних поверхонь.

Якість зварювання вибухом визначається в першу чергу процесами, що відбуваються попереду точки контакту - очищенням та активацією поверхонь, що з'єднуються [43].

Заготовки перед зварюванням не повинні мати значного прогину, не більше ніж 2-3 мм на 1 м довжини. Поверхні повинні бути зачищені до металевого блиску, для титану та аустенітних сталей допускається травлення поверхонь, що зварюються.

### **3.1 Очищення кумулятивним струменем**

Відповідно до прийнятої на сьогодні теорією утворення з'єднання при зварюванні вибухом вважається, що в умовах косих зіткнень відбувається самоочищення, як підкреслено у [44], внаслідок утворення кумулятивного струменя, який знімає шар металу зі зварюваних поверхонь разом з оксидами та забрудненнями і видаляє їх із зварювального зазору у вигляді хмари дисперсних частинок [44]. Потім ювенільні поверхні стискаються під дією продуктів детонації до утворення металевого зв'язку.

Процес з'єднання металів при зварюванні вибухом супроводжується різким підвищенням температури в зоні з'єднання, про що свідчить наявність

«литих структур» - зон, в яких відбувається плавлення матеріалу в процесі зварювання.

У процесі зварювання вибухом попереду точки контакту зварювальному зазорі утворюється область ударно стиснутого газу (УСГ). У роботі [44] розглянуто його тепловий вплив на поверхні, що зварюються, на відстані від початку зіткнення пластин за методикою [12]. Тепловий потік із газу на поверхню пластин розраховується з використанням роботи [44]:

$$q = St \cdot \rho \cdot u \cdot C_p \cdot (T_{УСГ} - T_0) \quad (3.1.1)$$

де  $St$  – число Стантона;

$\rho$  – густина газу;

$u$  – масова швидкість газу за фронтом ударної хвилі;

$C_p$  – теплоємність газу;

$T_{УСГ}$  – температура УСГ;

$T_0$  – початкова температура (293 К).

Число Стантона при турбулентному обтіканні пластин газовим потоком становить, згідно з [44]:

$$St_T = \frac{1}{8 \left( 21g \frac{a_p}{k} + 1,74 \right)^2}, \quad (3.1.2)$$

де  $a_p$  - відстань між деталями, що зварюються (зварювальний зазор), мм ;

$k$  – середній розмір шорсткості поверхні, мм.

При постійному тепловому потоці з газу у метал, згідно з [44], поверхня пластин нагрівається за законом

$$T_c = \frac{q}{2 \cdot \lambda} \cdot \sqrt{6 \cdot a \cdot t} + T_0, \quad (3.1.3)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність;

$a$  – температуропровідність матеріалу пластин, що зварюються;

$t$  – час.

Розрахунки, виконані для зварювання сталі (швидкість точки контакту  $v_k = 2500$  м/с;  $a_p = 8$  мм;  $k = 0,08$  мм), показали, що максимальна температура, до якої нагрівається поверхня металу за умови нескінченної довжини заготівлі діаметром 30 мм становить близько 800-890 °С.

Отже, згідно з [44], вплив УСГ забезпечує задовільне очищення поверхонь, що зварюються.

Однак при очищенні кумулятивним струменем під час зварювання вибухом неможливо проконтролювати якість очищення поверхонь, що зварюються. Крім того параметри кумулятивного струменя залежать від вибраних параметрів зварювання, які можуть не збігатися повною мірою з необхідними параметрами кумулятивного очищення. Тому технологію очищення кумулятивним струменем, згідно з [44], слід розглядати як додаткову або супутню.

### 3.2 Підготовка поверхні. Ультразвукове очищення

Ультразвукове очищення є швидким і ефективним екологічно безпечним способом очищення, який використовує ультразвукову енергію, яка проходить крізь відповідний миючий розчин. Це забезпечує високошвидкісне ретельне видалення небажаних забруднень з очищуваних елементів, розташованих усередині контейнера для рідини, що піддається проникненню ультразвукових хвиль. Цей метод очищення є одним з найсучасніших і найефективніших способів видалення бруду з різних об'єктів, особливо в найкоротші терміни і без можливого пошкодження елементів. Спосіб ультразвукового очищення оснований на кавітації.

Кавітація - процес швидкого формування і розсіювання мікро бульбашок в рідині. Явище кавітації відбувається, коли ультразвукові хвилі проходять через рідину. Ультразвук (звук високої частоти, як правило, від 20 до 400 кГц) породжує хвилі високого і низького тиску, які виробляють крихітні порожнини (бульбашки). Вони починають рости від мікроскопічних розмірів у фазі низького тиску, поки вони не стискаються, а потім лопаються на етапі високого тиску. Молекули рідини стикаються, вивільняючи величезну кількість енергії. Енергія миттєво збільшує локальну температуру і формує потік високої енергії, спрямований на поверхню об'єкту, який очищується. Ці пухирці мають величезну енергію, яка, спрямована на очищення - її викид відокремлює забруднення від поверхні, що очищається.

Ультразвукова енергія звукових хвиль високої частоти перетворюється з високочастотної електричної енергії за допомогою перетворювача. Очисна потужність пристрою залежить від типу і потужності використовуваного перетворювача.

Для очищення використовують ультразвукові ванни.



Рисунок 3.1- Ультразвукова ванна

Модуль ультразвукової ванни включає в себе ультразвуковий генератор та спеціальні перетворювачі, встановлені на нижній частині резервуара з нержавіючої сталі. Резервуар повинен бути заповнений рідиною для утворення середовища очищення. Генератор разом з перетворювачем формують змінні хвилі стиснення і розширення в рідині на дуже високих частотах, як правило, від 25 до 130 кГц..

Враховуючи практичний досвід призначаємо режими технологічного процесу:

Рідина – вода.

Частота – 400Гц.

Час – 1...2 хв.

Безпосередньо перед зварюванням поверхні, що з'єднуються, знежирюються, так як наявність масляних плівок перешкоджає утворенню зварного з'єднання.

### 3.3 Визначення технологічних параметрів виробництва

Згідно з [50], при розробці технології отримання шаруватих металевих композицій плакуванням вибухом найважливішим і, як правило, найбільш трудомістким етапом є вибір режимів плакування вибухом, що забезпечують реалізацію максимальної (або достатньої) міцності з'єднання шарів композиції при мінімальному розвитку структурної неоднорідності на всіх міжшарових межах композиції [45].

Складність плакування вибухом як фізичного явища, а також його специфічні особливості, що є наслідком короткочасного впливу високих тисків і температур в контактуючих шарах металів, що з'єднуються, і високої інтенсивності пластичного перебігу в них обумовлює те, що фізичного

обґрунтування універсального режиму плакування вибухом поки не знайдено.

Спільна пластична деформація металів (сплавів), що з'єднуються, потрібна для отримання міцного з'єднання при плакуванні вибухом, передбачає, що тиски, що виникають в зоні зіткнення, забезпечують величину напруг у металах на рівні їх динамічної межі плинності, величина якого в більшості випадків невідома [45, с.44]. Цим можна пояснити, що взаємозв'язки між міцністю з'єднання і режимами плакування встановлені лише якісно, опосередковано через енергію пластичної деформації  $W_2$ , у свою чергу, що визначається  $v$  і  $v_c$ .

Для оптимальних режимів плакування вибухом згідно з [50] характерно:

- при них будуть забезпечені тиски, достатні для отримання на пізніх фазах зіткнення міцного з'єднання шарів (можливі два підходи: по першому забезпечується максимальна міцність з'єднання, по другому, більш відповідному практиці, забезпечується отримання рівноміцного з'єднання, тобто такого, міцність якого буде не нижче міцності менш міцного металу (сплаву) композиції);

- при них не встигають розвинутися процеси, що призводять до утворення проміжних фаз, що знижують міцність і пластичність композиції (що є однією з основних переваг плавання вибухом, що дозволяє отримувати з'єднання різнорідних металів, інші способи з'єднань яких скрутні).

Імпульсний характер навантаження металів, що з'єднуються, ставить завдання жорсткого дотримання всіх режимних параметрів процесу плакування вибухом. В іншому випадку мають місце поява тріщин і навіть руйнування металу.

Згідно з [50], процес утворення з'єднання, з точки зору теорії твердо фазних теплохімічних реакцій, при усіх засобах з'єднання металів тиском у твердій фазі, протікає у вигляді трьох основних стадій [47]: створення фізичного контакту (зближення за допомогою пластичної деформації атомів

металів на відстань, при якому стає можливим утворення металевого зв'язку між ними), активація контактних поверхонь (формування активних центрів) та об'ємна взаємодія.

При плакуванні вибухом дифузійні процеси у лінії з'єднання не встигають розвинутися через величезні швидкості процесу і вкрай малий час захоплювання ( $\approx 10^{-6}$  с). У зв'язку з цим при плакуванні вибухом стадія об'ємної взаємодії практично відсутня.

Згідно з [50], кількість енергії, що вводиться в з'єднання при плакуванні вибухом, визначає ступінь пластичної деформації металів шарів, що контактують, її характер (зокрема, розподіл за товщиною шарів) і час деформування [46]. При плакуванні вибухом отримання якісного з'єднання визначається рівнем розвитку процесів активації, іншими словами, величиною частки кінетичної енергії плакуючого елемента, що метається, перетвореної в енергію  $W_2$ , що витрачається на пластичну деформацію металу в навколошовній зоні. У роботі [48] вказується, що реалізація рівномірної сполуки відбувається при постійному діапазоні енергії пластичної деформації  $W_2$ , характерному кожному за конкретного поєднання металів.

Розробка методики розрахунку режимів плакування вибухом є, по суті, виділення вихідних параметрів для цього розрахунку, вихідних параметрів, залежно від питомої енергії  $W_2$ , і проміжних величин, що їх пов'язують, і співвідношень між ними.

Шляхи розрахунку та залежності для розрахунку енергетичних, динамічних та технологічних параметрів плакування вибухом наведені у численних роботах [49, 50 та ін.]. При цьому, згідно з [50], передбачається поетапне визначення значень швидкостей металення і контакту, порівняння з урахуванням геометричних розмірів і фізичних констант матеріалів енергетичних витрат, що зварюються, в зоні їх з'єднання зі значеннями критичної енергії пластичної деформації  $W_2$ , необхідної для утворення міцного з'єднання. Якщо розрахункове значення  $W_2$  лежить поза

обумовленим діапазоном енергій, виконується коригування значень швидкостей точки контакту або зіткнення, після чого розраховуються технологічні параметри плакування вибухом.

Процес утворення з'єднання при плакуванні вибухом визначається характеристиками заряду ВР – висотою заряду Н (товщиною шару ВР), швидкістю детонації D, а рйого щільністю також величиною вихідного (технологічного) зазору h між поверхнями, що з'єднуються, і кута між елементами, що з'єднуються (при непаралельній схемі плакування) [49]. Як вихідні одані розрахунку режимів процесу плакування виступають характеристики заряду ВР і технологічний зазор між плакуючим і основним елементами.

Розрахунок параметрів плакування вибухом проводиться за наступною методикою [50]:

1. Вибір кінематичних параметрів  $v$  і  $\gamma$ .
2. Визначення швидкості метання плакуючої компоненту.
3. Обчислення значення коефіцієнта навантаження.
4. Вибір початкової величини технологічного проміжку.
5. Визначення маси заряду ВР, що метає.

Відомий також принциповий алгоритм розрахунку режимів процесу для випадку плакування вибухом за паралельною схемою [46, 50]:

1. Визначається швидкість точки контакту  $v_k$ , м/с (або швидкість руху вершини кута зустрічі поверхонь, що стикаються вздовж з'єднання).

Значення  $v_k$  зазвичай вибирається з діапазону  $(0,4...0,6)C_0$  де  $C_0$  - швидкість звуку в металі. Оптимальним визнається [49] коефіцієнт 0,577. Для подальших розрахунків приймається менше значення з двох для поєднання металів, що з'єднуються.

Як правило,  $v_k$  складає 2000...2500 м/с, причому для ряду композицій, область зварюваності яких досить вузька (алюміній + мідь, алюміній + сталь, титан + сталь, титан + мідь, алюміній + титан та деяких інших), слід прагнути до нижньої межі цього діапазону [51].

## 2. Вибір параметрів заряду вибухової речовини.

До цих параметрів відносяться тип ВР, вміст ВР в суміші, висота заряду. Ці параметри повинні забезпечувати необхідну швидкість  $D$  детонації ВВ заряду, яка для паралельної схеми дорівнює швидкості точки контакту  $v_k$  [49]. Практично плакування вибухом у промисловості здійснюється насипними ВР, які мають у широких межах може змінюватися щільність, унаслідок чого помітно змінюється швидкість детонації. Чим вища щільність, тим вища швидкість детонації.

У переважній більшості випадків для вирішення практичних завдань у світовій практиці використовують свіжоприготовлені суміші амоніту № 6ЖВ (ГОСТ 21984-76 "Речовини вибухові промислові. Аммоніт № 6ЖВ та амонал водостійкі. Технічні умови". Аммоніт № 6ЖВ – Аммоніт № 6ЖВ %, аміачна селітра – інше)) або його аналогів з аміачною селітрою, кварцовим піском, кухонною сіллю, тальком та іншими інертними наповнювачами [46, 52]. Ці суміші добре вивчені, а їх детонаційні характеристики представлені у вигляді таблиць, графіків або емпіричних залежностей, використовуючи які і заздалегідь задавшись складом суміші, визначають висоту заряду  $H$ , що забезпечує необхідну швидкість детонації  $D$ , рівну  $v_c$ .

Згідно з [50], для суміші амоніту № 6ЖВ з аміачною селітрою можна використовувати залежність [52]

$$H = \left( \frac{V_k}{121,5 \cdot C^{0,492}} \right)^{3,17}, \quad (3.3.1)$$

де  $C$  – відсотковий вміст амоніту в суміші.

Відповідно до цього розрахунок швидкості детонації  $D$  (яка дорівнює  $v_c$ ), проводиться з використанням роботи [50].

$$D = 121,5 \cdot C^{0,492} \cdot H^{0,3152}, \quad (3.3.2)$$

Для обраної суміші визначають також насипну щільність  $\rho_{\text{ВР}}$ , що впливає швидкість зіткнення і залежить від складу ВР. Для суміші амоніту з гранульованою аміачною селітрою її величина досить точно розраховується за емпіричною формулою наведеною у [50]:

$$\rho_{\text{ВВ}} = -1,43 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 - 1,22 \cdot 10^{-3} \cdot C + 1, \quad (3.3.3)$$

3. Далі, для пари матеріалів, що з'єднуються, визначають критичне значення питомої енергії, що витрачається на пластичну деформацію металу в зоні з'єднання елементів  $W_{2\text{кр}}$ , МДж/мм<sup>2</sup>. При плакуванні однойменних металів рівномічні сполуки утворюються при величинах  $W_{2\text{кр}}$ , які обчислюються згідно з рекомендаціями, викладеними у [50]:

$$W_{2\text{кр}} = 0,606 + 0,184 \cdot \ln\left(\frac{\text{НВ}}{\delta}\right), \quad (3.3.4)$$

де  $\text{НВ}/\delta$  – критерій Астрова – ставлення твердості металу по Брінеллю для його відносного подовження, %.

Згідно з [50] при плакуванні різнорідних металів у рівнянні (3.3.4) рекомендується використовувати характеристики пластичного металу [49].

З отриманих значень  $W_{2\text{кр}}$  для подальших розрахунків вибирається менше, тобто відповідне пластичному матеріалу пари. Для плакування вибухом сталі зі сталлю  $W_{2\text{кр}}$  становить 0,8...0,9 МДж/м<sup>2</sup>. При плакуванні різнорідних металів  $W_{2\text{кр}}$  приблизно дорівнює його значенню для більш "м'якого" (більш пластичного [46]) металу пари.

4. Потім визначається мінімально необхідна  $v_{\text{с.кр}}$  та гранично допустима  $v_{\text{с.пр}}$  швидкості зіткнення. Розрахунок мінімально необхідної швидкості зіткнення проводиться згідно з [50]:

$$V_{c.кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_1 \cdot h_1 + \rho_2 \cdot h_2) \cdot W_{2кр}}{\rho_1 \cdot h_1 \cdot \rho_2 \cdot h_2 \cdot \left[1 - \left(\frac{V_k}{C_0}\right)^2\right]}}, \quad (3.3.5)$$

По суті, отримане значення  $v_{c.кр}$  визначає положення нижньої (критичної) межі зварювання обраної пари матеріалів із заданою товщиною (масою) плакуючого та основного елементів. Враховуючи, що для більшості композицій положення верхньої (граничної) межі зварювання в даний час не визначено, для оцінки питомої граничної енергії  $W_{2пр}$  додають до  $W_{2кр}$  деяку величину  $\Delta W_2$ . Зазвичай для таких пар металів, як алюміній + мідь, алюміній + сталь, титан + сталь, титан + мідь, алюміній + титан та інших вона становить 0,3...0,5 МДж/м<sup>2</sup>, а інших металів, що відрізняються широким діапазоном зварюваності, – 0,8...1,0 МДж/м<sup>2</sup>.

Підставивши (3.3.5) замість  $W_{2кр}$  значення  $W_{2пр} = W_{2кр} + \Delta W_2$ , розраховують граничне значення швидкості зіткнення  $v_{c.пр}$ , м/с. Розрахунок проводиться з використанням роботи [50].

$$V_{c.кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_1 \cdot h_1 + \rho_2 \cdot h_2) \cdot (W_{2кр} + \Delta W_2)}{\rho_1 \cdot h_1 \cdot \rho_2 \cdot h_2 \cdot \left[1 - \left(\frac{V_k}{C_0}\right)^2\right]}}, \quad (3.3.6)$$

З діапазону

$$V_{c.кр} < V_c < V_{c.пр} \quad (3.3.7)$$

Значення швидкості зіткнення  $v_c$  вибирається з використанням роботи [50].

При цьому будь-яке значення  $v_c$  з діапазону (3.3.7) має забезпечувати утворення міцного з'єднання. В ідеальному випадку найкращими властивостями, з точки зору мінімізації структурної та хімічної неоднорідностей, будуть мати сполуки, отримані при  $W_{2кр}$ . Однак, при виборі

$v_c$  з діапазону (3.3.7) обов'язково слід мати на увазі можливі випадкові відхилення настановних параметрів від розрахункових, обумовлені, наприклад, кривизною листів, що з'єднуються, неточностями складання пакета, нерівномірною щільністю ВР і т. п. Особливо сильно вплив технологічних похибок проявляється при малих відносинах  $h/H$  [49, с. 20]. У зв'язку з цим результат розрахунку за залежністю (5) спочатку слід збільшувати на 15...20%.

5. Розраховується необхідна відстань між плакуючим та основним елементами (технологічний зазор)  $h$ .

При розрахунку за моделлю одновимірної схеми метання (що плакувальний і основний елементи, що стикаються, стикаються по всій площі і від контактної поверхні поширюються плоскі ударні хвилі), вибравши з діапазону (3.3.7) значення  $v_c$ , розраховуються параметри  $\eta$  і  $v_v$  [49, с. 7]. Розрахунок проводиться з використанням роботи [50].

$$\eta = \frac{16}{27} \cdot \frac{H \cdot \rho_{BB}}{\rho_1 \cdot h_1}, \quad (3.3.8)$$

$$\theta_v = \frac{1 + \eta \cdot \left(1 - \frac{v_c}{D}\right) + \sqrt{\eta^2 \cdot \left(1 - \frac{v_c}{D}\right)^2 - 2 \cdot \eta \cdot \frac{v_c}{D}}}{1 + 2 \cdot \eta}, \quad (3.3.9)$$

Можлива ситуація, коли підкорене вираз у (9) виявиться негативним [32]. Це означає, що обране поєднання вихідних даних (склад суміші та розрахована для значення  $D$  висота заряду  $H$ ) не забезпечує розгін плакуючого елемента, що метається, до необхідної швидкості зіткнення  $v_c$ . У цьому випадку слід збільшити висоту заряду  $H$  (по суті, з, що входить, зокрема, у (9)) з одночасним розведенням сумішевого ВР інертними компонентами для забезпечення сталості швидкості  $D$  детонації ВР.

Розрахунок розміру зазору проводиться з використанням роботи [50]:

$$h = H \cdot \frac{(1 - \theta_V)^2}{(1 + 2 \cdot \eta) \cdot \theta_V^2 - 1}, \quad (3.3.10)$$

Є також інший вираз до розрахунку  $h$ . Для двовимірної моделі метання, що виникає, коли плоский заряд ініціюють у певній заданій точці і зіткнення плакуючого та основного елементів відбувається під деяким кутом [32]:

$$h = \frac{0,184H}{\frac{H \cdot \rho_{BB}}{\rho_1 \cdot h_1} \cdot \left[ \frac{\left( \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right) \cdot \pi}{4 \cdot \arcsin\left(\frac{V_c}{2 \cdot D}\right)} - 1 \right]^{-2,71}}, \quad (3.3.11)$$

де  $k$  - показник політропи продуктів детонації.

Слід зазначити, що розрахунки залежностям (10) і (11) дають трохи завищені значення зазору  $h$ . Крім того, вказується, що в ряді випадків умова (3.3.7) не завжди здійсненна.

Отже, розрахунок режимів плакування за наведеними вище залежностям, здебільшого громіздким, дуже трудомістко, ще, передбачає оптимізації режимів.

Після проведення розрахунків визначили основні параметри процесу зварювання (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Розрахункові параметри

Найменування	Позн.	Значення
Мінімально необхідна швидкість зіткнення	$V_{c,кр}$	$\approx 2500$ м/с
Граничне значення швидкості зіткнення	$V_{c,пр}$	$\approx 3600$ м/с
Швидкість зіткнення	$V_c$	$\approx 3200 \dots 3400$ м/с
Зазор	$h$	$\approx 0,5$
Кількість потрібної маси ВР	$M$	$\approx 600$ гр

По результатам розрахунків отримуємо необхідну масу ВР. Так як для забезпечення рівномірного обтискання потрібно забезпечити рівномірне розташування ВР уздовж катоду, то доречно використовувати детонуючий шнур для ініціації одночасного підриву заряду.

### 3.4 Схема підготовки

Зварювання вибухом з властивих їй особливостей одна із найефективніших, а деяких випадках єдино можливим способом створення високоякісних багат шарових матеріалів. Незважаючи на очевидні переваги технології, для отримання біметалів циліндричної форми цей спосіб має низку труднощів. При плакуванні довгомірних циліндричних заготовок (коли довжина виробу перевищує 10 зовнішніх діаметрів) виникає проблема зниження властивостей міцності з'єднання в міру віддалення від точки ініціювання процесу зварювання. Імпульсний характер навантаження металів, що зварюються, вимагає жорсткого дотримання всіх режимних параметрів процесу зварювання. В іншому випадку має місце поява тріщин і навіть руйнування металу. Точність складання технологічних схем особливо при зварюванні вибухом довгомірних виробів циліндричної форми визначає якість з'єднання. Навіть мінімальне відхилення в геометрії коаксіально зібраних елементів може призвести до появи зон несплошностей та неприварів, що знижує корозійну стійкість отриманого біметалу та його властивості міцності.

Технологічний процес для підготовки плакуванням вибухом складається з наступних кроків.

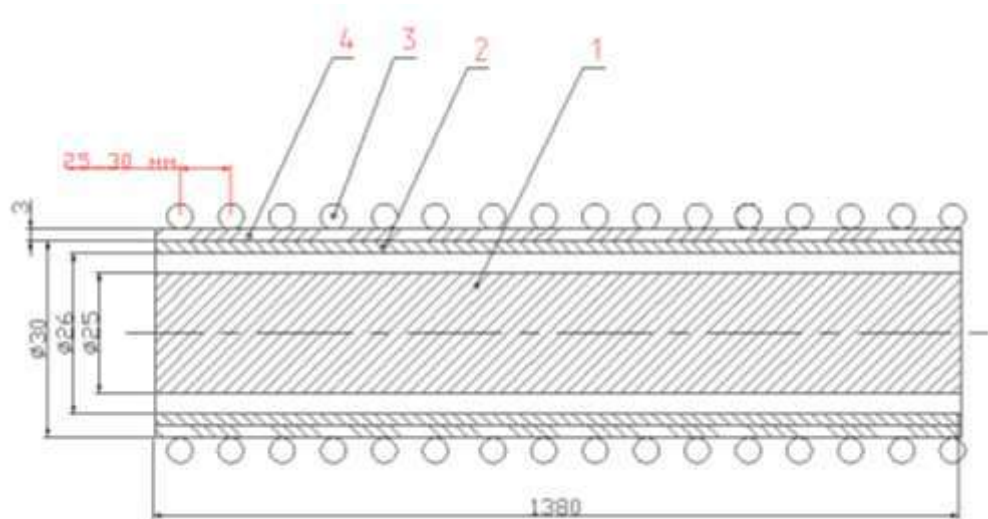
1. Очистка поверхонь деталей, що зварюються (дивись розділ 3.1.);
2. Складання пакету деталей, що плакуються.

Схема підготовки наведена на рисунку 3.3.1. Використовується складання з мідного стрижня 1 та співвісної труби з нержавіючої сталі 2, які коаксіально закріплюються в оснастці.

Ширина зварного зазору складає 0,5 мм.

Зверху пакет обгортається зарядом ВВ 4 (амоніт бЖВ+аміачна селітра) товщиною 5 мм. Для одночасної детонації заряду ВВ використовується детонуючий шнур 3, який намотується поверх заряду ВВ з кроком 20...25 мм та закріплюється.

Після цього пакет поміщується у вибухозахищену камеру, та закріплюється.



1 – мідний стрижень; 2 – труба з нержавіючої сталі; 3 – детонуючий шнур;  
4 – ВВ

Рисунок 3.3.1 – Схема підготовки до плакування

3. Підрив.

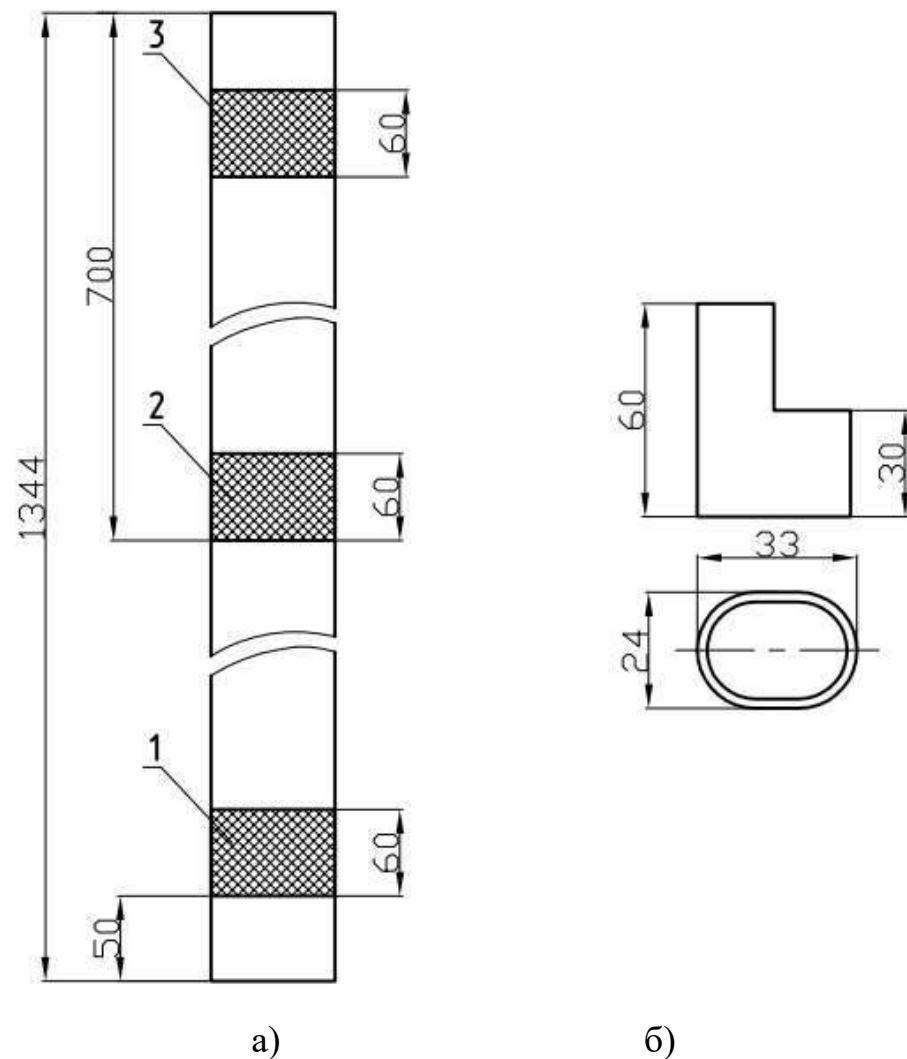
4. Після виконання зварювання виконується контроль зварного шву (УЗК). Доля не провару – не більше 3% по довжині деталі.

З країв та центру заготовки вирізаються зразки довжиною 60 мм для виконання контролю мікротвердості (на одній деталі з партії в 10 штук).

## 4 СТРУКТУРА ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

### 4.1 Схема відбору зразків

Для дослідження структури з'єднання від отриманого зваркою вибухом катоду були відібрані зразки згідно схеми (рис.4.1.) Місце відрізки зразку для перевірки наведено на рисунку 4.1.



а) – схема відбору зразків; б) – схема підготовки зразків.

Рисунок 4.1 – Схема відбору та підготовки зразків для досліджень

Зразок №1 – початок процесу зварювання

Зразок №2 – середина процесу зварювання

Зразок №3 – закінчення процесу зварювання.

Схема тривірневого відбору зразків дозволяє дослідити структуру зварного з'єднання від початку процесу до його закінчення. Тим самим виявити стабільність процесу, чи відхилення, які можуть виникати і мати відображення на з'єднанні. Також отримати інформацію про параметри вибухової хвилі, їхню можливу зміну в продовж процесу зварювання

#### 4.2 Дослідження макроструктури зварних з'єднань

Макроструктуру досліджували на торцевих поверхнях трьох відібраних зразків з кожного торця. Всього було досліджено шість торцевих темплетів, на яких не було виявлено дефектів типа непровару характерна мікроструктура наведена на рисунку 4.2.

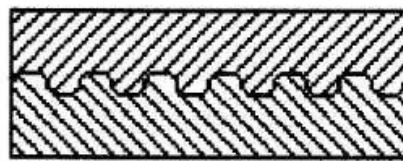


Рисунок 4.2 – Макроструктура на торці темплету

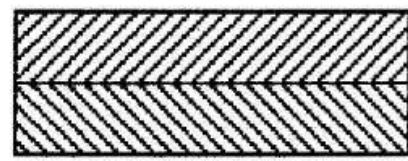
Макроструктура поздовжнього шву (рис. 4.3.) має характерний вигляд для з'єднання вибухом, тобто зубчастий (рис.4.4).



Рисунок 4.3 – Зразок для дослідження



а)



б)

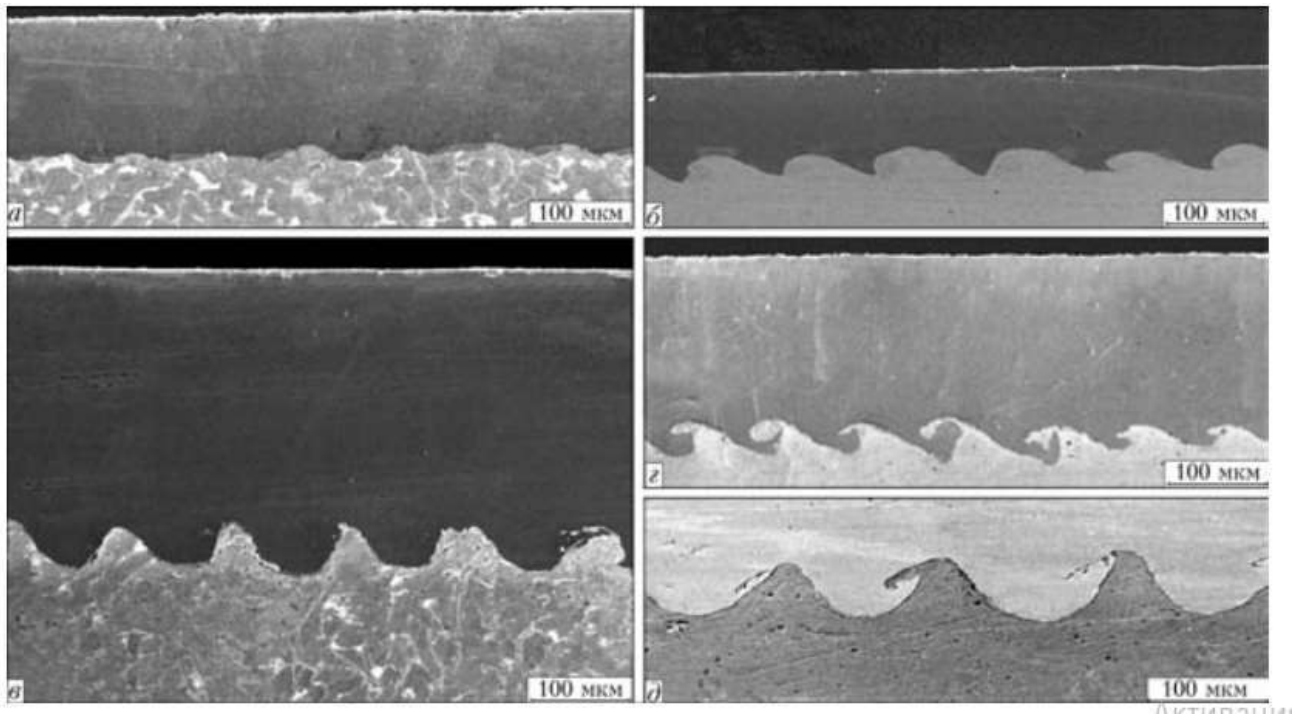
а) хвилеподібна форма; б) без хвилеутворення

Рисунок 4.4 – Макроструктура зварного шва

З'єднання (макрошліф) зазвичай має характерну хвилеподібну форму (рис.4.4а), але можуть зустрічатися з'єднання і без хвилеутворення (рис.4.4б).

На всіх досліджених зразках розмір (висота) зубчастого профілю рівномірний та однаковий та складає 0,5...0,7 мм.

Для прикладу наведена мікроструктура зварного шву при плакуванні вибухом для деяких матеріалів.

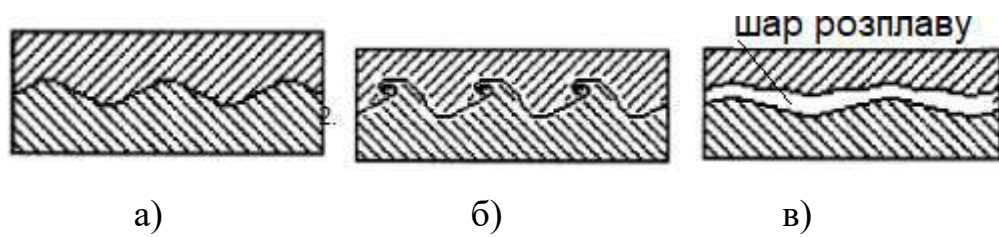


а – алюміній 200 мкм/мідь; б - титан 100 мкм/нержавіюча сталь; в -  
 бронза 300 мкм/сталь; г - молібден 0,2 мм/сталь; д – мідь 1 мм/сталь

Рисунок 4.5 - Мікроструктури металу, отримані при плакуванні  
 металевую фольгою за допомогою ВР [12]

#### 4.3 Мікроструктура та твердість зварного з'єднання

Високі тиски і швидкості деформації, надзвичайно інтенсивне локальне нагрівання і швидке тепловідведення в зоні з'єднання істотно впливають на структуру металів і процеси, що протікають в них. Незалежно від виду металів, що зварюються, слід розрізняти три типи сполук, одержуваних при різних значеннях параметрів процесу (рис.4.6).



а) - Пряма границя; б) - Границя з хвилеутворенням; в) – Границя з шаром розплаву

Рисунок 4.6 - Типи сполук, одержуваних при різних значеннях параметрів процесу [12]

Перший тип сполук характеризується прямою або синусоїдальною межею без утворення ділянок литої або кристалізаційної структури. Цей тип сполук характерний для не дуже інтенсивних швидкостей зіткнення і нагадує сполуки, отримані холодним зварюванням.

Другий тип - з яскраво вираженим хвилеутворенням та наявністю вихрових зон. У цих зонах зазвичай спостерігаються ділянки розплаву який закристалізувався з дендритною структурою і усадковими раковинами, пухкістю. При поєднанні різнорідних металів у вихрових зонах відбувається перемішування металів.

При форсованих режимах (збільшення швидкості переміщення динамічного кута зустрічі  $V_k$  та динамічного кута зустрічі) зони розплавів розширюються до утворення безперервного шару вздовж усієї межі контактування. З'єднання з безперервним шаром розплаву відносяться до третього типу.

Загальною властивістю всіх з'єднань, отриманих зварюванням вибухом, є помітне зміцнення металів поблизу контактних поверхонь.

Характерна мікроструктура зварного з'єднання наведена на рис. 4.7.

Можна бачити, що з'єднання між нержавіючою та мідною частиною щільне, без дефектів та порушення текстури. Твердість нержавіючої частини складає 33 HRC, що свідчить про ефект нагартівки, який виник під впливом пластичної деформації.

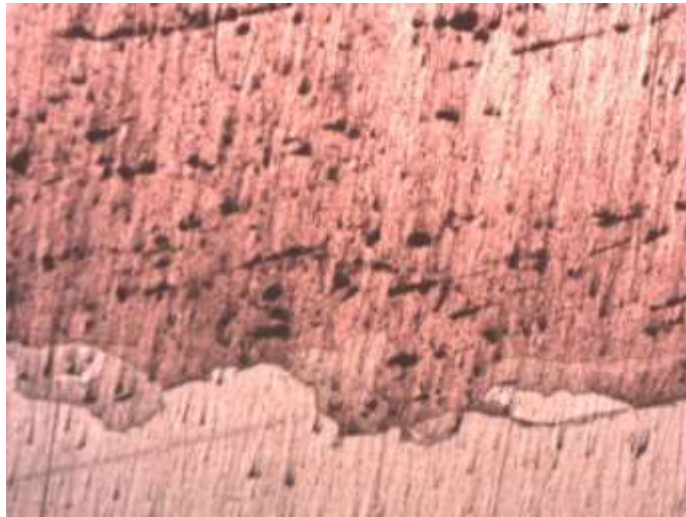


Рисунок 4.7 – Мікроструктура зварного шва (X150)



1 - зона перевірки для сталі; 2 - зона перевірки по зварному шву; 3 - зона перевірки по міді

Рисунок 4.8 – Схема випробувань зразка на твердість

Твердість мідної частини катоду складає 113HV1... 143HV1.

Отримані результати свідчать о підвищенні міцнісних властивостей матеріалах катоду що також характерно для матеріалів, які з'єднуються вибухом.

Діапазон значень твердості наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Діапазон значень твердості

Зона	Твердість
1	331HV1 (33 HRC)... 342HV1 (34,5 HRC)
2	319HV1 (32 HRC)... 359HV1 (36,5 HRC)
3	113HV1... 143HV1

Загальною властивістю всіх з'єднань, отриманих зварюванням вибухом, є помітне зміцнення металів поблизу контактних поверхонь (рис.4.9)

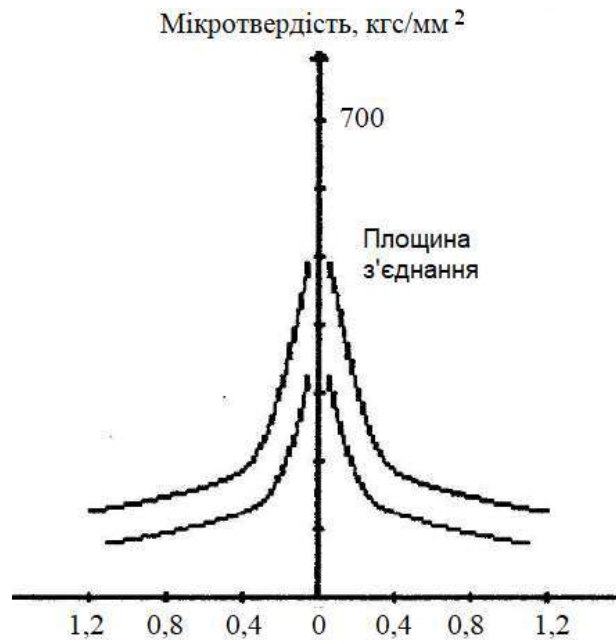


Рисунок 4.9 – Мікротвердість у зоні зварного шва [12]

## 5 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ

### 5.1 Область застосування й основні види неруйнуючих методів контролю (НМК)

У сучасній промисловості в процесі виробництва дуже часто використовуються дорогі матеріали, технологічно складні вироби, вузли, доступ до деяких частин яких обмежений. Перевірка кожного етапу виробництва дуже актуальна, тому що виробники прагнуть до надійності продукції, хочуть мінімізувати збиток і скоротити свої витрати. Контроль якості продукції є затребуваною технологічною операцією на всіх етапах виготовлення у виробництві й експлуатації техніки. Термін "контроль" у техніці означає перевірку відповідності продукції встановленим технічним вимогам (наприклад, певні лінійні розміри, товщина, твердість, зернистість та ін.). По етапах створення й використання продукції розрізняють контроль проектування (перевірка технічної документації постачальника, що надходить до замовника), операційний (контроль продукції під час виконання або після завершення технологічної операції) і приймальний (контроль продукції, за результатами якого ухвалюють рішення щодо її придатності до використання). По повноті охоплення розрізняють суцільний контроль і вибірковий. Суцільному контролю піддають тільки продукцію відповідального призначення, в інших випадках проводять вибірковий контроль. При вибіркового контролі можуть застосовуватися руйнуючі методи, що порушують придатність продукції до застосування, наприклад, механічні випробування на розрив, удар та інші. Неруйнуючі методи контролю не порушують придатність продукції до застосування. Як правило, не руйнуючими методами контролюють всю продукцію, що різко підвищує її експлуатаційну надійність. Важливість переходу від вибіркового контролю до суцільного зростає зі збільшенням складності контрольованого обладнання.

Областю застосування неруйнуючих методів контролю є машинобудування й, у тому числі, авіабудування. НМК використовують із метою виявлення неоднорідностей і порушень сплошності макроструктур об'єктів, відхилень у хімічному складі речовини, аномалій і дрібних дефектів деталей і в ряді інших випадків. До контрольованих параметрів відносять і міцність виробу, і якість нанесеного на поверхню покриття, і поведження деталей під і після навантаження. Методи НК дозволяють виявити вади всілякої природи - іржавіння, розтріскування, роз'їдання, а також багато інших. Неруйнуючі методи контролю включаються в поняття дефектоскопія. Дефектоскопія забезпечує можливість контролю на всіх стадіях життя особливо відповідальних деталей - від виготовлення до ремонту. Результати досліджень достовірні й при цьому виходять досить швидко. Дефектоскопічні прилади - надійні, мобільні, а головне, доступні як в умовах виробництва, так і при експлуатації виробів.

Розрізняють дев'ять видів неруйнуючого контролю: магнітний, електричний, вихретоковий, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний (ультразвуковий) і вплив проникаючими речовинами (капілярний).

Магнітні методи неруйнуючого контролю: виявлення дефектів магнітними методами засноване на тому, що в намагніченому тілі при наявності в ньому дефектів типу тріщин, раковин, сторонніх включень і т.п. навколо цих дефектів виникає розсіювання поля. Залежно від способу виявлення поля розсіювання розрізняють магнітопорошковий, магнітографічний, ферозондовий та інші методи магнітного контролю.

Вихретоковий контроль. При впливі на метали зовнішнього електромагнітного поля в них виникають вихрові струми (струми Фуко). Ці струми, у свою чергу створюють власне поле, спрямоване назустріч зовнішньому. У результаті взаємодії поля вихрових струмів з полем джерела електромагнітного випромінювання з'являється можливість одержати корисну інформацію про стан контрольованого металу.

Радіаційний вид НМК заснований на взаємодії проникаючих випромінювань із об'єктом контролю й реєстрацією результатів цієї взаємодії. У неруйнуючому контролі найпоширеніші електромагнітні й радіоізотопні джерела випромінювання. Оскільки витік або розпилення радіоактивної речовини може становити серйозну небезпеку, його поміщають у герметичну ампулу, яку розміщують в контейнер зі спеціальних матеріалів.

Акустичний контроль заснований на аналізі пружних коливань, які поширюються у твердому тілі. Пружні коливання можуть мимовільно виникати в тілі (наприклад, при поширенні тріщин), у цьому випадку контроль називається пасивним (емісійний метод). В інших випадках коливання спеціально збуджують у тілі, тоді контроль називають активним (всі інші методи акустичного контролю). Найбільше широко для неруйнуючого контролю використовується ультразвук, при чому на частотах порядку 1-5 МГц. На цих частотах стає можливим виявляти дефекти розміром близько 1мм. Основні методи акустичної дефектоскопії - тіньовий і ехо-метод. Незручність цього методу в тому, що він вимагає доступ до об'єкта контролю (ОК) із двох сторін. Цього недоліку позбавлені ехо-метод або метод відображення.

Капілярний метод дефектоскопії заснований на капілярному проникненні індикаторних рідин у порожнині поверхневих і наскрізних несплошностей об'єкта контролю й реєстрації індикаторних слідів, що утворюються, візуально або за допомогою перетворювача. Цей метод дозволяє виявляти поверхневі дефекти значно швидше й дошкульніше, ніж візуальний огляд.

Оптичний неруйнуючий контроль заснований на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом і реєстрації результатів цієї взаємодії. В оптичному контролі використовуються електромагнітні хвилі від ультрафіолетового до інфрачервоного діапазонів.

Оптичні методи контролю умовно можна розділити на три групи:

1. Візуальний і візуально-оптичний методи відрізняються простотою й доступністю й тому мають найбільше поширення.

2. Фотометричний, спектральний, телевізійний, в основному будуються на результатах апаратурних вимірів і забезпечують меншу суб'єктивність контролю.

3. Інтерференційний, дифракційний, поляризаційний, голографічний, рефрактометричний використовують хвильові властивості світла й дозволяють робити неруйнуючий контроль об'єктів із чутливістю до десятих часток довжин хвиль джерела випромінювання.

Кожний вид НК підрозділяється на методи, які класифікуються по наступних ознаках:

- характер взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом;
- первинний інформативний параметр;
- спосіб одержання первинної інформації.

Первинний інформативний параметр - конкретний параметр поля або речовини (амплітуда поля, кількість речовини й т.д.), зміна якого характеризує контрольований об'єкт. Наприклад, при просвічуванні рентгенівським випромінюванням наявність тріщини в об'єкті контролю збільшує амплітуду минулого випромінювання (джерело інформації - міждержавний стандарт ГОСТ 18353 "Контроль неруйнуючий").

Дуже часто застосування одного методу недостатньо для перевірки якості виробу по необхідних параметрах. У таких випадках використовують комплекс методів НК.

З огляду на те, що плакована сталь 12Х18Н10Т відноситься до ферромагнітних матеріалів, можна зробити висновок, що ультразвуковий метод є самим оптимальним для дослідження зварного шва даного катоду.

## 5.2 Контроль зварного шву ультразвуковим методом

Зварні шви є наймасовішою областю застосування ультразвукової дефектоскопії. Це досягається за рахунок мобільності ультразвукової установки, високої продуктивності контролю, точності, чутливості до внутрішніх (об'ємних – пори, металеві та неметалеві включення; площинних – непровари, тріщини), а також зовнішніх, тобто поверхневих дефектів зварних швів.

Для оцінки якості швів визначають такі характеристики дефектів:

- амплітуда ехо-сигналу, пропорційна площі проекції поверхні, що відбиває дефекту на площину, перпендикулярну осі ультразвукового пучка;
- умовна довжина, яка визначається довжиною зони переміщення перетворювача вздовж шва, в межах якої фіксується ехо-сигнал від виявленого дефекту;
- умовна висота, що дорівнює різниці значень глибини залягання дефекту, які вимірюють у крайніх положеннях похилого перетворювача при переміщенні його перпендикулярно до осі шва (крайніми є ті положення перетворювача, які відповідають появі та зникненню ехо-сигналу від дефекту на розгортці);
- число дефектів, що припадають на одиницю довжини шва;
- координати дефекту по перерізу та довжині шва.

Розташування дефекту в зварному шві визначають три координати:  $H$  – глибина залягання дефекту, що відраховується за нормаллю до поверхні;  $X$  – відстань від центру пучка випромінювача до дефекту вздовж зварної поверхні;  $L$  – відстань уздовж осі шва від будь-якої обраної точки відліку до дефекту.

Прилади ультразвукового контролю призначені для виявлення дефектів у різних виробках і конструкціях, і навіть вимірювання товщини різних об'єктів з одностороннім доступом до них.

Для виявлення дефектів використовуються ультразвукові дефектоскопи. Прилад комплектується ультразвуковим перетворювачем та датчиком положення. Також, як правило знадобляться стандартні зразки ультразвукового контролю - для товщиноміра вони використовуються для налаштування та перевірки точності вимірювання товщини, а для ультразвукових дефектоскопів ще й для налаштування чутливості та встановлення рівнів для бракування.

Для виконання операції контролю обираємо ультразвуковий дефектоскоп NOVOTEST УД2301.



Рисунок 5.1 - Ультразвуковий дефектоскоп УД2301

Ультразвуковий дефектоскоп УД2301 призначений для проведення неруйнівного контролю якості металів, пластиків, скла, композиційних матеріалів, контролю зварних швів та вимірювання товщини різних виробів та конструкцій.

Дефектоскоп дозволяє виявляти дефекти типу несплошностей та неоднорідності матеріалів у готових виробах та зварних з'єднаннях, вимірювати глибини та координати залягання дефектів, вимірювати товщини виробів, вимірювати швидкості поширення та згасання ультразвукових коливань (УЗК) у матеріалі.

Прилад дозволяє не тільки проводити контроль на наявність внутрішніх дефектів, але і вимірювати товщину виробів з великою точністю, виводити сигнал у вигляді В-сканів і має всі функції по повному документуванню контролю - всі результати вимірювань зберігаються на вбудовану в прилад пам'ять.

Дисплей дефектоскопа може працювати у будь-якій орієнтації. Зміна орієнтації здійснюється натисканням однієї кнопки.

Дефектоскоп оснащений акумуляторами стандартного типу – АА (пальчикові). Прилад також може працювати від звичайних батарей. Використання акумуляторів/батарейок стандартного типу дозволяє забезпечити автономність роботи приладу практично в будь-яких умовах.

Дефектоскоп дозволяє вирішувати широке коло завдань – від контролю зварних з'єднань до дефектоскопії великогабаритного лиття.

До основних переваг ультразвукової дефектоскопії відносяться висока чутливість методу, мобільність апаратури, оперативність отримання результатів, низька вартість контролю та відсутність радіаційної небезпеки.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 6.1 Аналіз потенціальних небезпек

а) Можливість ураження електричним струмом при виконанні частини дослідних робіт на виробничій ділянці, що може бути пов'язано з порушенням правил електробезпеки, зокрема, не використанням індивідуальних та групових заходів захисту, відсутністю надійних огорожень струмоведучих частин обладнання, що може привести до електричних травм або летальних наслідків;

б) Небезпеки, які пов'язані з підготовкою дослідницьких виробів, зокрема можливістю отримання механічних травм при виготовленні зразків для подальших досліджень внаслідок порушенням правил з охорони праці, зокрема невикористання спеціального одягу, використання несправного обладнання та інструменту, захаращеність робочого місця.

в) Небезпеки, які пов'язані з безпосереднім виконанням дослідницьких робіт.

г) Небезпеки, які пов'язані з використанням ПК при обробці результатів дослідження, зокрема негативний вплив електромагнітних полів та випромінювання ПК застарілих моделей.

д) Незадовільні параметри повітряного середовища на ділянці та дослідницькому приміщенні. Причинами цього є незадовільна робота системи опалення й кондиціонування, що може привести до зниження працездатності й загальних захворювань.

е) Незадовільне освітлення виробничих зон на ділянці наплення, внаслідок виходу з ладу або забрудненості освітлювальних приладів, що може призвести до погіршення зору або механічних травм.

є) Можливість загорання ділянки напилена, внаслідок порушення правил пожежної безпеки, порушень технологічного процесу, що може призвести до пожежі.

ж) Небезпеки, які пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях. Зокрема укриття населення у захисних спорудах цивільного захисту. Причинами пов'язаними з неправильним або взагалі відсутнім укриттям населення в надзвичайних ситуаціях можуть бути недосвідченість персоналу або неправильні дії керівництва, що може привести до важких травм, летальних наслідків і масштабних руйнувань.

## 6.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

а) Для виключення уражень електричним струмом при плазмовому напиленні на інсталяції в дослідницькій лабораторії обладнання повинне відповідати правилам ПУЕ-2019«Правила улаштування електроустановок», де передбачено:

- струмовідні частини електроустановки, не повинні бути доступними для випадкового прямого дотику до них, а доступні для дотику відкриті і сторонні провідні частини не повинні перебувати під напругою, що становить небезпеку ураження електричним струмом, як у нормальному режимі роботи електроустановки, так і в разі пошкодження ізоляції;

- для запобігання ураженню електричним струмом при непередбаченому торканні механізму подачі дроту, який знаходиться під напругою слід застосовувати окремо або в поєднанні такі заходи захисту від прямого дотику: розміщення поза зоною досяжності та надійне екранування або огороження цього механізму;

- для запобігання ураженню електричним струмом у випадку пошкодження ізоляції слід застосовувати окремо або в поєднанні такі заходи

захисту в разі непрямого дотику: захисне заземлення; автоматичне вимикання живлення; зрівнювання потенціалів; обладнання класу II або з рівноцінною ізоляцією; захисний електричний поділ кіл; ізолювальні (непровідні) приміщення, зони, площадки; системи наднизької (малої) напруги; вирівнювання потенціалів;

- розміщення обладнання установки для напилання, її вузлів та механізмів, а також органів керування повинно забезпечувати вільний, зручний та безпечний доступ до них. Окрім того, розташування органів керування повинно забезпечувати можливість швидкого вимикання обладнання та зупинення всіх його механізмів.

б) Для виключення отримання механічних травм повинне бути передбачене проведення усіх необхідних інструктажів з охорони праці, згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Дослідник повинен бути забезпечений спеціальним одягом та індивідуальними захисними засобами відповідно до ГОСТ 12.4.103-83 «Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты рук и ног. Классификация», або груповими засобами захисту згідно з ГОСТ 12.4.125-83 ССБТ «Средства коллективной защиты работающих от воздействия механических факторов. Классификация», до яких відносять брезентові захисні костюми, рукавиці брезентові, спеціальне взуття із захисними носками, щітки захисні або окуляри.

До порізки зразків абразивними колами допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли необхідні інструктажі з охорони праці і отримали допуск до самостійної роботи. При роботі з абразивними колами категорично забороняється:

- використовувати не за призначенням абразивні кола та інструмент;
- працювати без належного захисного одягу та обладнання;
- забороняється використовувати пошкоджені абразивні кола.

Отримання механічних травм найчастіше відбувається внаслідок захаращеності робочої ділянки та порушень правил експлуатації машин та механізмів. В зв'язку з цим обов'язковим є щоденний контроль за станом робочої зони зі сторони керівництва відповідно до ДСТУ 3273-95 «Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги».

в) Для виключення нещасних випадків при виготовленні дослідницьких зразків треба виконувати правила роботи з вибуховими речовинами.

Для мінімізації негативного впливу шуму необхідно:

-використовувати антифони(типу ВЦННІОТ) ГОСТ 12.4.051-87 «Средства индивидуальной защиты органов слуха. Общие технические требования», які захищають слухові органи людини і в той же час дозволяють чути розмовну мову;

- стіни робочого приміщення, де розташовується обладнання повинні бути покриті звукоізолюючим та звукопоглинаючим матеріалом (наприклад, гіпсова акустична плитка або плитка типу акмігран);

г) Загальні вимоги до техніки безпеки при роботі на комп'ютері

Персонал, що працює на комп'ютері зобов'язаний дотримуватися вимог інструкції розробленої на підставі Санітарних норм і правил СанПин2.2.2.542-96 «Гігієнічні вимоги до відео дисплейних терміналів, персональних електророзрахункових машин і організації робіт», а також нести особисту відповідальність за дотримання вимог безпеки своєї праці і за створення небезпечного чи шкідливого виробничого фактора для інших працюючих і поломку комп'ютера.

При роботі за комп'ютером шкідливими чинниками є:

- електростатичні поля;
- електромагнітне випромінювання;
- наявність потужних іонізуючих випромінювань;
- локальне стомлення, загальна втома;
- стомлюваність очей;
- небезпека ураження електричним струмом;

- пожежонебезпека.

Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров'я протягом часу роботи з комп'ютером повинні встановлюватися регламентовані перерви. Перед початком роботи необхідно переконатися, що монітори комп'ютера мають антиблокове покриття з коефіцієнтом відбиття не більше 0,5. Покриття повинне також забезпечувати зняття електростатичного заряду з поверхні екрана, іскріння та неіонізуючих випромінювань. Необхідно перевірити робоче положення комп'ютера відстань між стіною з віконними прорізами і столом має бути не менше 0,8 м. При невеликій кількості робочих місць бажано розташовувати столи біля протилежної стіни щодо віконних прорізів. Відстань між робочими столами повинна бути не менше ніж 1,2 м. Не допускається знаходження другого робочого місця з боку задньої стінки комп'ютера. Оптимальними параметрами температури в кабінеті є 19-21, допустимими 18-22, відносна вологість повітря 62-55 %.

У приміщенні слід здійснювати наскрізне провітрювання для поліпшення якісного складу повітря, щодня проводити вологе прибирання.

Для зволоження повітря слід використовувати зволожувачі. У приміщенні повинно бути штучне і природне освітлення. Основний потік природного світла повинне бути ліворуч, не допускається праворуч, ззаду і спереду працює на комп'ютері, на вікнах повинні бути завіси в два рази більше ширини вікна. Забороняється застосування для вікон чорні завіси.

Приміщення, де знаходиться комп'ютери відноситься до пожежонебезпечного приміщення категорії «Б», тому необхідно мати вуглекислотний вогнегасник типу ВВК-5 і вміти ним користуватися. Звернути увагу на заземлення, тому що в комп'ютері використовуються мікросхеми, чутливі до статичної електрики. Звернути особливу уваги на цілісність ізоляції всіх кабелів та роз'ємів, щоб не виявити несподівано під напругою щодо землі. Забороняється самостійно відкрити комп'ютера, з-за високої напруги всередині. Виключається робота з комп'ютером і його периферійними пристроями з відкритим корпусом, самостійно перемикає

силові та інтерфейсні кабелі, проливати рідини і т.д. Робоче місце працюючого на комп'ютері передбачено обладнати спеціальними меблями; обертовим стільцем із змінною висотою сидіння і кута нахилу спинки. При роботі на комп'ютері працюючий повинен бути уважним, не відволікатися на побудову справи.

Під час роботи комп'ютера забороняється:

- залишати комп'ютер без нагляду;
- проводити ремонт;
- знімати корпус з комп'ютера.

Тривалість безперервної роботи з комп'ютером без регламентованої перерви не повинна перевищувати 2 годин. Під час регламентованої перерви з метою зниження нервно-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу гіподинамії та гіпокінезії, запобігання розвитку втоми доцільно виконувати комплекси вправ. Рівень шуму в приміщення під час роботи комп'ютерів не повинен перевищувати 50 дБА. Конструкція відео монітора повинна передбачати заходи, що забезпечують хорошу розбірливість зображення, незалежну від зовнішнього освітлення.

Категорично забороняється використання на робочому місці електронагрівальних приладів з відкритим елементом, відкритим вогнем. Користування електронагрівальними приладами з закритими нагрівальними елементами дозволяється тільки у спеціально відведених для цього місцях. Недотримання вимог до мікроклімату приміщення може не тільки різко знижувати продуктивність праці, викликати втрати робочого часу через збільшення числа помилок у роботі, але і приводити до функціональних розладів або хронічних захворювань органів дихання, нервової та імунної системи.

### 6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Для забезпечення оптимальних параметрів повітряного середовища згідно ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартів безпеки труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» на дільниці напилення, окрім місцевої вентиляції повинно бути передбачено влаштування загально обмінної вентиляції згідно ДСТУ 12.4.021-75 «Система стандартів безпеки труда. Системы вентиляционные. Общие требования», та системи водяного або парового опалення згідно СНиП2.04.05-91 «Строительные нормы. Отопление, вентиляция и кондиционирование».

Для забезпечення оптимальних фізичних параметрів повітряного середовища на дільниці плазмового напилення необхідно визначити продуктивність природної вентиляції  $L_{\Pi}$ :

$$L_{\Pi} = k \cdot V_{\Pi} = 2 \cdot 1512 = 3024 \text{ м}^3/\text{год.}, \quad (6.1)$$

де  $k$  – кратність повітрообміну на дільниці,  $k = 2$ ;

$V_{\Pi}$  – об'єм приміщення дільниці плазмового напилення.

При плазмовому напиленні покриттів у робочу зону оператора установки здійснюється виділення шкідливих речовин, концентрація яких значно перевищує допустимі норми згідно ГОСТ12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» (діоксид кремнію  $\text{SiO}_2$  у вигляді аерозолу конденсації –  $2 \text{ мг}/\text{м}^3$ , оксид хрому  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  –  $1 \text{ мг}/\text{м}^3$ ), тому необхідно розрахувати продуктивність місцевої витяжної вентиляції  $L_M$  (витяжного зонту):

$$L_M = a \cdot b \cdot V \cdot 3600 = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 1,5 \cdot 3600 = 2025 \frac{\text{м}^3}{\text{год.}}, \quad (6.2)$$

де  $a$  та  $b$  – розміри зонти в плані м,  $a \times b = 0,375 \text{ м}^2$ ;

$V$  – швидкість руху повітря, яке відсмоктується, в площині перерізу по кромці зонти,  $V = 1,5 \text{ м/с}$

Згідно з державними будівельними нормами ДБН В.2.5-28:2016 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення» на ділянці плазмового напилення необхідно здійснити належне освітлення робочих місць робітників.

Роботи на ділянці плазмового напилення покриттів слід відносити до II (роботи високої точності) та III (точні роботи) розрядом. На ділянці допускається природне, штучне та змішане освітлення. Природне освітлення може бути боковим, одностороннім та двостороннім верхнім. Коефіцієнт природної освітленості при верхньому та комбінованому освітленні повинен складати не менш ніж 5 %, при боковому не менше 15 %.

Штучна освітленість на робочому місці при системі комбінованого освітлення допускається не менше ніж 400 лк, при системі загального освітлення – не менше 150 лк.

У приміщенні для плазмового нанесення покриттів повинно бути передбачено аварійне освітлення, яке забезпечує продовження роботи при освітленості не менш ніж 10 % норми загального освітлення, а у проходах – не менше 0,3 лк.

#### 6.4 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки визначаються відповідно до вимог НАПБА.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) приміщень ділянки визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016

«Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок завибухопожежною та пожежною безпекою».

Комплекс протипожежних заходів для приміщення розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщенні - згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» можлива пожежа класів – А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В); - відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за завибухопожежною та пожежною безпекою», воно належить до категорії «Д» з пожежної безпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення ділянки належить до виробництв категорії «Д» з пожежної безпеки, тому згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості. Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні ділянки встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВК6». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика. Оскільки приміщення ділянки має площу 900 м<sup>2</sup>, тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮ України 23.02.2018 р. за № 225/31677 для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 45 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м<sup>2</sup> площі приміщення).

## 6.5 Заходи по забезпеченню безпеки в умовах надзвичайних ситуацій

Заходи, які пов'язані з небезпекою роботи в умовах надзвичайних ситуацій Порядок дій сил цивільної оборони (ЦО) при ліквідуванні наслідків стихійних лих.

У більшості випадків стихійні лиха супроводжуються загибеллю матеріальних цінностей, а іноді і людськими втратам. Тому при ліквідації наслідків стихійних лих основним завданням сил ЦО є врятування людей і (по можливості) матеріальних цінностей. Успіх дій формувань багато в чому залежить від своєчасної організації і проведення розвідки й обліку конкретних умов обстановки. Оскільки стихійні лиха виникають раптово, оповіщення о.с. формувань, їх комплектація і створення угруповань сил ЦО повинні проводитися в найкоротший термін. Виступ формувань з районів збору в райони дій повинен здійснюватися з максимально можливою швидкістю. Командири формувань у районах робіт повинні постійно знати обстановку і, у відповідності з її зміною, уточнювати раніше поставлені чи ставити нові завдання підрозділам.. Прогнозувати загрози повеней дозволяє вчасно здійснити комплекс попереджувальних заходів, які значно знижують можливі збитки, а також створити сприятливі умови для проведення рятувальних та інших невідкладних робіт у зонах затоплення. Зміст цих заходів і їх обсяг визначаються часом попередження повені.

Так, масштаби повеней, які викликаються весняними водами, можна прогнозувати за місяць і навіть більше завдяки постійним спостереженням органами гідрометеослужби, визначенню висоти снігового покриву і встановленню залежності виникнення повені від нього, визначенню запасів вологи в ґрунті, знанню строків скресання річок, температури повітря в період паводку і т.п. Отже, можна заздалегідь провести протипаводкові заходи.

При паводках, які викликаються заторами, час попередження звичайно обчислюється декількома годинами, тобто він значно менший, ніж у розглянутому вище випадку. Але з огляду на те, що місця постійних заторів звичайно відомі, запобіжні заходи можна взяти задовго до льодоходу.

Паводки, які викликаються випаданням рясних злив та інтенсивним таненням льодовиків, прогнозуються на основі багаторічних спостережень.

Про майбутню небезпеку повені чи селевого потоку оповіщаються всі організації і населення. Начальники, штаби і служби ЦО приводять у готовність формування, які залучаються до ведення боротьби зі стихійним лихом, ставлять їм завдання, вказують послідовність, способи і терміни їх виконання, уточнюють питання взаємодії й організують управління.

Для виявлення й уточнення обстановки організується розвідка. Найбільш оперативною є повітряна, яка до того ж дає можливість одержання інформації про значні території. Більш точний стан поблизу гребель і мостів визначають, використовуючи дані наземної розвідки.

У населених пунктах і на об'єктах, яким загрожує затоплення, виставляють рятувальні пости зі складу формувань і встановлюється зв'язок з ними. Для захисту мостів, гребель, водозабірних та інших споруд виділяють аварійні команди. У місцях, де можливі затори льоду, встановлюється цілодобове чергування команд підричників. За рішенням місцевих органів влади можуть бути проведені: завчасна евакуація населення, вивезення матеріальних цінностей і відгін сільськогосподарських тварин у безпечні місця. Про початок і порядок евакуації керівний склад ЦО оповіщає населення по місцевих каналах радіотрансляції і телебачення, через адміністрацію ОГ і домоуправління. У випадку раптових паводків попередження населення здійснюється всіма наявними технічними засобами, включаючи і гучномовні рухливі установки.

Успіх у проведенні рятувальних робіт залежить від того, наскільки оперативно організована розвідка, швидко і повно оцінена сформована обстановка, вчасно організовані дії сил і чітке управління ними.

РІНР у зонах затоплення і селевих потоків пов'язані з небезпекою, особливо при діях на воді, на льоду і при виконанні підривних робіт. Особовий склад, який залучається для цих цілей, повинен бути навчений правилам поведінки на воді, прийомам порятунку потопаючих і надання їм першої медичної допомоги. Формування, що діють на плавзасобах, оснащуються необхідним інвентарем: рятувальними кругами, поясами, баграми, драбинами, канатами і т.п.

Для підтримки порядку в районах затоплення, на шляхах евакуації населення й у місцях його зосередження, на маршрутах рух сил, а також на автомобільних і залізничних шляхах організується комендантська служба. Крім того, у зонах затоплення і місцях зосередження евакуйованого населення організується охорона громадського порядку, яка гарантує безпеку людей, захист державного й особистого майна.

Урагани, володіючи руйнівною силою, можуть задати населенню і народному господарству серйозних матеріальних збитків і нерідко призводять до загибелі людей. Виникають вони в результаті різкого порушення рівноваги в атмосфері, що виявляється в незвичайних умовах циркуляції повітря.

При ураганах обриваються електричні проводи на опорах, порушується телефонний і телеграфний зв'язок, зриваються покрівлі з житлових будинків, виробничих будинків і тваринницьких ферм, виникають різні пошкодження, аварії, пожежі.

У зонах ураганів у період їх виникнення за вказівками органів влади оповіщається населення и приводяться до готовності формування, виділені для ліквідації наслідків стихійних лих.

Командири військових частин і формувань ЦО, одержавши завдання, виводять підлеглі їм сили до об'єктів робіт; по прибутті в потерпілі від урагану райони організують порятунок людей, надання потерпілим медичної допомоги і їх евакуацію, локалізацію і гасіння пожеж, а також роботи з усунення аварій і ушкоджень на комунально-енергетичних мережах

і лініях зв'язку та з розчищення завалів улиць і доріг. Відновлення комунально-енергетичних мереж, ліній зв'язку й інших об'єктів організують відповідно відомства, що мають свої спеціальні ремонтні органи; при великих обсягах робіт можуть використовуватися аварійно-відбудовні й аварійно-технічні формування.

Зсуви можуть спричиняти великі руйнування. Виникають вони через порушення рівноваги порід, викликаного збільшенням крутизни схилу в результаті вимивання його морським прибою, течією річки, ослабленням міцності порід від вивітрювання чи надмірного зволоження атмосферними опадами або підземними водами, а також під впливом зовнішніх сил, особливо сейсмічних поштовхів. Зсуви можуть бути викликані і проведенням будівельних робіт без належного урахування геологічних умов місцевості.

Заходи для попередження зсувів і боротьба з ними здійснюються в залежності від факторів, які ці зсуви викликають. До таких заходів відносяться: будівництво споруд, які укріплюють берег проти вимивання схилів; обладнання дренажних споруд по перехопленню і відведенню підземних вод; вириття каналів для поверхневого водостоку, улаштування підпірних стінок різних конструкцій; зміцнення схилів рослинністю і насамперед – лісопосадками.

Роботи з проведення протизсувних заходів ведуться дорожньо-будівельними й іншими спеціалізованими організаціями, до їх виконання при необхідності можуть залучатися команди механізації робіт та інші формування ЦО. Дійовим засобом у зсувних районах є встановлення постійного спостереження за обстановкою. Про початок переміщення порід негайно оповіщається населення й організації прилеглих районів. Приводяться у готовність необхідні сили і засоби, здійснюється евакуація людей, вивозяться з небезпечної зони матеріальні цінності.

Для ліквідації наслідків зсувів зведені загони та команди, зведені загони і команди механізації робіт, деякі формування служб. Можуть використовуватися і військові частини.

Рятувальні роботи в районах, де відбулися зсуви і обвали, полягають у пошуку і витягуванні людей з-під завалів, наданні їм першої медичної допомоги та евакуації в стаціонарні лікувальні установи. Одночасно влаштовуються проїзди в завалах, локалізуються і гасяться пожежі, ліквідуються аварії на газових і енергетичних мережах. Після зупинки зсуву проводиться ремонт і відновлення доріг, мостів, ліній і засобів зв'язку, розчищення вулиць від завалів. Землетруси відбуваються звичайно раптово, що може представляти дуже велику небезпеку. Переважна більшість їх відноситься до слабких і не викликає негативних наслідків, однак чимало буває і сильних, руйнівних землетрусів, які заподіють чисельні лиха. Землетруси можуть стати причиною гірських і сніжних обвалів, які руйнують на своєму шляху ділянки доріг, мости через водні перешкоди та населені пункти.

Щоб уникнути руйнівних наслідків у районах загрози, де можливі поштових силою 7 і більше балів (за 12-бальною шкалою), будуються сейсмостійкі житлові будівлі, промислові будівлі й інші об'єкти та споруди. Для додання будинкам стійкості використовуються високоякісні матеріали, застосовуються особливі антисейсмічні конструкції, не допускається використання надто важких деталей, обмежується поверховість житлових будинків, ставляться підвищені вимоги до якості будівельних робіт. У містобудуванні переважає просторе планування, яке забезпечує наявність достатніх розмірів між будинками, широких вулиць і проїздів. Вживаються заходи щодо підвищення сейсмостійкості підземних інженерних комунікацій, а також посилення протипожежної безпеки

При ліквідації наслідків землетрусів у постраждалих містах і на ОГ рішенням органів влади чи надзвичайних комісій для проведення рятувальних робіт, локалізації і ліквідації аварій на комунально-енергетичних мережах і гасіння пожеж залучаються спеціалізовані формування відомств, формування ЦО міст і районів, військові частини. Найбільш складні рятувальні й інші невідкладні роботи виконують військові частини ЦО,

зведені загони і зведені загони механізації робіт, а також формування служб (спеціальні формування) різного призначення і, у першу чергу, аварійно-технічні і медичні.

Склад і дії при ліквідації наслідків землетрусів визначаються характером і обсягом руйнувань. Успіх багато в чому залежить від повноти і своєчасності одержання розвідувальних даних. Розвідка повинна установити характер руйнувань будівель і споруд, місцезнаходження і стан постраждалого населення, яке опинилося під завалами чи в частково зруйнованих будівлях і спорудах, ступінь пошкодження комунально-енергетичних мереж, визначити зони суцільних пожеж, можливість їх розвитку, а також розвідати шляхи підходу до об'єктів робіт. Ведеться вона розвідувальними підрозділами військових частин ЦО і розвідувальними формуваннями різного призначення, при цьому використовується інформація від органів МВС й інших відомств. Для визначення санітарно-епідемічного стану району землетрусу, виявлення кількості і стану потерпілих, установлення можливості розгортання медичних формувань і визначення потрібної кількості медичних сил проводиться медична розвідка.

Після одержання даних про обстановку і її оцінки уточнюються необхідні для ведення РІНР сили і засоби, їх завдання, створюються угруповання сил.

Виходячи з характеру забудови, наявності транспортних магістралей та інших місцевих умов, а головне – з характеру руйнувань, територія постраждалого міста (району) розбивається на ділянки й об'єкти ведення рятувальних робіт.

Швидке висування сил є одним з вирішальних факторів, що забезпечують успішність проведення рятувальних робіт. Але на шляху можуть зустрічатися різні перешкоди, завали, зруйновані мости, вогнища пожеж та інші перешкоди. Тому необхідно передбачити всі засоби забезпечення руху сил ЦО у вогнищах землетрусів. Чимале значення має порядок уведення техніки в зону руйнувань. У першу чергу підготовляються

шляхи для пропуску гусеничних машин, а потім колісного транспорту. Висування їх слід здійснювати по декількох маршрутах, щоб не знижувати мобільність колон і не допускати розтягування. На кожен маршрут висилаються формування чи підрозділи розвідки і загони забезпечення руху, підсилені протипожежними підрозділами і санітарними дружинами.

В результаті землетрусу основа для о.с. формувань загального призначення і спеціальних формувань ЦО районів, які попали в зону лиха, може виявитися в зонах руйнувань і сама буде потребувати допомоги. Тому можливо, що спочатку рятувальні роботи доведеться проводити на ОГ і в жилих кварталах обмеженими силами і засобами. У таких умовах першочерговими роботами повинні бути виявлення і витягування людей із зруйнованих будинків, з-під завалів, надання їм першої медичної допомоги й евакуація тих, хто потребує лікування, в медичні установи, а також улаштування людей, що залишилися без домівок. Рятування людей організовується в першу чергу з тих будинків, яким загрожують затоплення, пожежі, обвали. Лікарська допомога потерпілим здійснюється в загонах першої медичної допомоги, на медичних пунктах військових частин ЦО й у лікувальних установах, які збереглися. Потім їх вивозять у замиську зону або в лікарні сусідніх міст. Здійснення інших невідкладних робіт припускає в першу чергу усунення тих аварій на комунально-енергетичних і технологічних мережах, що створюють безпосередню загрозу для життя людей і насамперед аварій на комунікаціях зі СДОР. При ліквідації аварій на газопроводах негайно повинна бути припинена подача газу в мережу. Аварії на водопроводі, що проходить поблизу будівель і споруд, можуть спричинити затоплення; пошкоджені ділянки якомога швидше відключаються. В міру прибуття військових частин і формувань із сусідніх районів, міст і областей сили будуть наростати і фронт робіт збільшиться. Але прибуваючі з інших місць не знають особливостей ділянок і об'єктів, на яких їм потрібно буде працювати. Щоб уникнути збільшення строків виконання рятувальних робіт і ускладнень у їх організації, необхідно

безперервно вести розвідку, дані якої дозволяли б знати обстановку, і вчасно, з достатньою повнотою ставити завдання прибуваючим у район землетрусу військовим частинам і формуванням. Рятувальні роботи звичайно ведуться у важких і небезпечних умовах, тому о.с. військових частин і формувань повинен знати і суворо дотримуватися заходів безпеки. Для наведення і підтримки порядку серед населення, яке опинилося в зоні землетрусу, організовується комендантська служба (ядром її є о.с. служби охорони громадського порядку), на основних маршрутах устанавлюються контрольні-пропускні пункти і вводиться патрулювання.

## ВИСНОВКИ

У результаті дослідження та розробки технології плакування вибухом для отримання біметалевого циліндричного катода можна зробити декілька ключових висновків.

По-перше, використання методу плакування вибухом виявилось ефективним засобом отримання біметалевого циліндричного катода. Цей високопродуктивний метод дозволяє досягти високої адгезії між біметалевими шарами, що важливо для забезпечення стабільності та тривалої роботи катода в екстремальних умовах.

По-друге, оптимізація параметрів плакування вибухом, таких як тиск, склад вибухової суміші та час обробки, дозволяє досягти бажаної товщини та структури біметалевого покриття, що визначає його фізичні та електрохімічні властивості.

По-третє, отриманий біметалевий циліндричний катод виявив високу стійкість до корозії та зберігав високу ефективність у різних середовищах, що свідчить про його потенціал для використання в різноманітних технічних та наукових застосуваннях.

Отже, впровадження розробленої технології плакування вибухом для отримання біметалевого циліндричного катода може бути перспективним кроком у вдосконаленні та розширенні застосувань біметалевих матеріалів в електрохімічних процесах.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Кобелев А. Г. Технология слоистых металлов / А.Г. Кобелев, И.Н.Потапов. – М. : Металлургия, 1991. – 248 с.
2. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по металлургическим, машиностроительным и общетехническим специальностям / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин; под ред. Ю. П. Солнцева. - 4-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург.: Химиздат, 2007. - 783 с.
3. Быков, А.А. Этапы развития производства биметаллов / А. А. Быков Металлург. - 2009. - №8. - С. 70-75.
4. Чепурко, М.И. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко. -Л.: Судостроение, 1984. - 272 с.
5. Селиванов, В.В. Взрывные технологии: учеб. для втузов / В.В.Селиванов, И.Ф Кобылкин, С.А. Новиков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. - 648 с.
6. Лысак, В.И. Сварка взрывом / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин - М.: Машиностроение, 2005. - 544 с.
7. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе. - М.: Металлургия, 1976. - 264 с.
8. Красулин Ю. Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. - М.: Наука, 1971. - 119 с.
9. Красулин Ю. Л. Дислокации как активные центры в топокхимических реакциях. Теорет. и эксперим. химия. - 1967. - III, вып. 1. - С. 58–65.
10. Красулин Ю. Л., Шоршоров М. Х. О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии. Физ. и хим. обработки материалов. - 1967. - № 1. - С. 89–97.

11. Шоршоров М. Х., Каракозов Э. С., Фоменко В. А. Особые виды сварки. - (Итоги науки и техники. Сварка; Т. 5). - М.: ВИНТИ, 1972. - С. 46–152.
12. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. - М.: Маш-е, 2005. - 544 с.
13. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Развитие представлений о нижней границе сварки взрывом // Автоматическая сварка - 2009., №9 - С. 7–13.
14. Wittman R. H. The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welded aluminium alloy // Use of explosive energy in manufacturing metallic materials of new properties: Mater. 2nd Intern. symp. - Marianske Lasne, 1973. - P. 153–158.
15. Cowan G., Holtzman A. Flow configuration in colliding plates// J. Appl. Phys. - 1963. - 34, № 4. - P. 928–939.
16. Walsh J. M., Shreffler R. G., Willig F. J. Limiting conditions for jet formation in high velocity conditions // Ibid. - 1953. - 24, № 3. - P. 349–359.
17. Беляев В. И., Девойно Д. Г., Касперович В. Б. О нижней границе режимов сварки взрывом // Порошк. металлургия. - 1978. - С. 51–56.
18. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1980. - 220 с.
19. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. - Минск: Наука і техника, 1990. - 205 с. 20. Карпенгер С. Сварка металлов взрывом. - Минск: Беларусь, 1976. - 43 с.
21. Петушков В. Г., Фадеенко Ю. И. О границах области сварки металлов взрывом с учетом влияния вязкости металлов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. - Волгоград: ВолГТУ, 1998. - С. 42–51.
22. Роман О. В., Смирнов Г. В., Ушеренко С. М. Динамика высокоскоростной деформации и кумулятивные эффекты при сварке металлов взрывом // - 1998. - С. 51–64.

23. Седых В. С., Соннов А. П. Определение «нижней границы свариваемости» металлов при сварке взрывом // Там же. - С. 63–66.
24. Смелянский В. Я., Рыскулов М. Т., Кожевников В. Е. К вопросу о расчете режимов сварки взрывом разнородных металлов // Там же. - С. 54–62.
25. Соннов А. П. Влияние исходной прочности соединяемых металлов на режимы их сварки взрывом // Там же. - С. 3–7.
26. Соннов А. П., Шморгун В. Г. Расчет нижней границы сварки взрывом однородных металлов // Там же. - С. 47–54.
27. Deribas A. A. Explosive welding: Weldability range // VII Intern. symp. on application of explosion to preparation of new materials, Sept. 11–14, 2006, Moscow. - Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2006. - P. 28–34.
28. Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Исследование соударения пластин со сверхзвуковой точкой контакта // Физ. горения и взрыва. - 1973. - 9, № 5. - С. 746–753.
29. Кузьмин С. В., Лысак В. И. Основные закономерности перехода к безволновым режимам формирования соединения при сварке взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. - Волгоград: ВолгГТУ, 1991. - С. 29–38.
30. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. - Минск: Наука и техника, 1976. - 224 с.
31. Шморгун В. Г., Пронин В. А., Жданов В. Д. К вопросу расчетной оценки рациональных режимов сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. - Волгоград: ВолгПИ, 1988. - С. 68–74.
32. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Энергетические параметры сварки взрывом многослойных композиционных соединений // Материалы междунар. симп. по использованию энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами. - 1979.- С. 152–162.

33. Седых В. С., Соннов А. П. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физ. и химия обработки мат-ов. - 1970. - № 2.- С. 6–13.
34. Добрушин Л. Д. К вопросу о нижней границе сварки взрывом // Автомат. сварка. - 1979. - № 6. - С. 64–65.
35. Айнбиндер С. Б., Клокова Э. Ф. Некоторые вопросы теории сцепления металлов при совместной пластической деформации // Изв. АН ЛатвССР. - 1958. - № 12. - С. 141–154.
36. Айнбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. - Рига: Изд-во АН ЛатвССР, 1957. - 162 с.
37. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Определение критических границ процесса сварки взрывом // Сварочн. пр-во. - 1973. - № 5. - С. 6–8.
38. Кузьмин С. В., Лысак В. И., Чувичилов В. А. Деформационно-временные условия формирования соединений при сварке взрывом // Сварка и диагностика. - 2008. - № 1. - С. 6–13.
39. Кривенцов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физ. и химия обработки материалов. - 1969. - № 1. - С. 132–141.
40. Ватник Л. Е., Кривенцов А. Н., Седых В. С. Некоторые особенности образования соединения при сварке взрывом листового биметалла // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. - Волгоград: ВолгПИ. - 1974. - Вып. 1. - С. 35–45.
41. Шморгун В. Г. Разработка технологии сварки взрывом титана со сталью по затратам энергии на пластическую деформацию в зоне соединения: Дис. ... канд. техн. наук. - Волгоград: ВолгПИ, 1987. - 163 с.
42. Пронин В. А. Обоснование и разработка технологии сварки взрывом электротехнических узлов из пластичных металлов зарядами пониженной мощности: Дис. канд. техн. наук. - Волгоград: ВолгПИ, 1986. - 230 с.

43. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Распределение температуры в околошовной зоне при сварке разнородных металлов взрывом // Автомат. сварка. - 2004. - № 4. - С. 9–12.
44. Первухин, Л.Б. Очистка свариваемых поверхностей от окислов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом / Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, С.Ю. Бондаренко // АС - 2010. - №7. - С. 46-49.
45. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б.Д. Цемахович, И. Л. Харина. - М.: Машиностроение, 1978. - 190 с.
46. Дерibas А. А., Захаренко И. Д. О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин // Физ. горения и взрыва. - 1975. - 11, № 1. - С. 151–153.
47. Wittman R. H. The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welding aluminium alloy // Use of explosive energy in manufacturing metallic materials of new properties: Proc. of 2nd Intern. conf. arianske Lazne, C v SSR, 1973. - Marianske Lazne, 1973. - S. 153–158.
48. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1980. - 222 с.
49. Otto G. Aspect relating to the central institute for industrial research // Proc. NATO, Oslo, Norway, 1964. - P. 1435–1441.
50. Методика розрахунку та вибору оптимальних режимів процесу плакирування вибухом плоских композицій / В.Ю.Коцюба, В.Г.Загорянський // NJoDoIS, 2021 № 57 – С.59-65.
51. Влияние состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О.Л. Первухина, А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин, Д.В. Олейников // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. - Волгоград: ВолгГТУ, 2006. - С. 59–64.
52. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. - М.: Машиностроение, 1987. - 216 с.
53. Физика взрыва / А. Ф. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др.- М.: Наука, 1975. - 704 с.

54. Сенокосов Е. С., Сенокосов А. Е. Плазменная электродуговая очистка поверхности металлических изделий // *Металлург.* - 2005. - № 4. - С. 44–47.

55. Использование методов сварки взрывом и взрывной термической обработки металлов для создания многослойных броневых композиций, имеющих повышенную пулестойкость и живучесть / В.К. Ашаев, Г.С. Доронин, Е. И. Ермолович и др. // *Вооружение, автоматизация, управление: Сб. науч. тр.* - Ковров, 2006. - С. 317–319.

56.. Чепурко, М.И. Производство биметаллических труб и прутков / М.И. Чепурко, В.Я. Остренко, А.А. Когадеев. - М.: Метал-я, 1986. - 240 с.

57. Титова, Т.И. Исследование служебных свойств и свариваемости биметалла нового поколения повышенной прочности и хладостойкости производства ОАО «Ижорские заводы» / Т. И. Титова, Э. С. Каган, И.Ф. Семернина // *Вопросы материаловедения.* - 2001. - №3(27). - С.73-76.

58. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках.-М.: Энергоатомиздат, 1985.-376с. Пістун І. П., Стець Р. Є., Трунова І. О. Охорона праці в галузі машинобудування: Навч. посіб. – Суми: Університетська книга, 2011. 557 с.

59. НПАОП 0.00-1.71-13 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями» Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 19.12.2013 року № 966.

60. НПАОП 0.00-4.12-05.Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. [На заміну ДНАОП 0.00-4.12-99, ДНАОП 0.00-8.01-93]. К. : Держнагляд охорони праці, 2005. 26с.- (Нормативно-правовий акт охорони праці).

61. Катренко Л. А., Кіт Ю. В., Пістун І. П. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум. [Текст] : Навч. посіб. – Суми: Університетська книга, 2009. – 540 с.

62. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

63. Технічний регламент безпеки машин [Електронний ресурс] – Чинний від 2013-08-12. : станом на 11.07.2018 р. – К. : КМ України, 2013. – 76 с. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/62-2013-п> – (Постанова).

64. ДСТУ ENISO 14120:2017 «Безпечність машин. Захисні огорожі. Загальні вимоги до проектування та будівництва стаціонарних і знімних захисних огорож».

65. Технічний регламент знаків безпеки і захисту здоров'я працівників, затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 25 листопада 2009 р. № 1262 (Офіційний вісник України, 2009 р., № 92, ст. 3118).

66. ДСТУ ENISO 14119:2017 «Безпечність машин. Блокувальні пристрої, з'єднані з огорожами. Принципи проектування та вибору».

67. ДСТУ EN 894-3:2017 «Безпечність машин. Ергономічні вимоги до проектування індикаторів і органів керування. Частина 3. Органи керування».

Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. [На заміну ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 ; чинний від 2014-05-30]. К. : МОЗ України, 2014. 37 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0472> (Державні санітарні норми та правила).

68. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс]:– Чинний від 1999-12-01. К. : МОЗ України, 1999. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>.

69. ГОСТ 12.1.005-88 (1991) «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

70. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К: Знання, 2014. 373 с. + 1 эл. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-617-07-0134-39.

71. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми).

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Наіменування	Кіл.	Прим.
				Документація		
А3			НУЗП. 442823. 001 СК	Складальне креслення		
				Деталі		
		1		Кришка	2	
		2		Стрижень	1	
		3		Оболонка	1	

НУЗП. 442823. 001

Зм. Лист N докцм. Підп. Дата

Розроб. Куліш  
Перев. Білоник

Підп. *[Signature]*  
Дата 22.12.2023

Н.контр. Корніснко  
Затв. Капуста

Підп. *[Signature]*  
Дата 21.12.2023

Циліндричний  
біметалевий катод

Літ. Аркуш Аркушів  
ДПМ 7

НУЗП ІТЗтаМК  
Гр. ІФ- 412м