

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(назва національного університету)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський)

(ступінь/магістерський рівень)

на тему АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ЗОН КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
В СИСТЕМІ СТАЛЬ-БРОНЗА ОТРИМАНИХ ІМПУЛЬСНИМИ  
МЕТОДАМИ ОБРОБКИ ТИСКОМ

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1362-омт

Клименко Максим Дмитрович

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(номер і назва)

спеціалізація

(номер і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(номер і назва)

Керівник к. т. н. доц. Бондаренко Ю.В.

(прізвище та ініціал)

(підпис)

Рецензент Белоконь Ю.О.

(прізвище та ініціал)

(підпис)

Запоріжжя – 2023 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий магістерський рівень  
другий (магістерський) рівень

Спеціальність 136.металургія  
(цифр і назва)

Освітньо-професійна програма обробка металів тиском  
(цифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри МТЕТБ  
Ю.О. Бєлоконь

“ 07 ” 05 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ**

Клименко Максим Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Аналіз перехідних зон композиційних матеріалів в системі бронза – сталь отриманими імпальсними методами обробки тиском

керівник роботи (проекту) Бондаренко Юлія Володимирівна к.т.н. доцент  
(фамілія, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “07” 05 2023 року № 632с від 01.05.2023

2. Строк подання студентом роботи (проекту) 01.12.2023

3. Викідні дані до роботи (проекту) Вивчення структури зони з'єднання, перехідної зони багатопшарових композицій із різнорідних металевих матеріалів, отриманих зварюванням вибухом, міцності з'єднання та механізму зчеплення шарів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналітично-пошукова частина. Дослідницька частина. Експериментальна частина. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
 Креслення, презентаційний матеріал 14 слайдів (на 14 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Розділ 1</i> <i>Аналітично-пошукова частина</i>	<i>Бондаренко Ю.В., доцент</i>	
<i>Розділ 2</i> <i>Дослідницька частина</i>	<i>Бондаренко Ю.В., доцент</i>	
<i>Розділ 3</i> <i>Експериментальна частина</i>	<i>Бондаренко Ю.В. доцент</i>	
<i>Розділ 4</i> <i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>Бондаренко Ю.В. доцент</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Бєлюк Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 07.05.2023

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Срок виконання етапів проекту (роботи)	Прийняв
1	<i>Вступ</i>	<i>до 30.11.2023</i>	
2	<i>Реферат</i>	<i>до 30.11.2023</i>	
3	<i>Аналітично-пошукова частина</i>	<i>до 30.06.2023</i>	
4	<i>Дослідницька частина</i>	<i>до 19.11.2023</i>	
4	<i>Експериментальна частина</i>	<i>до 26.11.2023</i>	
5	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>до 30.11.2023</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>до 30.11.2023</i>	

Студент \_\_\_\_\_ *М.Д. Кліменко*  
(ПІСЬОМ) (ПІСЬОМ ТА ПЕЧАТКОМ)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ *Ю.В. Бондаренко*  
(ПІСЬОМ) (ПІСЬОМ ТА ПЕЧАТКОМ)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної робота магістра: 83 с., 17 рис., 3 табл., 27 джерел посилань.

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ПЕРЕХІДНА ЗОНА, ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД, ЗВАРЮВАННЯ, ВИБУХ, СТАЛЬ, БРОНЗА, ПРОКАТУВАННЯ ШАР, СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ, ВЛАСТИВОСТІ, ПАРАМЕТРИ, ДЕФОРМАЦІЯ, КОМПОЗИТИ, МІКРОБУДУВАННЯ,

Об'єктом дослідження в роботі є зона зварного з'єднання між сталлюю та бронзою отриманими зварюванням вибуху

Метою роботи є: вивчення структури зони з'єднання, перехідної зони багатошарових композицій із різнорідних металевих матеріалів, отриманих зварюванням вибухом, міцності з'єднання та механізму зчеплення шарів.

Матеріали дослідження: пластина товщиною 1,5 мм зі сталі 20, товщиною 1 мм з бронзи (Pb-22%, Sn- 1,00%) і товщиною 5 мм з міді М1.

Мідь і сталь не мають значної взаємної розчинності, але, незважаючи на це, їх успішно піддають зварюванню вибухом.

Обстеження зони зварного шва за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу показало, що вздовж хвиль є ділянки, що містять зварювані матеріали, так і ділянки різкого концентраційного переходу.

В роботі показано, що в результаті механохімічної взаємодії в процесі зварювання вибухом у шаруватому композиційному матеріалі сталь 20-бронза, утворюються продукти реакцій у вигляді нерівноважних та рівноважних фаз.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА .....	10
1.1 Шарові металеві композиційні матеріали (КМ) : отримання ,структура та властивості.....	10
1.2 Фізична природа отримання нероз'ємних сполук КМ у твердій фазі.....	13
1.3 Методи отримання КМ.....	14
1.4 Загальні закономірності структуроутворення у КМ при деформаційному та високоенергетичному впливі.....	21
1.5 Формування структури КМ у процесі зварювання вибухом.....	23
1.6 Формування структури КМ у процесі пакетної прокатки.....	25
1.7 Особливості формування структури КМ із порошковими прошарками.....	26
1.8 Властивості КМ.....	28
2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	39
2.1 Вибір технологічних параметрів та схеми процесу ударнохвильового навантаження для отримання зварюванням вибухом багатошарового композиційного металевого матеріалу.....	39
2.2 Дослідження технологічних схем одержання зварюванням вибухом композиційного металевого матеріалу для виготовлення композитного різального інструменту.....	42
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	48
3.1 Матеріали дослідження.....	48
3.2 Структура композитів на основі міді та сталі , отриманих зварюванням вибухом.....	49
3.3 Мікробудування покриттів в композиті «мідь М1-сталь 20»...	52

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	62
4.1. Опис небезпечних факторів на прокатних станах .....	62
4.2 Установки нанесення покриттів .....	64
4.3 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).....	67
4.4 Готовність до аварійних та непередбачених ситуацій .....	76
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	82

## ВСТУП

В даний час вивчення питань вдосконалення технологій отримання композиційних матеріалів представляє величезний інтерес у розвитку сучасного машинобудування шляхом вирішення і основних завдань матеріалознавства. Традиційні матеріали не в силах вирішити покладені на них завдання, а саме забезпечити високий рівень фізико-механічних і експлуатаційних властивостей. Дослідження властивостей композиційних матеріалів і фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні контакту заготовок при імпульсному методі обробки металів, дає можливість отримувати матеріали з унікальними властивостями, що відкриває безліч нових можливостей для вирішення проблем машинобудування.

Особливий інтерес представляють композиційні матеріали з різноманітних металів, адже вони доповнюють один одного, об'єднують в собі різноманітні властивості, що обумовлює широке поле їх можливих застосувань. Так, композиційні матеріали на основі міді та сталі інтегрують в собі конструкційну міцність з високою температурою плавлення і теплопровідність. У підсумку отримуємо перспективний матеріал, який допоможе відкрити нові можливості наприклад, у виготовленні деталей вузлів електротермічного і теплообмінного обладнання.

Зварювання вибухом - один з видів імпульсного методу обробки металів, представляє собою високоінтенсивний короткочасний вплив і дозволяє отримувати багат шарові композиційні матеріали з поліпшеними властивостями, в тому числі високі характеристики міцності, корозійностійкими та жароміцними характеристиками. Структура перехідної зони визначає міцність з'єднання композиційних матеріалів, тому саме вона зазвичай є об'єктом дослідження. На сьогоднішній день існує багато думок щодо природи міцності з'єднання при зварюванні вибухом. Дослідники, що працюють в даній області, не прийшли до єдиної думки в цьому питанні:

обговорюються такі гіпотези, як локальне розплавлення матеріалів в перехідній зоні з подальшим їх переміщенням; інтенсивна пластична деформація прикордонних шарів; утворення нових фаз і ін. Мабуть, відсутність єдиної думки про структурні зміни в перехідній зоні пов'язано з фізико-механічними властивостями матеріалів, що з'єднуються, їх розмірами (товщиною) і параметрами обробки.



## 1 АНАЛІТИЧНА –ПОШУКОВА ЧАСТИНА

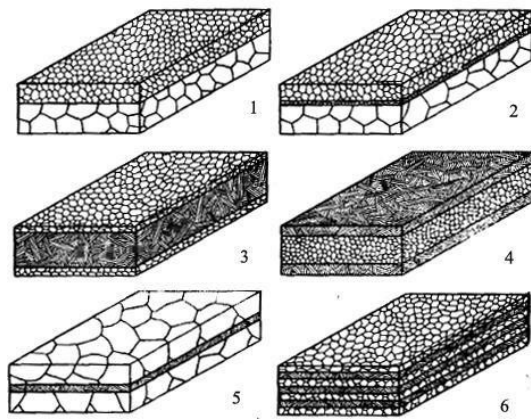
### 1.1 Шарові металеві композиційні матеріали (КМ) : отримання структура та властивості.

КМ входять до складу широкого класу сучасних композиційних матеріалів на металевій та неметалічній основі, які можуть бути класифіковані за такими ознаками як тип та природа матриці (метали, сплави, кераміка, полімери, склопластики) та наповнювача (шари, волокна, ниткоподібні кристали, дисперсні частинки), геометрія і схема розташування наповнювача в матриці, механізми зміцнення, також за способами отримання [1-2]. Автор роботи [2] ділить всі композиційні матеріали на композити матричного та шаруватого типу. Класифікація останніх наведено на рисунку 1.1а.

У роботі [3] наголошується, що найвищий рівень показників конструктивної міцності КМ забезпечується за товщини шарів 5-20 мкм. Вважається [4], що шари в КМ відповідно до їх функціонального призначення прийнято ділити на основні та плакуючі.

Основний шар відповідають за конструкційну міцність композиту, а плакуючі шари надають КМ більш високий рівень пластичності або забезпечують функціональні властивості.

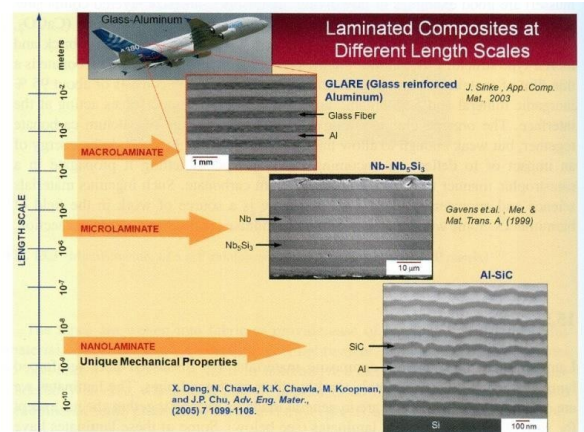
Історія створення та застосування шаруватих композитів з часів Стародавнього Єгипту і до теперішнього часу представлена в роботі [2], де зазначається, що перші відомі шаруваті композити були знайдені при розкопках єгипетських пірамід і відносяться до періоду близько 2700 до н.е. Пізніше концепція використання шаруватих композитів була реалізована при виробництві дамаської сталі, що містить високо-і низьковуглецеві сталеві прошарки, що чергуються.



а

1 – біметал з вуглецевої сталі та плакуючого шару з нержавіючої сталі або кольорових та рідкісних металів; 2 - те ж, що і 1, але з прошарком, що зв'язують два шари або бар'єрної; 3– високоміцна сталь із в'язким плакуванням для зменшення чутливості до надрізу; 4 – в'язкий внутрішній шар з високоміцним плакуванням для підвищення втомної міцності; 5 – високоміцний проміжний шар між двома в'язкими шарами; 6 – багатошарова композиції з чергуванням в'язких та високоміцних шарів

Рисунок 1.1 – Класифікація шаруватих композиційних матеріалів за типом геометрії та чергування шарів (а) [3] та за товщиною шарів (б) [5]



б

В даний час в літературі докладно описані особливості формування структури, фізико-механічних та функціональних властивостей, що одержуються різними способами КМ на основі різноіменних і різнорідних металів і сплавів систем Ti-Al, Cu-Al, Mg-Al, Mg-Al-Ti та ін. [2,4]. Вважається [3], що для КМ конструкційного призначення протікання на міжшарових межах фазових перетворень з утворенням інтерметалідів є небажаною реакцією, що охрущує з'єднання. Проте, методом деформаційно-термічної обробки отримано та всебічно досліджено нові шаруваті металоінтерметалідні композити типу Al-Ni, Al-Fe, Al-Ti з унікальним комплексом механічних та функціональних властивостей [5]. До більш складним за архітектурою КМ відносяться шаруваті гібридні композити, які

мають у своєму складі два або більше різних армуючих компонентів. Прикладом таких матеріалів є КМ, в яких шари з металевих матеріалів (алюміній, титан та ін) чергуються з шарами полімерних композиційних матеріалів. Вітчизняною розробкою в області шаруватих гібридних композитів є алюмосклопластика СІАЛ. Зарубіжним аналогом цього матеріалу є GLARE [6], що складається з шарів, що чергуються. алюмінієвої фольги та безперервних орієнтованих сіток високоміцних скляних волокон, просочених клеєм на основі епоксидної смоли.

В останні роки широкого поширення набули металоматричні (ММС – metal matrix composites) і, зокрема, алюмоматричні композити, армовані частинками оксидів алюмінію, кремнію та карбідів бору [7]. На основі цих матеріалів запропоновані ламіновані композити, що складаються з керамічних прошарків, розташованих як на зовнішній, так і на внутрішній частині шаруватого матеріалу [8].

Найбільш широке застосування в промисловості отримали КМ, що складаються з набору металів, що чергуються, у вигляді листових, пластинчастих і фольгових матеріалів, жорстко пов'язаних між собою по всій поверхні [9].

До переваг КМ перед традиційними металевими матеріалами відносяться підвищені межі витривалості та опір циклічним та динамічним навантаженням за рахунок гальмівного впливу міжшарових кордонів на розвиток тріщини [10]. Шаруваті композити, отримані на макрорівні (макроламінати), з різним типом матриці та наповнювача ефективно використовуються в таких галузях промисловості як транспортне та енергетичне машинобудування, суднобудування, авіакосмічній техніці як конструкційні, корозійностійкі, протибалістичні, надпровідні та радіаційні [2-6]. Провідникові та контактні мікрокомпозити (сталь-мідь, сталь-алюміній, мідь-алюміній) знаходять широке застосування в металургії, електротехніці та приладобудуванні [8]. Отримані зварюванням вибухом [9] композиційні труби та листи з алюмінію та його сплавів, знаходять застосування в

кріпильних елементах, струмопідводах, трубопроводах, ємностей для зберігання криогенних рідин, паливних та антиобмерзливих системах, а також у хімічних реакторах і суднових конструкціях.

### **1.22 Фізична природа отримання нероз'ємних сполук КМ у твердій фазі**

Механізм утворення нероз'ємної сполуки у твердій фазі в роботі [11] поділяють на три стадії: утворення фізичного контакту, активація контактних поверхонь та розвиток взаємодії в обсязі зон контакту. Поруч авторів [12] у роботах, що належать, в основному, до біметалічних матеріалів, починаючи з 50-60-х років минулого століття, запропоновано кілька гіпотез та теорій, що пояснюють фізичну природу отримання твердофазних сполук металів та сплавів.

Однією з них є *рекристалізаційна гіпотеза*, згідно з якою міцне з'єднання утворюється за рахунок формування загальних рекристалізацій зерен на межі шарів, де спостерігається великі деформації і локальне підвищення температур. Однак, на думку авторів [2-5] ця гіпотеза не пояснює виникнення сполуки за дуже низьких температур, що виключають можливість перебігу процесів рекристалізації.

*Дифузійна гіпотеза* пояснює з'єднання металів дифузійними процесами в зоні контакту, інтенсифікації яких сприяє високий тиск і викликана ним теплота.

*Дислокаційна теорія* пов'язує утворення з'єднання при спільному деформування металів з їхньою пластичною течією в зоні контакту, викликаним деформацією мікронерівностей, виникненням і рухом дислокацій, що призводять до утворення металевих зв'язків.

*Плівкова теорія* заснована на припущенні, що для утворення сполуки необхідно зближення чистих (ювенільних) поверхонь металів, що

з'єднуються на відстань міжатомної взаємодії.

*Енергетична гіпотеза* припускає, що для формування металевих зв'язків окрім зближення контактних поверхонь на відстань менше міжатомного необхідно, щоб енергія атомів досягла так званого порога схоплювання, при якому порушуються електронні конфігурації атомів металу.

Усі існуючі гіпотези науково обґрунтовані та мають експериментальну доказову базу. Однак з урахуванням нових результатів досліджень пропонується нове трактування даних теорій та гіпотез стосовно сполук, отриманих зварюванням вибухом [1]. Так, у роботі [13] висловлено припущення, що механізмом, що забезпечує зчеплення матеріалів при зварюванні вибухом, може бути утворення зон локального розплавлення та виступів на поверхні розділу.

### **1.3 Методи отримання КМ**

За класифікацією, наведеною в роботі [4], основні методи отримання КМ по поєднанню агрегатного стану на межі з'єднання складових діляться на твердофазні (обробка тиском), рідко-твердофазні (порошкова металургія), рідкофазні (методи просочення, екструзії в рідкій фазі, пошарового лиття та спрямованої кристалізації), газофазні та електрохімічні (методи осадження-напилення). У роботах [4,7,13] до основних методів виробництва шаруватих композитів відносять: ливарне плакування, гаряче та холодне пластичне деформування (прокатка, пресування, волочіння, гвинтова екструзія), зварювання вибухом, електрошлакова наплавка, комбіновані способи (лиття + прокатка, вибухом + прокатка і т.д.), накопичувальна пакетна прокатка зі з'єднанням шарів (ARB-процес) та рівноканальне кутове пресування (РКУП). Останні два способи згідно [7] відносяться до процесів інтенсивної пластичної деформації (*severe plastic deformation*) або мегапластичної

деформації за термінологією А.М. Глезера [9], що забезпечує отримання в металах та сплавах об'ємних субмікро-і нанокристалічних структур.

При виборі матеріалів створення КМ необхідно виходити з можливої сумісності їх друг з одним. У роботі [14] наведена класифікація матеріалів за характером взаємодії один з одним (метали з обмеженою або повною нерозчинністю один з одним; метали з хорошою розчинністю та метали, що утворюють інтерметалідні сполуки), ґрунтуючись на якій визначається оптимальний спосіб виготовлення шаруватих композитів на металевій основі.

За даними [9] застосування зварювання вибухом як спосіб отримання КМ сприяє отриманню більш високої міцності зчеплення шарів металевих шарів ( $\sigma_{\text{сш}}=300-500 \text{ Н/мм}^2$ ) порівняно з пакетною прокаткою ( $\sigma_{\text{сш}}=150-330 \text{ Н/мм}^2$ ) та ливарним плакуванням ( $\sigma_{\text{сш}}=150-310 \text{ Н/мм}^2$ ). Прийнято вважати [13], що міцність зв'язку між однорідними та різнорідними шарами має бути в межах 0,4-0,6 міцності основного компонента композиту.

#### Зварювання вибухом

У роботі [15] зварювання вибухом описується як високоінтенсивний короткочасний вплив, що супроводжується явищами хвилеутворення, кумуляції та схоплювання тіл і за своїм впливом можна порівняти з процесами інтенсивної пластичної деформації (ІПД), що реалізуються у вузькій приконтатній області та ведуть до фрагментації структури.

Фізичні основи формування міцної сполуки, шляхом високошвидкісного зіткнення, докладно описані також у роботах [11-14] та ін..

Зварювання вибухом на думку авторів [14] та ін відноситься до найбільш ефективних методів створення високоякісних композиційних матеріалів різних типів і призначення.

Завдяки своїй швидкоплинності процес зварювання вибухом перешкоджає розвитку активних дифузійних процесів у зоні з'єднання та дозволяє отримувати рівномічні композиції практично з будь-яких різнорідних металів. У роботах [11-15] наголошується, що зварювання

вибухом незамінне для отримання високоміцних композитів з різнорідних матеріалів, таких як алюміній-сталь, алюміній-мідь, алюміній-титан, титан-сталь, цирконій-сталь та інших, які схили до формування крихких інтерметалідів, що різко знижують міцність з'єднання. За даними робіт [14-16], присвячених вивченню отриманих методом зварювання вибухом КМ з мікро- та нанорозмірними шарами, кількість шарів у пакеті за одне вибухове навантаження може досягати 50. До переваг зварювання вибухом, як технології отримання КМ, відноситься можливість збереження вихідної структури шарів складових композиту. У ході виготовлення КМ за технологією зварювання вибухом крім створення міцного з'єднання шарів як побічний ефект досягається зміцнення шарів композиту, викликане поширенням ударних хвиль обсягом металу [17]. Досягнуте зміцнення відображається у збільшенні мікротвердості в навколошовній зоні з подальшим поступовим зниженням у міру віддалення від межі шва. При цьому можливе і розміцнення металу, викликане його розігрівом внаслідок збільшення теплової складової ударної хвилі за високого тиску.

Дифузійне зварювання пресуванням при отриманні КМ здійснюють при температурі нижче температури плавлення зварюваних металів з додатком тиску, необхідного для пластичної деформації приконттактних шарів та утворення хімічних зв'язків внаслідок взаємної дифузії між атомами поверхонь, що з'єднуються [5].

Пресування КМ методом дифузійного зварювання включає в себе підготовку поверхонь, що з'єднуються, нагрівання, додаток стискаючих навантажень, ізотермічну витримку і охолодження. Для створення міцного нероз'ємного з'єднання КМ дифузійне зварювання рекомендується проводити у вакуумі або в захисних і відновлювальних атмосферах [13].

#### Пакетна прокатка

Основи отримання КМ високотехнологічним методом гарячої та теплої пакетної прокатки докладно викладено у роботі [1]. Даний метод орієнтований на багатомасштабне виробництво і його використання дозволяє

досягти високих деформаційних обтискань.

Незважаючи на ряд переваг, пакетна прокатка має деякі недоліки, які згадуються в роботах [14]. До них відносяться трудомісткість підготовки пакета перед обтисканням, нестабільність якості з'єднання, неоднорідна деформація різнорідних матеріалів та їхнє окислення в процесі прокатки.

Деформування КМ на основі низьковуглецевих сталей прокаткою з високими ступенями деформації може привезти до крихкості матеріалу, різкого вичерпання ресурсу пластичності матеріалу і, відповідно, розшарування матеріалу під дією значних залишкових напруг як по межі розділу шарів, так і по центральній частині найбільш міцного шару [14].

Результати досліджень [12] показують, що спроби отримати багат шарову структуру шляхом гарячої прокатки на основі лише шарів заліза призводить до формування монозаготовки без видимих ознак багат шарової ламінарної структури. Для отримання КМ з досягненням високих показників міцності і порушення його шаруватої архітектури необхідно врахувати такі моменти. Діяльність А.Г. Колесникова, А.І. Поганих та ін [18] показано, що збереження шаруватої структури в заготовки можливе в тому випадку, якщо у вихідній композиції брали участь сталі, що мають різну кристалічну будову (ОЦК-ГЦК-решітки). Тривала витримка пакета і висока температура гарячої прокатки понад  $1050^{\circ}\text{C}$ , як показано на прикладі шаруватих композитів на основі сталей 40X13 і 08X18H10, в результаті активного протікання при гарячій деформації дифузійних процесів призводить до порушення ламінарного матеріалу. .

У роботах [19] увага приділяється тому факту, що при досягненні прокаткою певного ступеня деформації КМ можливе локальне утончення пластичних шарів, і подальше деформування може призвести до фрагментації шарів і, отже, порушення ламінарності структури і переходу композиту з шаруватого типу в матричний . Пакетна прокатка може бути використана як один з етапів комбінованої технології отримання КМ (дифузійне зварювання + пакетна прокатка; зварювання вибухом + пакетна



прокатка) [13].

### Методи інтенсивної пластичної деформації

Метод ПД, що полягає в деформуванні з великими ступенями деформації за відносно низьких температур (0,3...0,4Тпл) в умовах високих доданих тисків, забезпечує отримання об'ємних безпористих нано- та субмікрокристалічних металів та сплавів [20]. Серед основних методів ПД, що використовуються для отримання КМ у твердофазному стані, можна виділити:

РКУП . Можливість використання цього широко поширеного методу ПД для отримання КМ була запропонована авторами [21], а потім набула розвитку в пізніших роботах [22]. Однак технологія РКУП не набула достатнього поширення у промисловому виробництві через обмеження у розмірах та формі одержуваних зразків.

Накопичувальна пакетна прокатка зі з'єднанням шарів (ARB) process . ARB-процес є різновидом пакетної прокатки, запропонованої авторами [23], і є процесом багатопрохідної прокатки, у кожному циклі якої листові заготовки обтискаються на 50%, а потім розрізаються і збираються в пакет для наступного проходу. При цьому вихідна товщина листа зі збільшенням числа проходів залишається незмінною, а сумарний ступінь обтиснення після циклів розраховується за формулою 1.1:

$$e = \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left( \frac{1}{2} \right) \right\} \times n = 0,8n, \quad (1.1)$$

де  $e$ - накопичена справжня деформація,  $n$ - число циклів.

ARB-процес, що відноситься до методів ПД, проводиться при температурі нижче рекристалізованої, що дозволяє створити в металах і сплавах субмікро- і нанокристалічну структуру, а також забезпечити високий рівень властивостей міцності.

У роботі [22] ARB-процес при кімнатній температурі використовується

для одержання листового алюмоматричного композиту, що зміцнюється наночастинками  $Al_2O_3$  та  $B_4C$ . Різновидом ARB-процесу є CRARB-процес (cross-roll accumulative roll bonding process), особливість якого полягає у зміні орієнтації листів на 90- по відношенню один до одного між послідовними циклами прокатки (рисунок 1.2). З використанням цього методу було отримано КМ з вихідного листового прокату алюмінію та порошкових матеріалів  $SiC$ ,  $B_4C$  [21]. Ця технологія забезпечує більш високий комплекс механічних властивостей композитів порівняно з ARB-процесом, проте товщина одержаних листових шаруватих композитів не перевищує 1 мм.

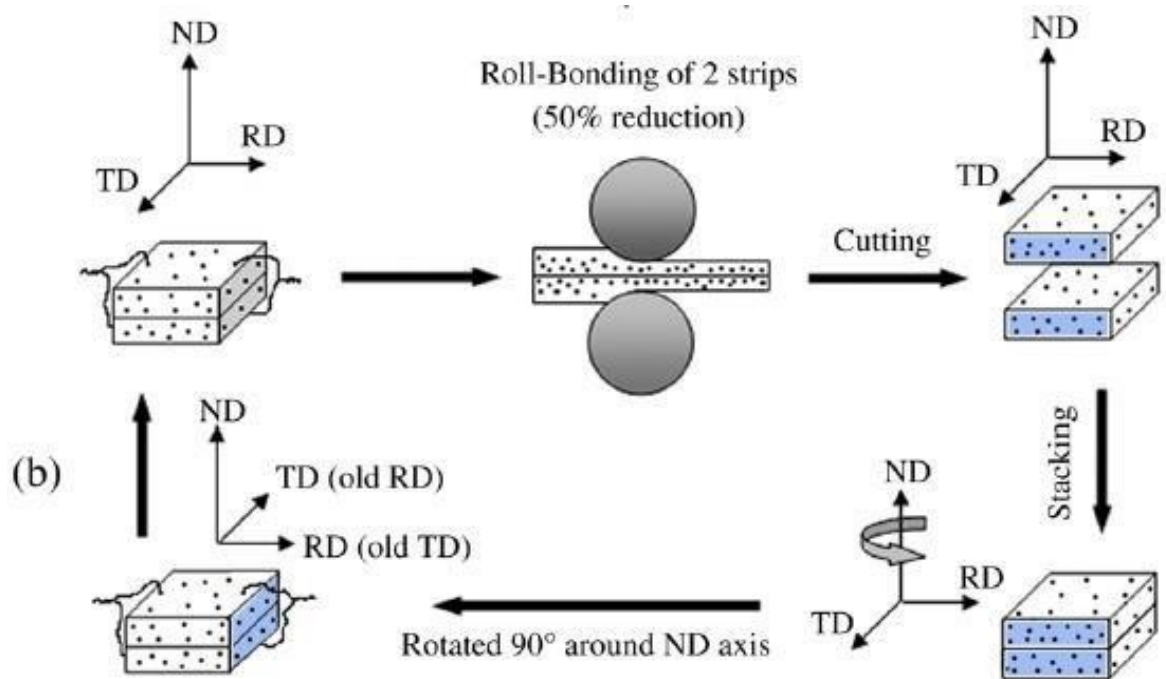


Рисунок 1.2 – Cross-roll accumulative roll bonding process [62]

### Поєднані методи порошкової металургії та пакетної прокатки

КМ, виконані на основі листових монолітних і композиційних матеріалів, відносяться до шаруватих гібридних матеріалів (FML – fiber metal laminates) конструкційного та функціонального призначення [22] і являють собою «композит в композиті», де металоматричні прошарки з послідовністю, що чергується, спільно з монолітними матеріалу структуру шаруватого композиту У вітчизняній науці та за кордоном для отримання функціональних металоматричних композитів в основному застосовують

удосконалені методи лиття та порошкової металургії. Для отримання монолітного наноструктурованого бороалюмінієвого композиту Р. Вінтіла та ін використовували складну технологію кріогенного розмелювання порошоків та їх подальшого плазмового спікання. У роботах В.М. Гульбіна, В.Г. Іванова та ін вивчено можливості таких методів отримання композитів системи бороалюміній як інфільтрація розплаву алюмінію через пористий каркас із порошку карбиду бору; одержання композиційного порошку методом механохімічного синтезу (механічного легування) з динамічним компактуванням його на магнітно-імпульсних пресах та подальшою деформаційною обробкою; а також методи синтезу наночастинок карбиду бору безпосередньо в розплаві матеріалу *in situ*. Фізичні основи, способи та особливості прокатки порошоків докладно представлені у роботі [21]. Згідно з результатами дослідження для отримання якісних безпористих шарів при прокатуванні порошки повинні знаходитись у рідко-твердофазному стані. При цьому частка рідкої фази в порошкових частинках різним оцінкам має становити 35-60%. Авторами [20] вперше зроблено спробу отримання шаруватого гібридного композиту (боралі) на основі зовнішніх алюмінієвих шарів і центрального порошкового прошарку, що складається із суміші порошоків алюмінію та карбиду бору.

Інший деформаційний спосіб отримання бороалюмінієвого композиту передбачає використання при прокатуванні пакета замкнутої сталеві оболонки [21]. Сталь у разі виконує роль формообразуючого захисного каркаса, який видаляється після закінчення деформування. Слід зазначити, що за наявними в доступній літературі даними високопродуктивні методи пакетної прокатки для отримання шаруватих бороалюмінієвих нейтрозахисних композитів у вітчизняному машинобудуванні досі не використовуються.

#### 1.4 Загальні закономірності структуроутворення у КМ при деформаційному та високоенергетичному впливі

У зв'язку з тим, що в якості основних методів отримання та подальшої обробки досліджуваних КМ було обрано метод пластичного деформування гарячою, теплою та холодною прокаткою, а також технологію отримання нероз'ємних з'єднань зварюванням вибухом, то доцільно проаналізувати наявні в літературі роботи з виявлення загальних закономірностей процесу структуроутворення у матеріалах основи шаруватих композитів при деформаційному та високоенергетичному впливі А.А. Дерібас та А.В. Крупін [37, 39] при зварюванні вибухом металів і сплавів відзначають загальну закономірність підвищення щільності дислокацій в матеріалах, що з'єднуються, яка проявляється і при отриманні цим методом шаруватих композитів. В роботі зазначається, що інтенсивна високошвидкісна деформаційна дія методом динамічного канального кутового пресування (ДККП) сприяє зростанню твердості міді М1 в 2-2,5 рази, міцності - в 1,5 рази при збереженні хорошої пластичності. Навантаження ударними хвилями призводить до отримання в металах і сплавах складних дислокаційних структур, систем мікродвійників та дисперсних структур, у тому числі і нанокристалічних, за рахунок високошвидкісних деформаційних процесів та фазових перетворень, що відбуваються з великою кількістю центрів зародження. До особливостей формування структури з'єднання матеріалів, одержуваних зварюванням вибухом, можна віднести і альтернативну моду пластичної деформації в приконтатній зоні, що реалізується при високошвидкісному навантаженні шляхом деформаційного двійникування. У роботі [23] у зразках Cu, підданій ПД кручення при кімнатній температурі, отримана УМЗ структура з висококутовими розорієнтуванням кордонів.

Систематичні структурні дослідження металевих матеріалів, підданих пластичним деформаціям з різним ступенем у широкому температурному діапазоні, були розпочаті в 60-70-х роках ХХ століття [74-76]. Протягом

останніх двох десятиліть з використанням сучасного обладнання високорозв'язання досягнуто великих успіхів у вивченні еволюції структури різних металів та сплавів методами ПД.

Механізми структуроутворення при холодній, теплій та гарячій пластичних деформаціях докладно описані в роботах В.В. Рибіна, С.С. Гореліка, С.В. Добаткіна, Н.А. Конєвої, Е.В. Козлова, О.М. Белякова та ін [17], де зміна зернистої структури в процесі пластичної деформації визначають, як динамічну рекристалізацію (ДР). У роботах [22-24] показано, що для початку ДР необхідно досягти критичного ступеня деформації, величина якої залежить від температури деформування. З наведеного рисунку 1.3 графіка температурно-деформаційної залежності початку динамічної рекристалізації, опублікованого у роботі [23], видно, що зі збільшенням температури деформування критична ступінь деформації для початку ДР знижується.

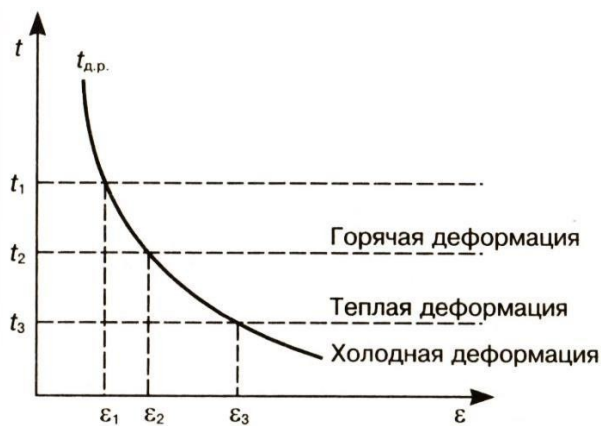


Рисунок 1.3 – Температурно-деформаційна залежність початку динамічної рекристалізації:  $t_{д.р.}$ - температура початку динамічної рекристалізації [82] (по центру)

Розмір динамічно рекристалізованого зерна  $D_3$  висококутовими кордонами, що утворюється під час гарячої деформації, може бути менше 1 мкм. При теплій деформації при досягненні високих ступенів деформації можна отримати зерна, що відповідають субмікрокристалічному рівню  $100\text{нм} < D < 1\text{ мкм}$ .

Діяльність С.В. Добаткіна та ін дається докладний опис реалізації ДР, яка в залежності від механізму перебігу діляться на переривчасту та безперервну. При переривчастій ДР, що реалізується механізмом Бейлі-Хірша, виникнення нових зерен відбувається на межі вихідних зерен після досягнення деякого критичного ступеня деформації. Формування нових зерен шляхом безперервної ДР, що реалізується за механізмом Кана-Брюгера, і термін «рекристалізація *in situ*», що отримала в літературі, відбувається за рахунок зростання розорієнтувань субзерен у міру розвитку деформації. Відповідно до уявлень при гарячій пластичній деформації формування нової структури в металах з низькою ЕДУ ( $\gamma$ -Fe, Cu) відбувається за механізмом переривчастої ДР, а в металах з високою ЕДУ (Fe, Al) – за механізмом безперервної ДР з розвитком у вихідних зернах стійкої субструктури. Залежно від ступеня деформації в металевих матеріалах може утворюватися зеренно-субзеренна, змішана комірчасто-фрагментована, фрагментована ультрадрібнозерниста структура.

### **1.5 Формування структури КМ у процесі зварювання вибухом**

Закономірності формування структури на межі поділу шарів та в навколошовній зоні отриманих зварюванням вибухом нероз'ємних сполук різнорідних та різноіменних металів та сплавів здебільшого виявлено на прикладі біметалічних матеріалів. Однак ці закономірності можна значною мірою поширити і багат шарові композити. В ході вибухового навантаження на межі з'єднання та в навколошовній зоні протікають такі складні процеси як хвилеутворення, сильна пластична течія, утворення вихорів, зон оплавлення з литою або УМЗ структурою, а також зон із відносно однорідними рекристалізованими та сильнодеформованими зернами, що встановлено в роботах. Кордон зварних з'єднань, отриманих зварюванням вибухом, найчастіше характеризуються хвилеподібною будовою, але

трапляються і прямі зварні шви.

Встановлено, що довжина і амплітуда хвиль залежать від технологічних параметрів зварювання вибухом (кут і швидкість зіткнення, відстань між пластинами і т.д.), геометрії пластин, що з'єднуються, а на думку автора також значною мірою від кристалографічної орієнтації зерен, що у їх побудові. Особливості будови вихрових зон та навколошовних зон, що формуються при зварюванні вибухом різнорідних матеріалів, вивчені у роботах. У роботі [16] у зонах перемішування сталі та титану формуються мікрооб'єми, що характеризуються аморфною будовою. Б.А. Грінберг та ін вперше виявлено на прикладі сполук різнорідних матеріалів, отриманих зварюванням вибухом, і докладно описаний процес фрагментації типу дроблення, що являє собою поділ або змикання частинок компонентів на межі з'єднання під дією вибухової хвилі.

В процесі структурних досліджень отриманого зварюванням вибухом КМ на основі сплавів ВІД-4, Д16 і сталі ЗІ90-ВІ було виявлено хвилеподібний вид межі розділу шарів та наявність областей інтенсивного перемішування в перехідній зоні. Встановлено неоднорідність структури, що формується при зварюванні вибухом сталевих пластин, як у поперечному напрямку, так і вздовж профілю хвилі. При цьому характер кінцевої структури визначається процесами нагрівання, охолодження та деформаційного зміцнення матеріалу, що відбуваються під час вибухового навантаження. Деякі, що формуються при зварюванні вибухом хвилі з високим профілем можуть призводити до локального потонання сусідніх шарів композиту, як показано в роботі, і навіть до їх часткової фрагментації з утворенням міжшовних тріщин [9]. За даними [18] в умови інтенсивної пластичної деформації та короткочасності вибухового навантаження на межі зварного шва утворюється рекристалізована субмікрокристалічна структура, а центральні області вихорів під час вибухового впливу перебувають у розплавленому стані.

Деталі тонкої будови вихорів та навколошовної зони зварного

з'єднання сталевих багатошарових матеріалів вивчені в роботах [10]. Разом про те питання структуроутворення у частині верств, віддаленої межі зварного з'єднання шаруватих композитів, вивчені недостатньо. Виняток становлять роботи [16, 18], в яких на прикладі шаруватих зварних композитів на основі сталей 20, 08кп, 45ХНМ, 12Х18Н10Т, 5ХВ2С і Н18К9М5Т у міру віддалення від межі зварного з'єднання 70-15 різним типом тонкої структури, а також зафіксовано утворення смуг локалізованої пластичної деформації. У центральній частині шарів 08кп основною ознакою деформаційного зміцнення сталевих шарів є двійники деформаційного походження.

### **1.6 Формування структури КМ у процесі пакетної прокатки**

Зсувні деформації при пакетній прокатці призводять до появи витягнутої зеренної структури КМ. Повнота протікання ДР, що полягає у освіті нових зерен, багато в чому визначається температурою та ступенем деформації шарів КМ. У роботах, присвячених АRB-прокатці пластичних матеріалів після 6-8 циклів ( $\approx 4,8-6,4$ ), у багатошаровій заготовки відзначається формування УМЗ структури. У роботах [10, 14] до категорії УМЗ структур відноситься структура, в якій середній розмір зерна має розміри хоча б в одному напрямку менше 1 мкм, при цьому довжина зерна в іншому напрямку може перевищувати це значення. Загальна особливість таких структур при спостереженні багатошарових матеріалів у поздовжньому напрямку щодо напрямку прокатки (RD) полягає у формуванні зерен діаметром менше 1 мкм з чистими, але звивистими межами. У поперечному напрямку прокатки (TD) для всіх матеріалів характерна витягнута морфологія зерен, які умовно носять назви "pancake UFG", якщо зерно помірно витягнуте, і "lamellar boundary structure", якщо зерно сильно витягнуте.

Якщо у разі холодної та теплої прокатки КМ формування остаточної



структури у шарах відбувається в результаті послідовних операцій деформування, нагрівання та охолодження, то в процесі гарячої прокатки КМ важливим фактором будуть саме умови охолодження. Протікання збірної рекристалізації після закінчення прокатки усуває весь сприятливий ефект, що досягається пластичною деформацією [16]. Однак до теперішнього часу питання еволюції зеренної структури металу під впливом різних схем пластичного деформування, температури й умовах обмеженого течії металу, зокрема у складі багат шарового пакета, систематично не вивчені.

Авторами [12] показано, що гаряча пакетна прокатка вихідної збірки з 100 шарів сталей У8 і 08Х18Н10, що чергуються, дозволила отримати багат шаровий композит з шарами товщиною шарів від 90 до 2000 мкм, розділеними висококутовими межами з розорієнтуванням. Отриману структуру багат шарових композитів пропонується розглядати як сукупність текстурованих монокристалів. У цьому роботі Т.І. Табатчикової та ін [17] багатопрохідна прокатка композитних заготовок, що складаються з нержавіючих сталей на основі ОЦК-і ГЦК-решіток, є методом формування ультрадрібнозернистої структури в листовому матеріалі, яка являє собою чергування шарів фериту і мартенситу, а також безкарбідного маркроніту. При використанні холодної прокатки для додаткового зміцнення зварених вибухом мідностальних композитів у шарах міді формуються мікросмуги завтовшки 0,1-0,3 мкм, обмежені розміром зерна [12].

### **1.7 Особливості формування структури КМ із порошковими прошарками**

Важливими характеристиками мікроструктури порошкових матеріалів є наявність пір, величина зерна та ступінь однорідності зеренової структури. Управління цими характеристиками можливе за допомогою зовнішнього впливу (тиск, температура, середовище, швидкість нагрівання та витримка),

знаючи фізико-хімічну природу компонентів порошкової суміші [82]. Технологія гарячої прокатки може бути використана як ефективний метод створення монолітного практично безпористого матеріалу, що включає одночасно етапи ущільнення та спікання порошкових частинок. Процеси структуроутворення в порошкових тілах при прокатці мають складний характер і докладно описані у роботі [18].

Слід зазначити, що більшість мікроструктурних досліджень металоматричних композитів обмежуються вивченням характеру розподілу в матриці карбіду бору, оцінкою пористості та вивченням морфології вихідних порошкових частинок методом електронної скануючої мікроскопії. Структурні дослідження металломатричних композитів із застосуванням методів дифракції обернено відбитих електронів і електронної мікроскопії (ПЕМ), що просвічує, представлені в ряді робіт [14, 1]. Авторами [15] методом ПЕМ докладно вивчено тонку структуру алюмоматричного композиту з добавками частинок карбіду бору та встановлено, що зразки з 10 %  $B_4C$  рекристалізуються при температурі  $350^\circ C$ , у той час як зразки з 25 %  $B_4C$  зберігають наноструктуру і не рекристалізуються до температур відпалу  $550^\circ C$ .

У роботі [10] з прикладу композиту  $Al/Al_2O_3/B_4C$ , отриманого методом ARBпроцесу, на підставі структурних досліджень методом ПЕМ показано, що присутність наночастинок 1,3 вага. %  $Al_2O_3$  та  $B_4C$  в алюмінієвій матриці веде до подрібнення зерна матриці та підвищення в ній щільності дислокацій. Важливо, що використання тонких порошкових прошарків з  $B_4C$  у складі шаруватих композитів, одержуваних методом накопичувальної пакетної прокатки, призводить до впровадження порошкових частинок монолітні алюмінієві листи без формування окремих порошкових шарів [6]. Разом з тим результати структурних досліджень [12] отриманих гарячою прокаткою алюмоматричних композитів зі зміцнюючими частинками  $B_4C$  доступної літератури не представлені.

## 1.8 Властивості КМ

### *Фізико-механічні та механічні властивості КМ*

Відомо [11-19], що за рахунок поєднання різнорідних та різноміцних матеріалів у структурі пакета, наявності шаруватої архітектури композиту, а також застосування зміцнювальних методів деформаційно-термічної обробки КМ може бути отриманий унікальний комплекс фізико-механічних властивостей.

Відповідно до [3, 5] порівняно з вихідними складовими КМ різного складу в широкому температурному діапазоні мають підвищений рівень механічних властивостей при випробуваннях на одновісне розтягування. Фактична міцність цих матеріалів часом може перевищувати її теоретичні значення, розраховані за правилом сумішей (правила адитивності) [10]. Наприклад, у роботі [12] зафіксований рівень міцності композитів, отриманих за технологією зварювання вибухом, перевищують значення межі міцності та межі плинності, розраховані за правилом сумішей, в 1,26 рази та 2,32 рази відповідно.

Однак правило сумішей може порушуватися з появою в системі крихкої складової [14]. Істотний вплив на властивості міцності шаруватих композитів надає якість з'єднання шарів, яке забезпечується наявністю міжатомних зв'язків між атомами з'єднаних поверхонь у стані фізичного контакту [12]. Міцність зчеплення шарів не повинна бути нижчою за міцність металів, що входять до складу композитів і оцінюється за результатами випробувань на зріз відповідно до ГОСТ 10885-85 або на відрив. Причиною недостатньої міцності з'єднання в КМ, отриманих пакетною прокаткою, може послужити небажана хрумка фаза, що виникає на межі компонентів, що з'єднуються на етапі виготовлення деяких шаруватих композитів [3, 14], присутність окису заліза, пор і несподіванок, що практично повністю виключено у разі застосування технології зварювання вибухом. Однак у

роботі [6] встановлено, що при зварюванні вибухом титанового сплаву VT23 і сталі 08кп у локальних ділянках зварної сполуки формуються дрібні кристаліти інтерметалідів. Ефективне використання проміжних прошарків, що захищають межі зварних з'єднань від формування крихких інтерметалідів, показано в роботі [4] на прикладі шаруватого композиту Ti/Ta/Cu/Ni, отриманого зварюванням вибухом. При зварюванні вибухом відбувається збільшення мікротвердості в навколошовній зоні з його подальшим зниженням у міру віддалення від межі шва. При цьому можливе і зміцнення металу внаслідок його розігріву за рахунок збільшення теплової складової ударної хвилі при високому тиску.

Надання КМ підвищеного рівня механічних властивостей можливе за рахунок застосування методів ПД під час безпосереднього виготовлення композиту [12]. Однак не завжди деформаційні методи отримання КМ ведуть до зростання показників міцності. Протилежна залежність спостерігається в роботі [10], де з накопиченням деформації в КМ з кожним новим циклом прокатки відзначається зниження межі плинності, пов'язане з перебігом процесів динамічного повернення і рекристалізації.

Серед основних факторів, що формують механічні властивості при розтягуванні сталіалюмінієвих та сталевих шаруватих композитів за однакової технології їх отримання, можна виділити механічні характеристики складових композиту з урахуванням їх зміни у процесі деформаційно-термічної обробки, а також їх об'ємну частку. Використання в тришарових композиціях у поєднанні зі сплавом АЦМг прошарків високоміцних мартенситно-старіючих сталей X15H5 і H18K8M5T при об'ємній частці сталевих складових 54-77% дозволило підвищити значення тимчасового опору відриву рівня 1230 і 970 МПа відповідно Вищий рівень міцності ( $\sigma_y=1510-1810$  МПа) вдалося досягти в 2 - і 13-шарових зварних композитах на основі мартенситно-старіючої сталі H18K9M5T, аустенітної сталі 12X18H10T і сталі 20 після додаткової витримки при температурі 490° С протягом 3 год. За даними [1] у багатошаровому композиті (до 2000 шарів)

на основі сталей 08X18H10 та 08X18 із середньою товщиною близько 1 мкм досягаються тимчасовий опір відриву  $\sigma_B=800$  МПа, що у 1,6- 1,7 разу вище міцності вихідних складових композиту.

Дані за механічними властивостями металоматричних Al/B<sub>4</sub>C-композитів [6, 11, 12] мають великий розкид значень ( $\sigma_y=69-470$  МПа), пов'язаний насамперед із різним вмістом об'ємної частки карбїду бору, маркою алюмінієвого сплаву та технологічних особливостей отримання композитів. Авторами [111] за результатами механічних випробувань Al/B<sub>4</sub>C-композиту на основі алюмінієвого сплаву Al6061 показано, що збільшення вміст частинок карбїду бору понад 30 % призводить до зниження характеристик міцності матеріалу (рисунок 1.4).

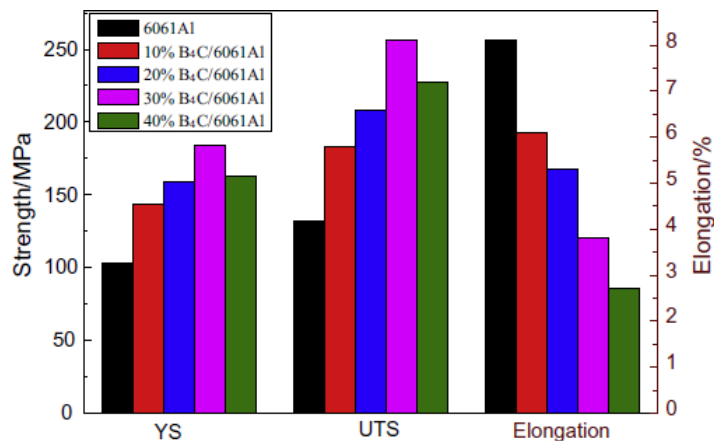


Рисунок 1.4 – Міцність на розтягування алюмінієвого сплаву 6061 залежно від вмісту частинок B<sub>4</sub>C [111]

Проведення сучасних інструментованих випробувань на ударний вигин дозволяють отримати докладну інформацію про механізм та енергоємність процесу руйнування монолітних [16, 17], а також композиційних матеріалів. Опір КМ руйнування при випробуваннях на ударну в'язкість істотно залежить від орієнтації лінії надрізу щодо площини розділу шарів. У роботах [12-13] аналізуються три основні види розташування поверхонь з'єднання в КМ, що забезпечують поділ фронту тріщини (crack-divider), її гальмування (crack-arrester) та проходження наскрізної тріщини вздовж однієї з міжшарових кордонів (рисунок 1.5). Максимальний опір ударному

руйнуванню шаруватого матеріалу досягається в тому випадку, якщо навантаження перпендикулярне площині пари сполучення пластин, тобто. у разі гальмування тріщини розташування шарів, що показано авторами робіт [9, 13].

Збільшення міцності зв'язок між шарами, тобто. підвищення «ступеня монолітності» шаруватого матеріалу, що призводить до зниження ударної в'язкості композиту у разі орієнтації тріщини за гальмуючим типом. І, навпаки, наявність ослаблених поверхонь розділу у складовому шаруватому матеріалі, як у роботі [13], підвищує опір ударному руйнуванню матеріалу.

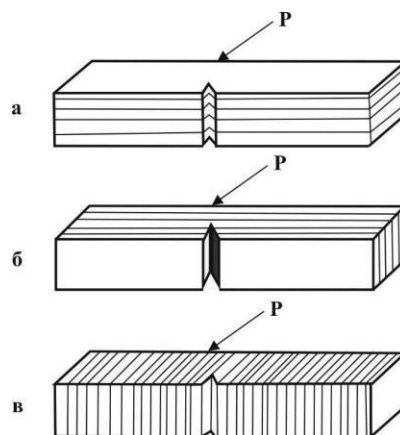


Рисунок 1.5 – Вид шаруватих матеріалів для випробувань на ударну в'язкість з різним розташуванням шарів щодо лінії надрізу: з розгалужуючим тріщину розташуванням шарів - crack-divider (а), з розташуванням шарів, що гальмує тріщину, - crack-arrester (б) і з розташуванням шарів, що забезпечують проходження тріщини вздовж однією з міжшарових кордонів (в) [12]

Згідно з даними [13] діаграма статичного вигину 70-шарового композиту на основі високо-і низьковуглецевої сталей при гальмівній орієнтації надрізу (рисунок 1.6 а) включає ділянки просування тріщини (crack propagation) і її розшарування (delamination). Вважається, що чим більше протяжність пологої ділянки на діаграмі, тим вища пластичність і ударна в'язкість наступного шару композиту.

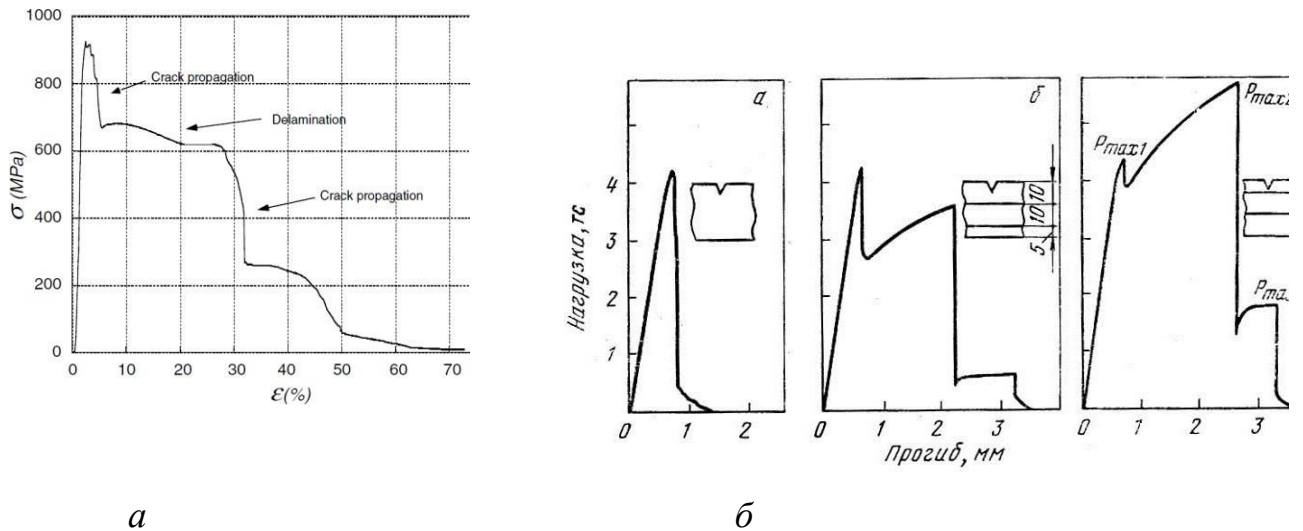


Рисунок 1.6 – Діаграми статичного вигину шаруватих композитів з розташуванням шарів за гальмуючим типом для 70-шарового композиту на основі високо- та низько вуглецевої сталей [13] та 5-шарового титаноалюмінієвого композиту [14]

Аналогічні результати отримані авторами [14] на 5-шаровому титаноалюмінієвому композиті (рисунок 1.6 б). При цьому на діаграмі спостерігаються виражені максимуми навантаження, що відповідають зародженню тріщини в наступному шарі, за якими слідують викликані зростанням тріщин спади навантаження. В цілому, за результатами робіт [9, 13] можна зробити висновок про те, що характеристики ударної в'язкості та особливості зростання тріщин у шаруватому композиті визначаються рівнем міцності та пластичності його складових, товщиною та характером чергування шарів, а також близькістю лінії надрізу до межі поділу шарів. Наголошується, що при близькому розташуванні надрізу до наступного шару досягається найбільша питома робота руйнування при ударному та статичному вигині.

Відсутність повного руйнування ударного зразка та високих значень зафіксованої енергії руйнування при ударних випробуваннях гарячекатаного композиту 08X18-08X18N10 зазначається авторами [7].

Разом з тим, у літературі не зустрічаються роботи, в яких наводяться

діаграми інструментованого ударного навантаження КМ, що дозволяють судити про стадійність процесу руйнування даних матеріалів. У роботі [16] на прикладі 7-шарового матеріалу зі сплаву ВТ6 виявлено сприятливий вплив меж розділу на характеристики ударної в'язкості та на основі аналізу діаграм інструментованих ударних випробувань визначено особливості проходження тріщини у шаруватому зразку.

Поведінка високо-, середньовуглецевих сталей та 12-шарового композиту на їх основі з орієнтацією надрізу по гальмуючому типу при ударному навантаженні при температурі від  $-200$  до  $+200$  °С наочно представлено на температурній залежності роботи руйнування ударних зразків зазначених матеріалів (рисунок 1.7). ]

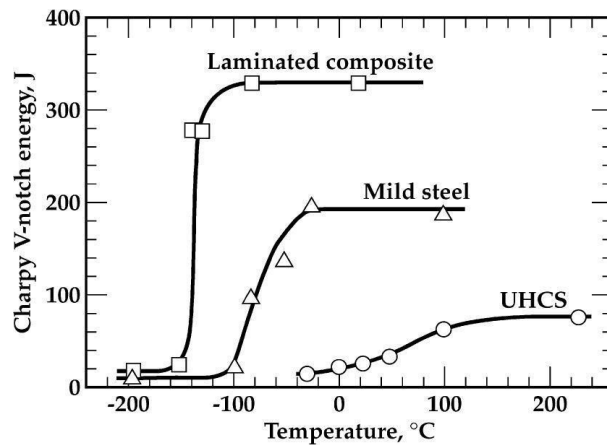


Рисунок 1.7 – Температурна залежність роботи руйнування високо-, середньо вуглецевих сталей та КМ на їх основі при ударних випробуваннях від  $-200$  до  $+200$  °С [15]

Високий опір ударному руйнуванню шаруватий композит демонструє в інтервалі температур від  $-150$  до  $+20$  °С, що пов'язано з утворенням розшарування уздовж межі шарів по обидва боки від магістральної тріщини. Підвищення ударної в'язкості та зміщення температури в'язко-крихкого переходу в область нижчих температур у шаруватих композитах відзначається також у роботі [14]. Слід зазначити, що порівняльній оцінці характеристик ударної в'язкості при кімнатній та знижених кліматичних температурах КМ однакового складу та конструкції, але отриманих за



різними технологіями раніше не проводилося. У роботі [17] визначено ударну в'язкість Al/B<sub>4</sub>C-композитів з вмістом порошку B<sub>4</sub>C; 10; 15 та 20 вага. %, отриманих методом пресування під тиском за різних температур. При цьому відзначається тенденція зниження щільності та ударної в'язкості матеріалу зі збільшенням вмісту карбиду бору та підвищенням температури пресування.

При цьому результати інструментованих ударних випробувань дозволяють судити про стабільність процесу динамічного руйнування гібридних Al/B<sub>4</sub>C-композитів у науково-технічній літературі не наводяться.

#### *Фізичні, теплофізичні та функціональні властивості КМ*

Згідно з результатами робіт [17-19], багат шарова будова, оптимальне поєднання компонентів та методів формоутворення та додаткової деформаційно-термічної обробки, крім підвищеного комплексу механічних властивостей та опору крихкому руйнуванню, надає композиту особливих магнітних, теплофізичних та різних функціональних властивостей.

Як інформативні параметри для магнітного контролю структури та механічних властивостей шаруватих матеріалів авторами робіт [18-14] запропоновано використовувати такі характеристики як коерцитивна сила, залишкова індукція, максимальна магнітна проникність, максимальна намагніченість. У роботах [14, 12] виявлено можливість використання значення максимуму диференціальної проникності як параметра при діагностиці утворення магнітно-упорядкованої фази в аустенітних сталях, як одного з компонентів шаруватого матеріалу «аустенітна сталь-феритна (ферито-перлітна) сталь, в процесі пружності деформування. Встановлено магнітні характеристики, які можна використовувати для оцінки напружено-деформованого стану як всього композиту в цілому, так і окремих шарів при пружнопластичній деформації. Слід зазначити, що отримані результати визначення магнітних властивостей відносяться, як правило, до біметалів або шаруватих матеріалів з кількістю шарів не більше 3.

Така важлива властивість КМ як теплопровідність визначається їхньою

структурно-механічною неоднорідністю і зазвичай на порядок нижче порівняно з теплопровідністю вихідних компонентів. До основних факторів, що впливають на теплопровідність КМ, можна віднести утворені в процес виготовлення зони зміцнення поблизу межі з'єднання і в обсязі шарів, наявність окремих включень, пір, несплошностей та дифузійних прошарків на міжшарових межах, що виникають при нагріваннях та обробці тиском [14]. Зазначається, що зниження тепло- та електропровідності КМ на основі титану та алюмінію, отриманих за технологією зварювання вибухом з наступною прокаткою, пов'язане з появою та зростанням дифузійних інтерметалідних прошарків, які мають нижчі теплофізичні властивості, ніж вихідні компоненти КМ.

Для шаруватих гібридних матеріалів з функцією радіаційного захисту згідно [5, 6] найбільш важливими теплофізичними характеристиками є коефіцієнт лінійного розширення, тепло- та температуропровідність, теплоємність і показник нейтронної передачі (коефіцієнт ослаблення нейтронного потоку), величини яких багато в чому залежать від хімічного складу, дисперсності порошкових сумішей, а також технології отримання композитів. Дані теплофізичних властивостей нейтрозахисних бороалюмінієвих композитів у доступній літературі представлені фрагментарно.

Результати дослідження [6] одержаних методом гарячої екструзії порошкових сумішей радіаційно-захисних композитів АМг6/BN/W; B95/BN/W; АМг6/B<sub>4</sub>C/W та B95/B<sub>4</sub>C/W виявили високу зносостійкість та теплопровідність цих матеріалів при коефіцієнті ослаблення нейтронного випромінювання 2,2-3,0. Відомо [11], що ефективність поглинання бороалюмінієвим композиційним матеріалом з різним вмістом частинок карбиду бору є нелінійною і має вигляд, представлений на рисунку 1.8.

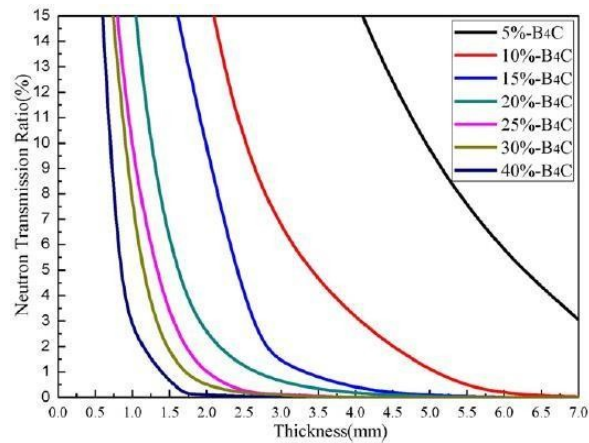


Рисунок 1.8 – Співвідношення між показником нейтронної передачі та товщиною композитів з різним змістом  $B_4C$  [11]

Як видно з рисунку 1.8, при вмісті в алюмоматричному композиті  $B_4C$  нейтрозахисні властивості матеріалу забезпечуються вже за товщини листового композиту понад 2,5 мм.

Показано [6], що теплопровідність композиту на основі  $B_4C/W$  приблизно в 8 разів знижується зі зростанням вмісту карбиду бору від 10 до 60%, а з підвищенням температури від кімнатної до  $300^\circ C$  зростає приблизно 1,5 разу. Аналогічне зниження показника теплопровідності від 14,8 до 8,03 Вт/(м·К) при підвищенні вмісту бору в волокнистому композиційному матеріалі системи бор-алюміній з 14 до 40% відзначається авторами [6]. У цій роботі вказується, що рівень теплопровідності нейтрозахисних бороалюмінієвих композитів для забезпечення відведення тепла в процесі природного остигання тепловиділяючих збірок повинен бути не менше 1,2 Вт/(м·К). Згідно з даними [14, 15] високими трибологічними властивостями володіють алюмоматричні композити, зміцнені нанорозмірними частинками  $Al_2O_3$ ,  $SiC$ ,  $TiC$ ,  $TiO_2$ ,  $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $WC$ . Ефективна можливість використання шаруватих металоматричних матеріалів для забезпечення балістичного захисту виробів та елементів конструкцій відзначається авторами [14, 17].

В ході проведення літературного огляду можна зробити висновки , що :

1. Аналіз науково-технічних публікацій з тематики роботи показав, що КМ є різновидом широкого класу композиційних матеріалів і завдяки унікальному поєднанню фізико-механічних і функціональних властивостей, відмінних від вихідних компонентів, а також підвищеному опору тендітному руйнуванню знаходять все ширше технічне застосування. Подальша модернізація існуючих та розробка нових складів, конструкцій та технологічних режимів отримання та подальшої деформаційно-термічної обробки з метою покращення комплексу властивостей КМ є перспективним напрямом розвитку сучасного матеріалознавства.

2. Незважаючи на низку запропонованих в останні роки високотехнологічних методів отримання КМ, включаючи РКУП, ARB- і CRARB-процеси, у тому числі у поєднанні з методами порошкової металургії, найбільш поширеними високопродуктивними методами отримання шаруватих композитів залишаються зварювання вибухом та пакетна прокатка за різних температур.

3. Маловивченими аспектами у дослідженні КМ на основі низьковуглецевих сталей, міді, алюмінію та його сплавів є дифузійні процеси та структурні перетворення, що протікають у зовнішніх і центральних шарах композиту, по висоті шарів на різній відстані та в безпосередній близькості до межі розділу в процес виготовлення та термічної обробки шаруватого матеріалу.

4. Більшість робіт з структуроутворення КМ при зварюванні вибухом та пакетною прокатці присвячено вивченню особливостей будови міжшарових кордонів та прилеглих ділянок. Для сталееалюмінієвих композитів відомості про структуру окремих верств розрізнено, а порівняльна оцінка структури сталей та алюмінієвих сплавів після ідентичних режимів прокатки у складі композиту та монолітного матеріалу не проводилася.

5. Неодноразово встановлено позитивний вплив меж розділу шарів КМ на характеристики ударної в'язкості при кімнатній та зниженій температурах.

Однак у літературі відсутній опис результатів інструментованих ударних випробувань КМ, які б виявили особливості зростання тріщин і стадійність руйнування шаруватих матеріалів при динамічному навантаженні.

6. У ряді робіт показана ефективність використання в одержуваних зварюванням вибухом композитах шарів із високоміцних мартенситно-старіючих сталей. Разом з тим дотепер не вивчено вплив високоміцних шарів з ультрадрібнозернистою структурою на властивості цих композитів.

7. Не вивчено можливості регулювання структури та властивостей сталевих КМ за рахунок додаткового нагріву, що надає одночасно зміцнюючу та розміцнюючу дію на шари сталей різного складу. У літературі немає відомостей щодо порівняльних досліджень структури та властивостей шаруватих композитів однакового складу та конструкції, але отриманих різними методами (зварювання вибухом та пакетна прокатка).

8. Важливою метою досліджень у галузі матеріалознавства у машинобудуванні є розробка та вивчення структури та фізико-механічних властивостей нових функціональних алюмоматричних КМ гібридного типу, що включають шари з консолідованих сумішей порошків алюмінію та дисперсних частинок  $Al_2O_3$ , SiC та  $B_4C$  с плакувальними шарами з алюмінієвих сплавів. Шаруваті композити подібного типу з нейтрозахисними прошарками Al/ $B_4C$  добре відомі та затребувані в атомній промисловості. Однак відомості про можливість їх отримання в єдиному технологічному циклі високопродуктивним методом гарячої прокатки в літературі відсутні, а дані щодо структури та фізико-механічних властивостей носять фрагментарний характер.

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

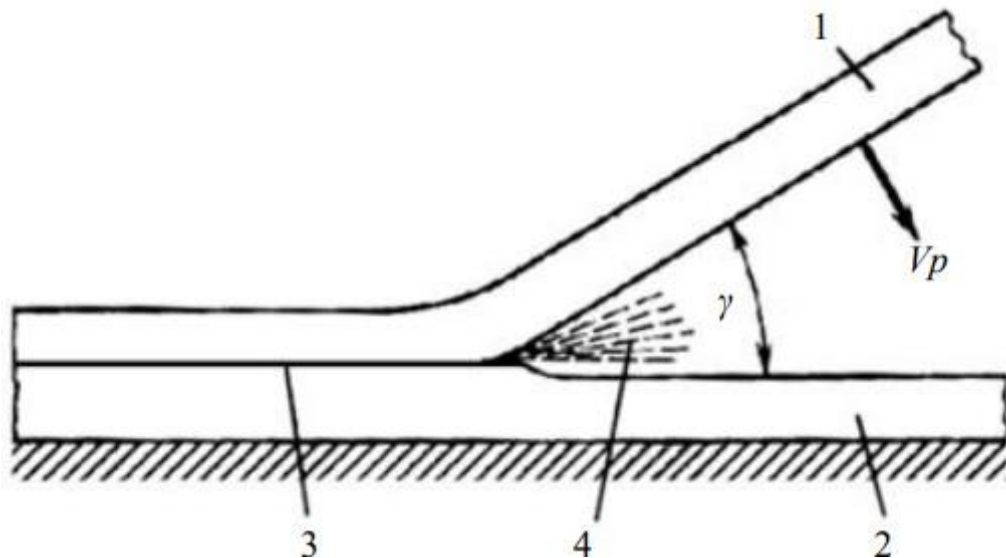
### 2.1 Вибір технологічних параметрів та схеми процесу ударнохвильового навантаження для отримання зварюванням вибухом багат шарового композиційного металевого матеріалу

Зварювання вибухом – процес отримання міцного з'єднання двох або кількох металевих тіл, що відбуваються при їх зіткненні. Прискорення тіл, що стукаються, здійснюється, як правило, під дією енергії вибуху, що виділяється при детонації зарядів вибухової речовини. Зварювання вибухом використовують для виготовлення багат шарових листів, смуг, циліндричних виробів, композиційних матеріалів волокнистої будови з різноманітних металів та сплавів, у тому числі і тих, зварювання яких іншими способами утруднене.

Зварювані тіла, заряд вибухової речовини і система його ініціювання, а також основи та опори, на якому все це розташовується, утворюють вибуховий пристрій. Для отримання якісного з'єднання необхідно правильно вибрати конструктивні характеристики та параметри вибухового пристрою [3]. Характерною особливістю процесу зварювання вибухом є хвилеподібний профіль зони з'єднання металів. У специфічних умовах зварювання вибухом, коли межа розділу матеріалів, що зварюються, є контактним розривом, однією з найбільш вигідних умов є перетворення кінетичної енергії метанної пластини в роботу пластичних деформацій, в ході яких відбувається процес хвилеутворення, що характеризується суворою періодичністю і регулярністю залишкових деформацій. Основою процесу зварювання вибухом є утворення кумулятивного струменя, що виникає в умовах високошвидкісного зіткнення двох металів.

Зіткнення з утворенням кумулятивного струменя розуміється як зіткнення двох похилих один до одного поверхонь, при якому в точці

зіткнення виникає спрямований потік металевих, що рухаються з великою швидкістю в зазорі і утворюють хвилясту поверхню. Схема похилого зіткнення показана рисунку 2.1.

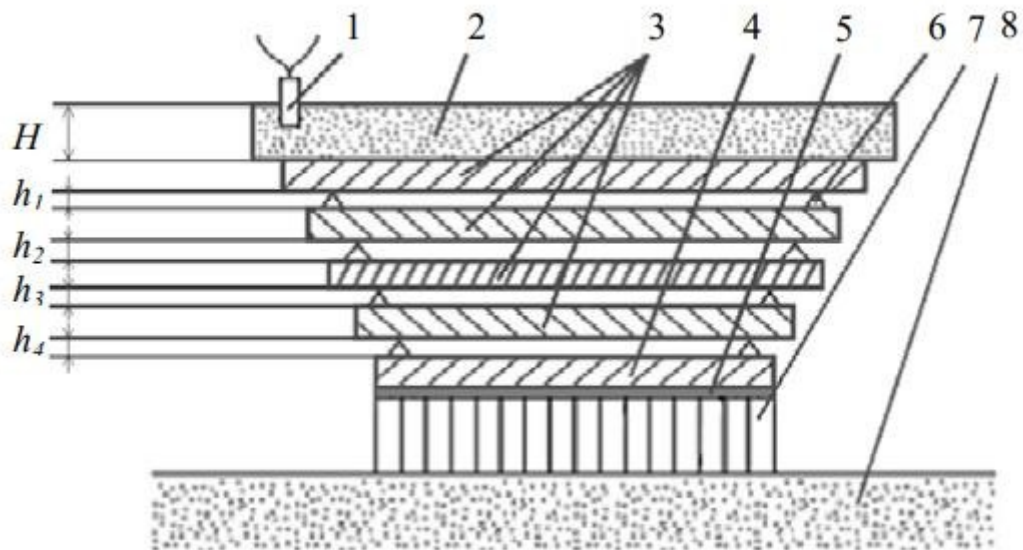


1 – метана пластина, 2 – нерухома пластина, 3 – поверхня контакту, 4 – кумулятивний струмінь,  $V_p$  – Швидкість метастєється пластини,  $\gamma$  - кут зіткнення

Рисунок 2.1 – Схема зіткнення при зварюванні

Кумулятивний струмінь металу, що утворюється при зварюванні вибухом, руйнує та видаляє поверхневу плівку. Очищені поверхні металу в точці зіткнення під дією високого тиску вступають один з одним в тісний контакт, завдяки чому утворюється металевий зв'язок у всій поверхні з'єднання. Таким чином, процес зварювання вибухом слід розглядати як процес, що складається з двох стадій – перша – утворення кумулятивного струменя, руйнування та видалення поверхневого шару, друга – високий тиск призводить до такого контакту поверхонь, при якому встановлюється міжатомний зв'язок [3]. Перед зварюванням вибухом поверхні виробів, що з'єднуються, повинні бути очищені від забруднень (масляних плівок, фарби, іржі та інших), тому що при швидкостях детонації в діапазоні від 2000 до 2500 м/с з поверхонь видаляються тільки плівки, товщиною до 12 мкм. Крім того, поверхні, що зварюються, не повинні мати дефектів (пор, раковин, різних сторонніх включень), інакше, при зварюванні можливе руйнування.

Більш поширена схема зварювання вибухом, якщо кут дорівнює  $0^\circ$  так звана паралельна схема, яка показана на рисунку 2.2. Як заготовки в цьому випадку застосовуються об'єкти у вигляді пластин.



$H$  – товщина заряду вибухової речовини,  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – технологічні зазори, 1 – детонатор, 2 – заряд вибухової речовини, 3 – металні елементи, 4 – нерухомий елемент, 5 – шар інертного матеріалу (скотч), 6 – технологічні опори (лошата), 7 – сталева основа, 8 – ґрунт

Рисунок 2.2 – Технологічна схема паралельної схеми зварювання вибухом

Під час вибуху по заряду вибухової речовини поширюється детонаційна хвиля. Під впливом цієї хвилі метана пластинка знаходить швидкість порядку деяких сотень метрів за одну секунду і відбувається її зіткнення з нерухомою пластинкою під певним кутом [3]. Навколо точки зіткнення з'являється значний тиск, що у десять разів перевищує межу міцності матеріалів. Під впливом подібного тиску матеріали, що зварюються течуть аналогічно рідинам. Їх перебіг обумовлюється кутом зіткнення та швидкістю точки контакту [3]. У ході зіткнення зварні площини самоочищаються і формуються умови для їх зближення під впливом значного тиску та спільної пластичної течії. Весь процес триває близько 10-6 с, тому взаємна дифузія ніяк не встигає перейти на значну глибину.



## 2.2 Дослідження технологічних схем одержання зварюванням вибухом композиційного металевого матеріалу для виготовлення композитного різального інструменту

Весь комплекс фізичних явищ, що супроводжують процес зварювання вибухом, структура та властивості одержуваних композиційних матеріалів значною мірою визначаються її основними параметрами, які поділяють на технологічні, кінематичні та фізичні [4]. До групи технологічних параметрів процесу зварювання вибухом відносять – швидкість детонації  $D$  вибухової речовини та її щільність, безрозмірний параметр  $r$ , що характеризує відношення маси заряду вибухової речовини до маси пластини, що метається, обчислювані за наступною формулою [4]:

$$r = \frac{\delta_0 \times \rho_0}{\delta_1 \times \rho_1},$$

де  $\rho_0$  - щільність заряду вибухової речовини, г/см<sup>3</sup> де;

$\delta_0$  - Товщина заряду вибухової речовини, мм;

$\rho_1$  - щільність метаної пластини, г/см<sup>3</sup>;

$\delta_1$  - Товщина метається пластини, мм;

$h$  – зварювальний зазор або початкова відстань між пластинами, що визначає швидкість розгону пластини, що метається, мм.

До групи кінематичних параметрів процесу зварювання вибухом входять:

$D$ - швидкість детонації вибухової речовини, м/с;

$\alpha$  - метана пластина, спочатку встановлена під кутом, град

$\beta$  -потім повернена під кутом, град;

$V_c$  - швидкість зіткнення пластини , м / с; , град;

$\gamma$ - кут зіткнення

$V_k$  - швидкість точки контакту, м / с.

Схема кінематичних параметрів зіткнення пластин при зварюванні вибухом представлені на рисунку 2.3. Де  $D$  – детонація вибухової речовини,  $\alpha$  – кут спочатку встановленої пластини - кут зіткнення,  $V_k$  швидкість точки контакту,  $V_c$  - швидкість зіткнення пластини,  $\beta$  - кут деформованої пластини.

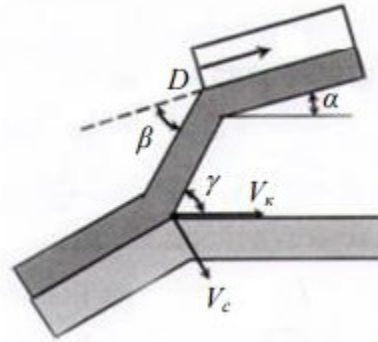


Рисунок 2.3 – Кінематична схема зіткнення зварюваних пластин при зварюванні вибухом

У групу фізичних параметрів процесу зварювання вибухом включають – величину тиску в зоні зіткнення зварюваних елементів, температуру взаємодіючих шарів у точці їх зіткнення, величину ступеня пластичного деформування контактуючих металевих шарів, час формування нероз'ємного з'єднання в зоні зіткнення, початкову температуру шарів зварюваних.

У ряді робіт виділяється також група енергетичних параметрів процесу зварювання вибухом - питома кінетична енергія системи зварених пластин, питома енергія, питома енергія кута зустрічі соударяючихся пластин. Швидкість зіткнення метаної пластини для сумішевих вибухових речовин розраховують за такою формулою [4]:

$$V_c = 1,2 \times D \times \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{32}{27}\right)^{r-1}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{32}{27}\right)^{r+1}}},$$

де  $V_c$  – швидкість зіткнення пластини, м/с;

$D$  – швидкість детонації вибухової речовини, м/с.

Під дією продуктів детонації метана спочатку встановлена під кутом  $\alpha$

пластина, повертається на кут  $\beta$ , а кут зіткнення  $\gamma$  дорівнює сумі  $\alpha$  плюс  $\beta$  і визначається як [4]:

$$\gamma = \alpha + 2 \times \arcsin\left(\frac{V_c}{2 \times D}\right),$$

де  $\gamma$  - кут зіткнення, град;

$\alpha$  – кут спочатку встановленої пластини, град.

Звідки можна визначити швидкість точки контакту [34]:

$$V_k = D \times \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin \gamma},$$

де  $V_k$  – швидкість точки контакту, м/с.

З практичної точки зору очевидним недоліком кутової схеми зварювання вибухом є те, що в міру віддалення від точки ініціювання заряду вибухової речовини зазор  $h$  між елементами, що зварюються, збільшується, призводячи до відповідної зміни умов зіткнення пластин, що в свою чергу впливає на характер властивостей одержуваного композиту [6].

Порівняно з кутовою схемою зварювання вибухом, у паралельній схемі кут  $\alpha$  дорівнює нулю, у цьому випадку створюються умови при деяких припущеннях для квазістаціонарного перебігу процесу з постійними величинами –  $\gamma$ ,  $V_c$ ,  $V_k$ , що дозволяє застосовувати її реалізації більшості практичних завдань. У схемі з паралельним розташуванням зварюваних пластин швидкість руху точки контакту, що показує швидкість поширення зони високого тиску по поверхні, що зварюється приймається рівною швидкості детонації вибухової речовини [4]:

$$V_k = D$$

При нормальному зіткненні елементів, що метаються, їх швидкість може бути розрахована шляхом спільного вирішення системи рівнянь [5]:

$$V_0 = D \times \left[ 1 + \frac{\theta - 1}{\theta \times \eta} - \frac{\delta_0}{D \times t} \times \theta \right],$$

де  $V_0$  – швидкість при нормальному зіткненні, м/с;

$\eta$  – наведена маса, кг;

$t$  - час польоту пластини, с.

$$X = D \times t \times \left[ 1 + \frac{\theta - 1}{\theta \times \eta} \right] - \delta_0,$$

де  $X$  - елементарне переміщення елемента, що метається, мм;

$\theta$ - наведений час, з

$$\eta = \frac{16}{27} \times \frac{\delta_0 \times \rho_0}{\delta_1 \times \rho_1},$$

$$\theta = \left[ 1 + 2 \times \eta \times \left( 1 - \frac{\delta_0}{D \times t} \right) \right]^{-1/2},$$

При вирішенні системи вищезгаданих рівнянь виходить ряд значень швидкості метеного елемента та його переміщень для певних моментів часу, які з достатнім ступенем точності можуть бути використані для оцінки процесу зварювання вибухом [6]. До фізичних параметрів відносять величину тиску, час його дії та температуру в зоні зіткнення. Для оцінки верхньої межі тиску найкраще використовувати випадок нормального зіткнення, при якому в момент удару пластини стикаються по всій площі одночасно і контактної поверхні поширюються плоскі ударні хвилі. Розрахунок параметрів зварювання вибухом вісесиметричних заготовок значно складніше вищевикладеного (для плоских металевих листів).

Розрахунок ведуть з урахуванням поправочних коефіцієнтів, що враховують конфігурацію поверхонь, що ударяються, і опір металу, що діє на нього тиску. Основні закономірності утворення зварного з'єднання плоских металевих листів зберігаються і при зварюванні віссиметричних заготовок [7].

На основі розглянутих вище кутової та паралельної схем зварювання вибухом засновано все різноманіття технологічних рішень, розроблених у галузі зварювання вибухом конкретних композиційних матеріалів. Так, наприклад, отримання біметалу із пластин рівної товщини можна реалізувати за симетричною схемою, представленою на рисунку 2.4.

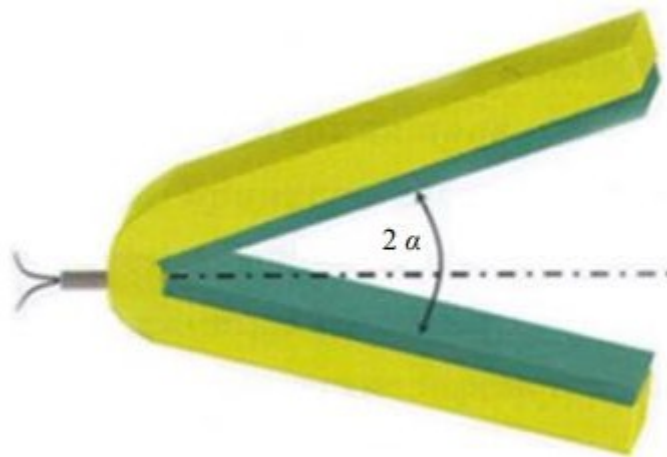


Рисунок 2.4 – Симетрична схема зварювання вибухом плоских заготовок

При виготовленні зварюванням вибухом багатошарових композитів, паралельна схема трансформується в одночасну схему зварювання, в якій з'єднання трьох і більше металевих листів здійснюється за рахунок енергії, що виділяється при детонації одного заряду [8, 9].

З урахуванням вищевикладеного при зварюванні вибухом багатошарових композиційних металевих матеріалів для виготовлення композитного ріжучого інструменту, що складається з трьох, п'яти і більше шарів, слід використовувати одночасну (паралельну) схему зварювання вибухом плоских заготовок. Паралельне розташування поверхонь, що

зварюються, набуло більшого поширення. Умови зварювання однакові майже на всій площі поверхні, що зварюється, тому розмір заготовок не обмежується. На опорі, яка може перебувати на ґрунті, бетоні або сталевому підставі розташовують нерухому пластину, яка є основою, потім на деякій відстані паралельно розміщують пластину, що метається.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Композиційні матеріали становлять величезний інтерес у розвитку промисловості машинобудування - а також для різних шляхів вирішення завдань матеріалознавства. Адже найчастіше традиційні матеріали не можуть вирішити покладені на них завдання, а саме забезпечити високі механічні, фізико-хімічні, технологічні та експлуатаційні властивості. Дослідження властивостей композитів та фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні контакту заготовок при зварюванні вибухом, дає можливість отримувати матеріали з унікальними властивостями, що відкриває безліч нових можливостей для вирішення проблем матеріалознавства.

Особливий інтерес представляють композиційні матеріали з різноманітних металів, адже вони доповнюють одне одного, поєднують у собі різноманітні властивості, що зумовлює широке поле їх можливих застосувань. Так, композити на основі міді та сталі інтегрують у собі конструкційну міцність з високою температурою плавлення та теплопровідністю. У результаті ми отримуємо перспективний матеріал, який допоможе відкрити нові можливості, наприклад, у виготовленні деталей вузлів електротермічного та теплообмінного обладнання.

Зварювання вибухом є високоінтенсивним короточасним впливом і дозволяє отримувати багат шарові композиційні матеріали з покращеними властивостями, у тому числі міцнішими, корозійно-стійкими, жароміцними. Саме структура перехідної зони визначає міцність з'єднання матеріалів, що зварюються, тому саме вона зазвичай є об'єктом дослідження. На сьогоднішній день існує багато думок щодо природи міцності з'єднання при зварюванні вибухом. Дослідники, що працюють у цій галузі, не дійшли єдиної думки у цьому питанні: обговорюються такі гіпотези, як локальне розплавлення матеріалів, що зварюються в перехідній зоні з подальшим їх перемішуванням; інтенсивна пластична деформація прикордонних шарів;

утворення нових фаз, та ін. Мабуть, відсутність єдиної думки про структурні зміни в перехідній зоні пов'язано з фізико-механічними властивостями матеріалів, що з'єднуються, їх розмірами (товщиною) і параметрами зварювання.

### 3.1 Матеріали дослідження

В якості вихідних матеріалів для отримання шаруватих композитів були обрані низьковуглецева листовая сталь 10 технічно чиста мідь (М1). Хімічний склад даних сталей та алюмінієвих сплавів, визначений на приладі СРЕКТРОМАХх, зазначений у таблицях 2.1 та 2.2, а для міді марки М1 вміст хімічних елементів наведено у таблиці 2.2

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталей

Матеріал	Елементи, мас. %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Al	Ti	Cu	Др. ел.
20	0,12	0,8	2,0	18	0,035	5	8	-	-	0,02	0,3 As

Таблиця 2.3 - Хімічний склад міді М1 (ГОСТ 859-2001)

Елементи, мас. %										
Cu+Ag	Bi	Fe	Ni	Zn	Sn	Sb	As	Pb	S	O
99,9	0,001	0,005	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004	0,05

Для отримання шаруватих композиційних матеріалів використовувалися такі поєднання сталей, кольорових металів та їх сплавів. Для отримання шаруватих бороалюмінієвих композитів використовували листові та порошкові матеріали.

Виготовляє композиційні матеріали з використанням прокатного лабораторного стану Дуо з діаметром валком 200 мм





Рисунок 3.1 - Прокатний стан Дуо

Технологія виготовлення та обробки досліджуваних матеріалів

Для виготовлення шаруватих композитів використовували, залежно від вибраної пари вихідних матеріалів, такі технології виробництва, як зварювання вибухом. Зварювання вибухом для отримання нероз'ємних шаруватих сполук типу «мідь-сталь» виконувалось у лабораторних умовах кафедри МТЕТБ.

Для отримання шаруватого композиту «мідь-сталь» використовувалася технологія зварювання вибухом з холодною прокаткою композиту з обтисненням 50 %.

Методи структурних досліджень

Для дослідження структури монолітних зразків і композиційних матеріалів використовували методи оптичної мікроскопії (ОМ), растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та електронної мікроскопії (ПЕМ), що просвічує. Застосування трьох методик мікроскопічних досліджень структури дозволяє отримати більш точні дані щодо структурних показників матеріалу. ОМ дає загальне уявлення про структурні складові, їх дисперсність та зміст неметалевих включень. Аналіз мікроструктури

методом дифракції назад розсіяних електронів (EBSD-аналіз), який проводиться на базі РЕМ, забезпечує більшу статистичну вибірку експериментальних результатів, а електронна мікроскопія, що просвічує, – більший просторовий дозвіл, але при цьому результати досліджень є якісно подібними. Аналіз мікроструктури окремих шарів СМКМ проводився на шліфах у поперечному напрямку прокатки TD (transverses direction) (рисунок 2.2) та тонких фольгах з окремих сталевих шарів композитів.

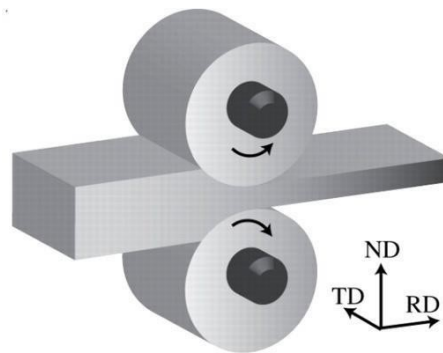


Рисунок 2.2 – Орієнтації зразка щодо напрямку прокатки

Мікрорентгеноспектральний аналіз зон, прилеглих до меж розділу, для оцінки глибини протікання дифузійних процесів виконували на растровому електронному мікроскопі TESCAN VEGA II XMU з вбудованими енергодисперсійною INCA Energy 450XT і хвиледисперсійною INCA Wave 700 приставками для локального мікрорентгеноспект. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу були побудовані концентраційні криві, що відображають розподіл хімічних елементів на межі розділу різнорідних шарів та визначено ширину дифузійної зони.

#### Вивчення будови поверхонь руйнування

Дослідження морфологічних особливостей будови зламів та вивчення макро- та мікромеханізмів руйнування шаруватих композитів та їх вихідних складових на різних масштабних рівнях після статичних та динамічних випробувань проводили на оптичному мікроскопі МБС-10 ( $\times 5 \dots \times 20$ ) та на растровому електронному мікроскопі TESCAN VEGA II XMU ( $\times 50 \dots \times 5000$ ) при величині напруги, що прискорює 30 кВ, а також на оптичному

профілометрі Wyko NT1100. Мікрофрактографічні дослідження зразків проводились у центральній частині шарів іди безпосередньо на межі їх з'єднання вздовж напрямку руху магістральної тріщини.

### **3.2 Структура композитів на основі міді та сталі, отриманих зварюванням вибухом**

У групі біметалічних і шаруватих матеріалів значний інтерес представляють композити на основі міді [3, 4], що володіють великим градієнтом фізико-механічних властивостей, що зумовлюють перспективність їх застосування для виготовлення основних деталей та вузлів електротермічного та теплообмінного обладнання, а також апаратів для теплових продуктів харчування, в яких забезпечуватиметься швидке та рівномірне нагрівання робочої поверхні [5, 6]. Особливе місце серед композитів на основі міді займає з'єднання «мідь-сталь», в якому висока температура плавлення, теплопровідність та коефіцієнт термічного розширення міді у поєднанні з високою конструкційною міцністю сталі надають унікальні функціональні та експлуатаційні властивості шаруватому матеріалу. Дослідженню композиційних матеріалів «мідь-залізо», отриманих методами дифузійної сполуки або зварюванням вибухом, присвячено низку робіт [17-19]. Однак, питання впливу вибухового впливу та додаткової деформаційної обробки на тонку структуру та механічні властивості сталемідних зварних композитів залишаються недостатньо вивченими та потребують більш детального розгляду.

У зв'язку з цим у цій частині роботи було досліджено структуру та механічні властивості тришарових композитів «мідь М1-сталь 20», отриманих за технологією зварювання вибухом з міді марки М1 і сталі 20 у вигляді відпалених і гарячекатаних листових заготовок товщиною 2мм.

Зварні композити піддавалися додатковій холодній прокатки зі ступенем обтискання 50%.

### 3.3 Мікробудування покриттів в композиті «мідь М1-сталь 20»

Мікрофотографії зварного з'єднання «мідь М1-сталь 20» свідчать про те, що в результаті зварювання вибухом сформувалася характерна для зварних з'єднань кордон, що має хвилеподібний вигляд (рисунок 3.1). Такий характер міжшарових кордонів збільшує міцність з'єднання шарів різнорідних металів [7]. Спостережувана асиметрія хвиль зварного з'єднання пов'язана з різницею в щільності матеріалів, що зварюються [8]. Після додаткової холодної прокатки хвильовий профіль зварного шва змінюється: хвилі стають переривчастими і нерегулярними по довжині зварного шва. Хвиляста межа розділу набуває більш згладженого вигляду. На рисунку 3.1 виділено області А та В, які при більшому збільшенні наведені на рисунку 3.3.

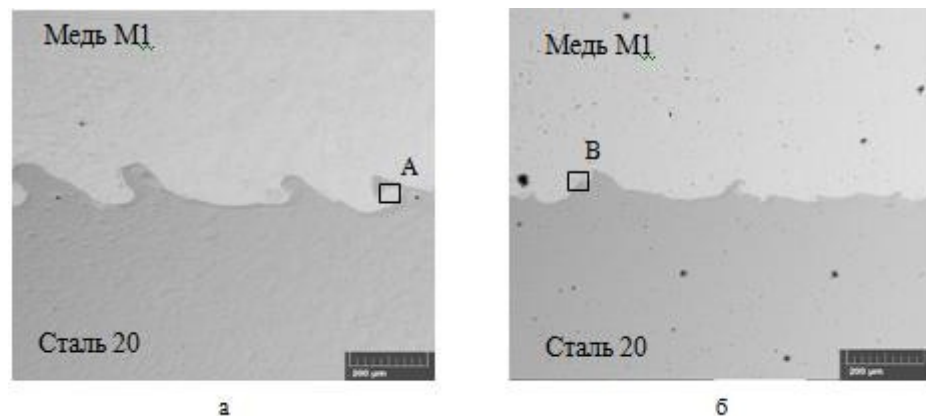


Рисунок 3.1 – Зона з'єднання стали 20 та міді М1 після зварювання вибухом (а) та після додаткової холодної прокатки з обтисканням 50 % (б)

У ході дослідження зварного з'єднання методом мікрорентгеноспектрального аналізу на сканувальному електронному мікроскопі було виявлено область різкого концентраційного переходу, що

переважає в основному по всій межі зварного шва (рисунок 3.2 а). Однак, на межі досліджуваного композиту виявлено локальні дифузійні зони проникнення мідь у сталь та заліза в мідь шириною до 20 мкм (рисунок б). Структура зварного шва включає також зони локального розплавлення (рисунок 3.2), де спостерігаються хаотичне зміна хімічного складу. Як відомо з роботи [16] та ін., Процес утворення зварного шва часто супроводжується формуванням поблизу гребенів і западин вихрових зон. Найбільшою мірою деформований матеріал нагрівається саме тут. Тепло, що виділяється у вихорах, достатньо для утворення зони локального розплавлення. Тепло, що інтенсивно виділяється, сконцентровано в малих обсягах, які оточені відносно холодним металом, що забезпечує прискорений тепловідведення. У роботі [15, 9] відсутність зон локального розплавлення в навколошовної зони зварного з'єднання Fe-Cu пояснюється високою теплопровідністю міді: мідь ефективно поглинає тепло, що виділяється при вибуховому навантаженні, не викликаючи при цьому розплавлення металу. Незважаючи на цей факт, у досліджуваному в дисертаційній роботі композиті «мідь М1-сталь 20» поблизу хвилеподібної межі розділу боку мідної пластини є зони локального розплавлення, їх будова та розташування не регулярно щодо хвилеподібної межі розділу.

Зони локального розплавлення складаються із суміші твердих розчинів міді в  $\alpha$ -залізі та заліза у міді ( $\epsilon$ ), а також частинок сталі, утворених у результаті фрагментації типу дроблення (рисунок 3.3 а). Цей тип фрагментації запропоновано і докладно вивчений різних видах зварних з'єднань різнорідних матеріалів авторами роботи [3]. Фрагментація типу дроблення, що спостерігається при зварюванні вибухом, полягають у розбиття (дроблення) матеріалу на слабко пов'язані мікрооб'єми і відбувається за час протікання вибуху. На рисунку 3.3 добре видно проникнення фрагментів сталі в зону локального розплавлення.

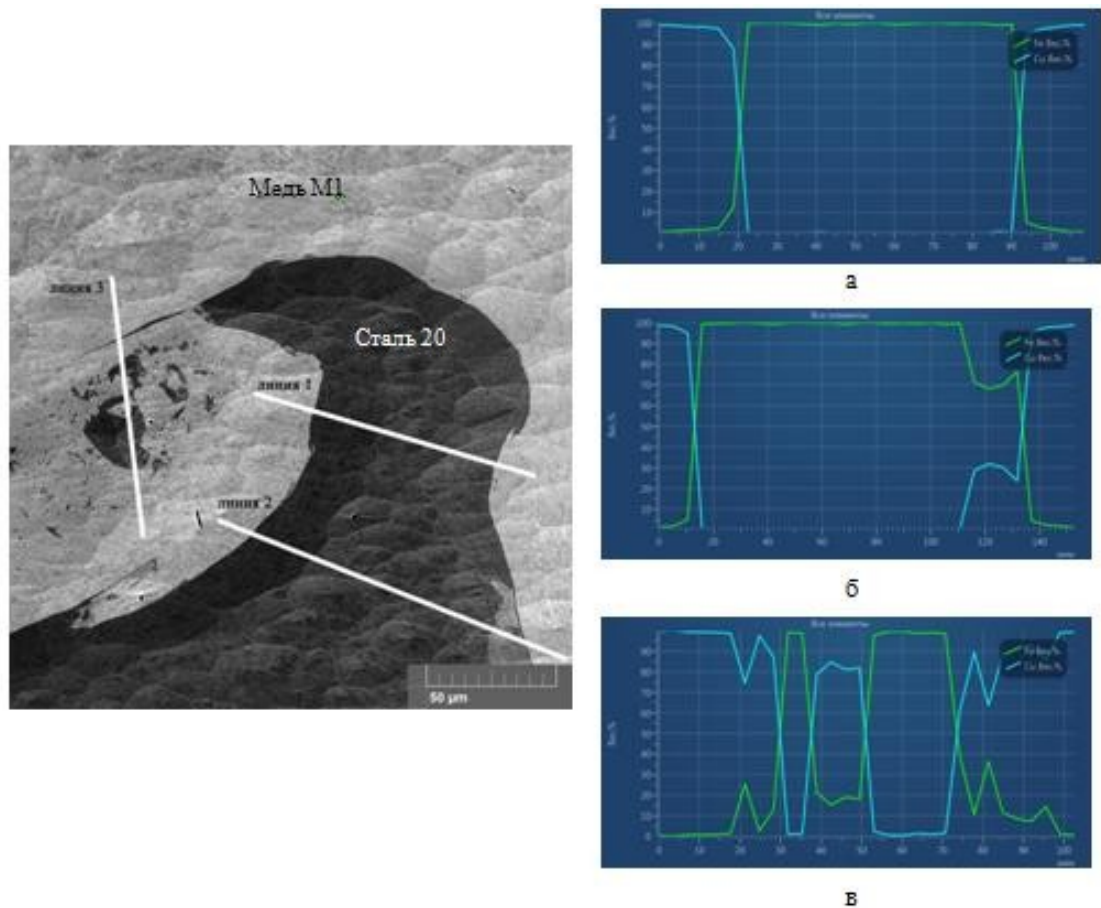


Рисунок 3.2 — Розподіл елементів Fe та Cu на хвилі зварного шва по лінії 1 (а), лінії 2 (б) та в зоні локального розплавлення по лінії 3 (в)

Розміри фрагментів сталі варіюються від 05 мкм до 20 мкм. У цій зоні спостерігаються також мікропори, які виникли, ймовірно, при усадці в ході кристалізації розплаву. Структура зони перемішування, всупереч очікуванням, не лита з характерною дендритною структурою, а субмікрокристалічна із середнім розміром структурних елементів  $\leq 1$  мкм, а в деяких ділянках нанокристалічна (рисунок 3.3 б-г).

Формування локальних ділянок з ультрадрібнокристалічною структурою є результатом протікання в процесі зварювання вибухом високошвидкісних процесів нагрівання та прискореного охолодження за рахунок високої теплопровідності міді. Нанокристалічна структура зони локального розплавлення поблизу межі зварного шва титану та орторомбічного алюмінію титану також спостерігалася у роботі [16]. Як вважають автори [12], фрагментація типу дроблення супроводжується



виділення великої кількості теплоти, і як наслідок, оплавленням менш міцного менш тугоплавкого матеріалу пари, що зварюється. У нашому випадку додаткове виділення тепла викликає локальне розплавлення міді та формування зон локального розплавлення із включеннями у вигляді частинок сталі різної розмірності.

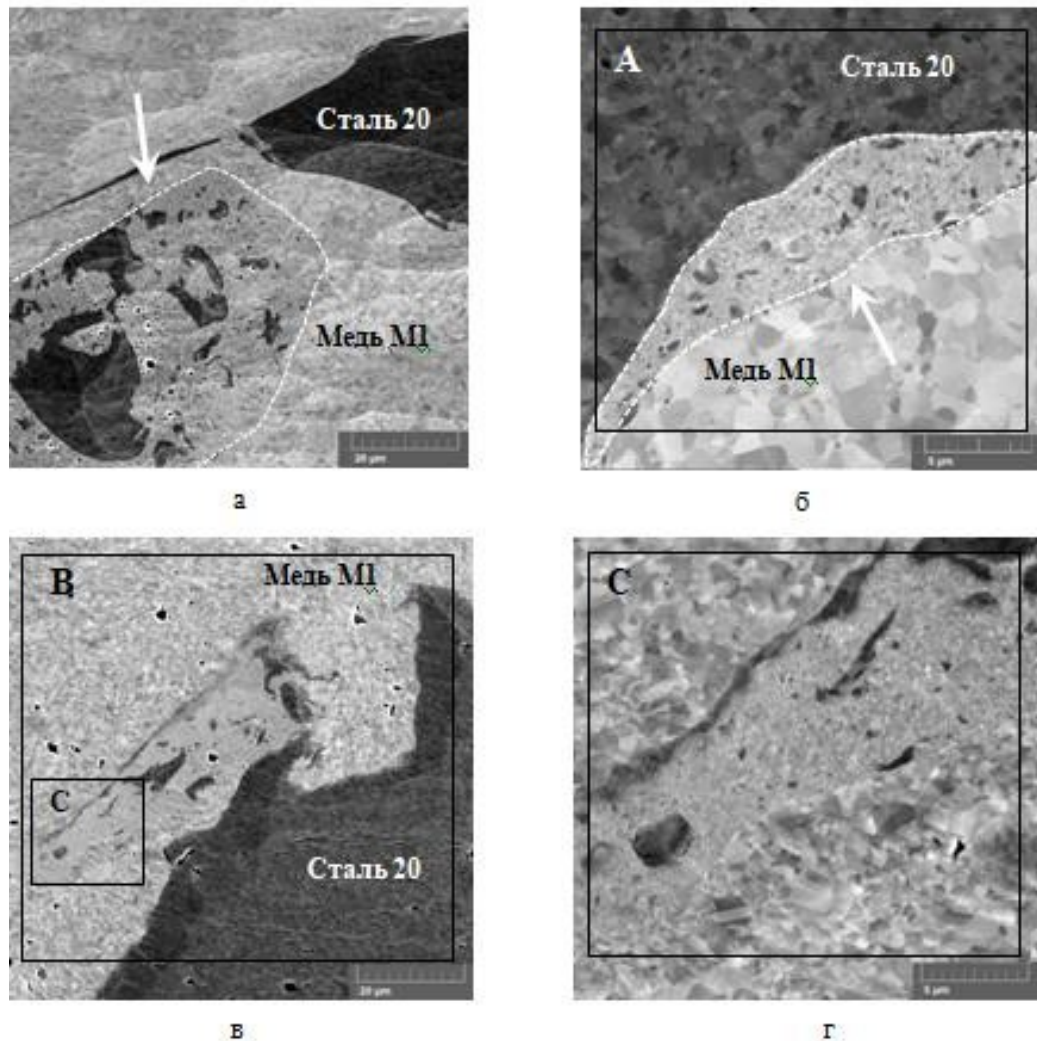


Рисунок 3.3 – Зони локального розплавлення з фрагментами сталі після зварювання вибухом (а-б) та після додаткової холодної прокатки з обтисканням 50% (в-г)

Мікроструктура композиту «мідь М1-сталь 20» та його складових у вихідному стані. Як видно з рисунка 3.4 а, мідь марки М1 у вихідному стані містить зерна - фази рівноосної форми середнім розміром  $\sim 6$  мкм при середньому коефіцієнті форми зерна  $R=0,6$ . Значення коефіцієнта форми  $R$  згідно [16] визначається методом EBSD-аналізу шляхом

апроксимації зерна еліпсом та вимірювання аспектного відношення еліпса (відношення довжини малої осі еліпса до довжини великої осі) та чисельно характеризує витягнутість зерна. У середині великих зерен спостерігаються у вигляді паралельних прямолінійних і перетинають їх наскрізь двійники відпалу, яким відповідає пік 60 на гістограмах розподілу розорієнтування меж зерен. (рисунок 3.4 б). Середній розмір зерна становить  $\sim 6$  мкм за середнього коефіцієнта форми  $R=0,4$ . Частка малокутових кордонів становить у зоні всього  $\sim 7\%$ , що характерно для відпаленого стану металу. Після формування композиту за технологією зварювання вибухом мікроструктура міді у центральній частині шару практично не змінюється. Слабке спотворення меж двійників вказує на те, що при зварюванні вибухом основна частина матеріалу пластин випробовує незначну пластичну деформацію (рисунок 3.4 д). Однак, збільшення частки малокутових кордонів з  $7\%$  до  $23\%$  у ході зварювання вибухом свідчить про розвиток комірчастої структури з малокутовими розоорієнтування кордонів осередків. Наступна холодна пластична деформація (ХПД) прокаткою з обтисканням  $50\%$  сильно видозмінює мікроструктуру міді. Зерна втрачають свою рівності і витягуються в напрямку прокатки під дією зсувної деформації (рисунок 3.4 і). Вихідні зерна в ході прокатки набувають розміру в поперечному напрямку  $3-5$  мкм і в поздовжньому напрямку до  $20$  мкм. Частка малокутових кордонів становить  $\sim 62\%$ . У міру накопичення деформації у структурі міді йде розвиток комірчастої дислокаційної структури, яка розбивається на мікрооб'єм розділеними субмежами. У міру збільшення ступеня деформації збільшується кутова розорієнтування кордонів субзерен і після досягнення розорієнтування більше  $15^\circ$  кордону прийнято вважати висококутовими, а такі субзерна - зернами. Середній розмір зерна в міді зменшується до  $\sim 3,3$  мкм за коефіцієнт форми  $R=0,27$  за рахунок формування нових зерен розміром до  $1$  мкм. Динамічна рекристалізація протікає неоднорідно в обсязі металу: структура міді після прокатки складається переважно з деформованих витягнутих зерен,

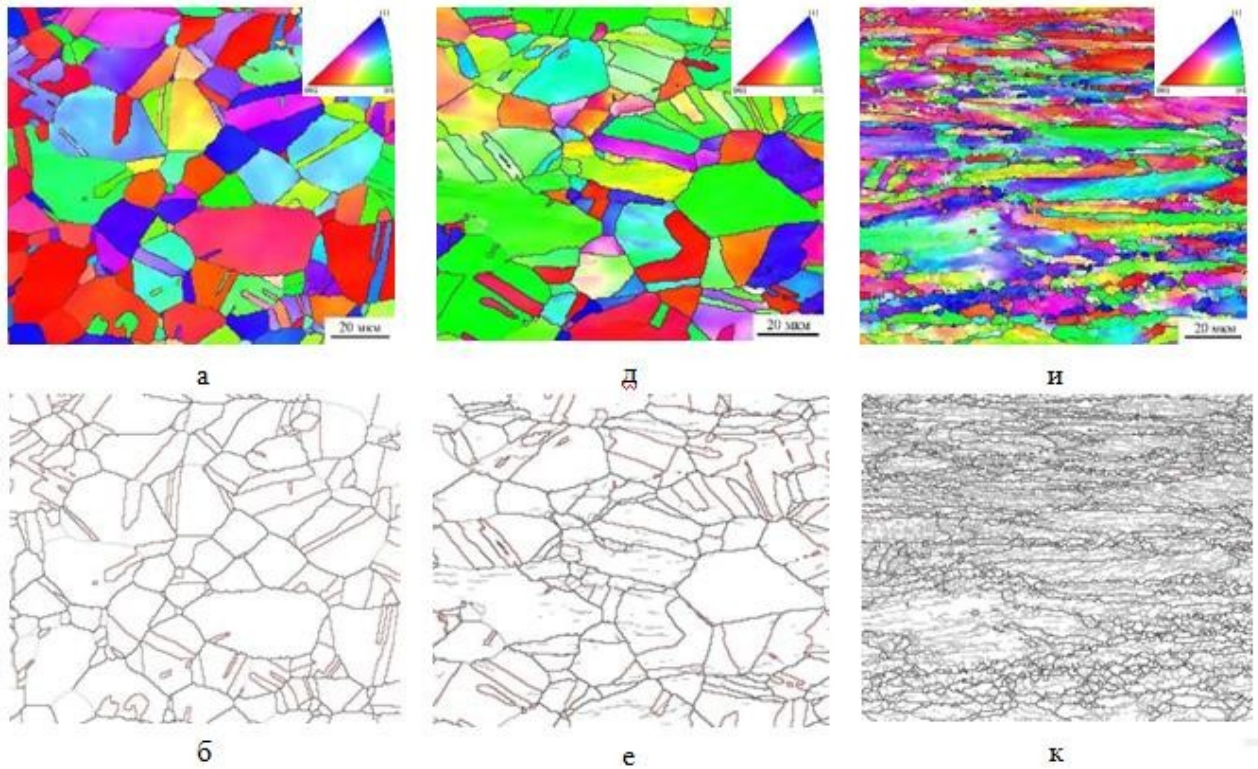


а також ансамблів рекристалізованих зерен, що повністю поглинули вихідні зерна. Різна палітра кольорів деформованих зерен на EBSD-картах розорієнтувань вказує на відсутність переважної кристалографічної орієнтування зерен, яка, як відомо, з'являється поступово в міру накопичення деформації. Статистичні дані розподілу розорієнтування та розмірів зерен для міді М1 у досліджуваних станах наведені у вигляді гістограм на рисунку 3.4.

Сталь 20 в якості заготовки для отримання зварного композиту являла собою листовий горячекатаний матеріал. Мікроструктура сталі 20 у вихідному стані складалася з фериту та дрібнопластинчастого перліту при середньому розмірі зерна фериту  $\sim 5,3$  мкм та середньому коефіцієнті форми  $R=0,6$  (рисунок 3.5 а). Частка малокутових кордонів становить аналізованої зоні  $\sim 75$  %. Після вибухового навантаження у структурі сталі у навколошовній зоні відбувається подрібнення зерен фериту до  $\sim 4,2$  мкм при середньому коефіцієнті форми  $R=0,7$  (Рисунок 3.5 д). Незважаючи на зменшення середнього розміру зерна після вибухового навантаження всього на  $\sim 1$  мкм, на EBSD-карті розорієнтувань і графіку розподілу можна спостерігати помітне зниження частки великих зерен у структурі металу.

Частка малокутових кордонів зберігається колишньому рівні  $\sim 75$  %. Після холодної прокатки композиту в експерименті зафіксовано витягування зерен фериту в напрямку прокатки (рисунок 3.5 і). Поперечний розмір вихідних деформованих зерен становить  $\sim 2$  мкм, а поздовжній розмір до 15 мкм. Середній розмір зерна фериту становив  $\sim 2,5$  мкм за середнього коефіцієнта форми  $R=0,27$ . Таке сильне диспергування структури відбувається з допомогою появи нових рекристалізованих зерен розміром до 1 мкм. Формування нових зерен протікає за рахунок зростання розорієнтувань між субзернами в міру накопичення деформації. При цьому процес диспергування структури супроводжується зменшення частки малокутових кордонів від 75 до 50% і зростанням частки висококутових відповідно (рисунок 3.5, ж, л). Такі

зміни розподілу кутів розорієнтування меж зерен є типовими при реалізації механізму безперервної динамічної рекристалізації.



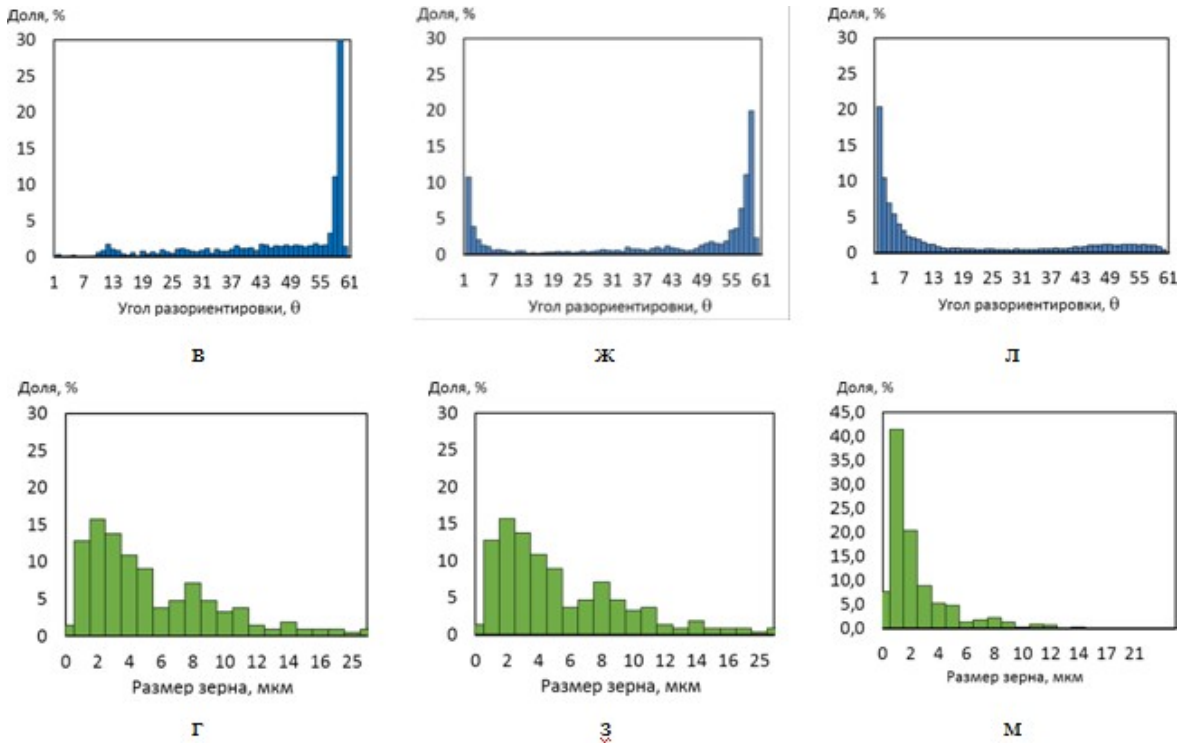
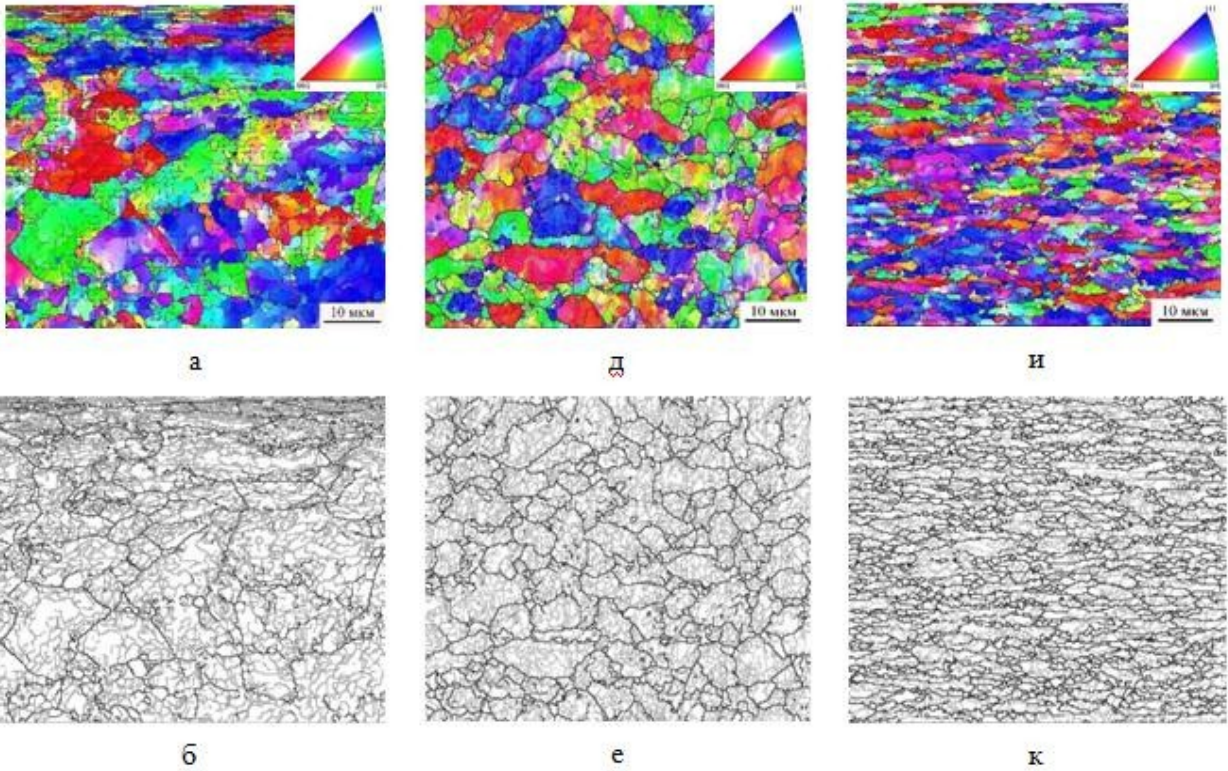


Рисунок 3.4 – EBSD-карти розорієнтувань міді М1 та гістограми розподілу розорієнтувань та розміру зерен у вихідному стані (а-г), у складі варного композиту (д-з), у складі зварного композиту після ХПД 50 % (і-м). Чорним кольором показані висококутові межі ( $15^{\circ} \leq \theta$ ), а сірим кольором – малокутові кордони ( $2^{\circ} \leq \theta < 15^{\circ}$ ), червоним – двійникові кордони.



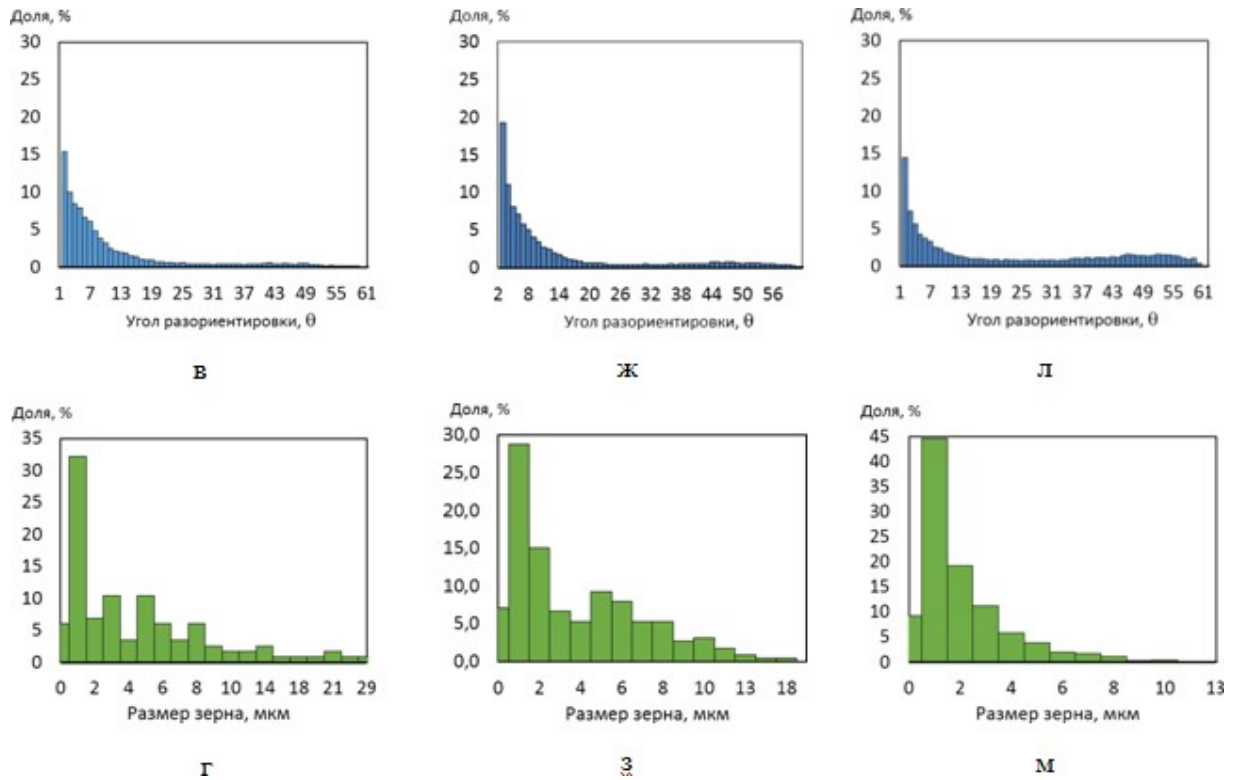


Рисунок 3.5 — EBSD-карти розорієнтувань сталі 20 та гістограми розподілу розміру та розорієнтування зерен у вихідному стані (а-г), у зварному композиті (д-з), у зварному композиті після ХПД 50% (і-м). Чорним кольором показано висококутові кордони ( $15^\circ \leq \theta$ ), а сірим кольором – малокутові кордони ( $2^\circ \leq \theta < 15^\circ$ ).

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА [25-27]

### 4.1 Опис небезпечних факторів на прокатних станах

- Механізація технологічних процесів зменшила число «пасток», але вони все ще існують, особливо на установках холодної та чистової прокатки.

-. У будь-якому прокатному стані існує ризик попадання між вальцями.

- Серйозні травми можна отримати під час роботи з ріжучими та кромкообрізними верстатами та ножицями гільйотинами, якщо їх небезпечні частини не обгороджені належним чином.

- Серйозні травми, особливо в гарячій прокатці, можуть бути отримані, якщо робітники намагаються перетнути роль ганг у невстановлених місцях.

- Використання великої кількості нафти, інгібіторів корозії тощо, які зазвичай застосовуються шляхом розпилення, представляє одну з характерних небезпек для працюючих на листопрокатних станах.

- Навіть у автоматизованих цехах можливі нещасні випадки під час робіт із заміни важких вальців у клітях.

-. Опіки, очні та інші травми в гарячій прокатці можуть бути викликані окалиною, що розлітається, і частинками пилу, а також ударами кінців кабелів. Очі можуть також страждати від надто яскравого світла.

- Якщо працівники стосуються гострого краю сталевого листа чи смуги, вони можуть порізатися.

-. При недокаті у вигляді «гармошки» або перекосах матеріал, що застряг у вальцях і викидається в робочу зону, може завдати працівникам серйозних травм.

- При згортанні легованої свинцем сталі або використання відрізних дисків, що містять свинець, виникає небезпека вдихання отруйних частинок. Тому необхідно постійно контролювати концентрацію свинцю на робочому місці, а робітники, які піддаються ризику вдихання свинцю, повинні

регулярно проходити медичний огляд. Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну та сталі 10

- Зварювання встик призводить до утворення озону, який при вдиханні може викликати подразнення, подібне до того, що викликає (NOx). Робочі нагрівального колодязя і нагрівальної печі можуть зазнавати впливу шкідливих газів, склад яких залежить від палива, що використовується (колошниковий газ, коксовий газ, нафта) і зазвичай включає окис вуглецю і двоокис сірки.

### **Стратегії контролю**

- Захоплення вальців повинні бути ретельно огорожені відповідно до проведеної оцінки ступеня небезпеки, і повинен здійснюватися суворий нагляд з метою запобігання травмуванню обладнанням, що обертається і рухається.

- Небезпечні частини необхідно надійно огородити з метою запобігти серйозним травмам від різальних і крім кообрізних верстатів, а також гільйотинних ножиць.

- Для проведення обслуговування та ремонту необхідно налагодити ефективну систему відключення та маркування несправних деталей або машин.

- Необхідно звернути увагу на безпеку порізів при роботі на смугу та листопрокатних станах.

- Необхідно прокинути достатню кількість містків із відповідними перильними огорожами та зобов'язати працівників користуватися ними.

- Крім регулярного очищення підлог з метою запобігти підскальзування, спотикання і падіння, необхідно монтувати обрешітки і видавати працівникам по ковтаючі матеріали і чоботи з протиковзкими по дошвами.

- Оптимізація планування дозволяє знизити годину заміни вальців. Заміна важких вальців у клітках не повинна проводитися поспіхом і без належних інструментів.



- Мастильноохолоджувальні рідини для прокатки та інші мастильні та охолоджувальні агенти на водній основі необхідно регулярно міняти для того, щоб уникнути зараження бактеріями. Там, де для цієї мети використовуються бактеріцидні речовини, вони не повинні бути отруйними для працівників, - ні самі по собі, ні в поєднанні з іншими інгредієнтами.

- Пости управління мають бути спроектовані з урахуванням вимог ергономіки. Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості.

## **4.2 Установки нанесення покриттів**

### **Опис небезпечних факторів:**

- Установки нанесення покриттів використовують різні типи матеріалів для нанесення на поверхню сталі. Вони можуть включати, серед іншого, цинк, цинкові сплави, олово, хром і пластмаси у вигляді рідин, твердих речовин або розплавлених металів, які згодом затверджуються або спікаються нагріванням, або листові матеріали, що закріплюються на поверхні металу за допомогою клею. Деякі пластифікатори мають алергічну дію на шкіру. Металеві дими, наприклад, хрому та цинку, можуть бути отруйними.

- Багато установок нанесення покриттів використовують відпалювальні печі, гарячі розчини в цеху зачистки, електроліти та розплави, роботів, що виконують завантаження та вивантаження рулонів, а також пов'язані з цим стропувальні функції.

- Зазвичай біля установки нанесення покриттів розташовано кілька майданчиків для зберігання рулонів. Краї рулонів зазвичай є гострими.

### **Оцінка ризиків**

- Експлуатація печей, відкритого вогню, гарячих розчинів та розплавленого металу становить ризик впливу надмірних температур; ця

небезпека посилюється в спекотному та вологому кліматі, а особливо при носінні захисного спецодягу та засобів індивідуального захисту.

- Цинкові тиглі можуть нагріватися за допомогою електромагнітної індукції. У цих зонах можуть існувати потужні магнітні поля.

### **Стратегії контролю**

-Для захисту персоналу, зайнятого виробничою діяльністю та технічним обслуговуванням, від таких небезпек, як хімічні ванни, нагріті поверхні та розплавлений метал, повинні використовуватися огороження, поручні, камери та попереджувальні знаки. Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну та сталі 10

- Навчання та підготовка працівників мають виняткову важливість як у разі приходу на нову для працівника роботу, так і коли в обладнання або технологію вносяться зміни.

- Працівники повинні забезпечуватись відповідними ЗІЗ.

- Слід виявляти обережність як при вступі на майданчик для зберігання рулонів, так і просто при знаходженні поряд з якимось рулоном. На майданчик для зберігання рулонів мають входити лише уповноважені на це люди.

- Специфікації безпеки матеріалів, що відображають хімічні та фізичні джерела небезпеки, необхідно надавати для всіх небезпечних хімічних речовин, причому мовою, зрозумілою працівникам та відповідним рівнем їх утворення.

- Працівники та керівництво повинні вміти розпізнавати симптоми термічного стресу.

- Зони, в яких діють сильні електромагнітні поля, повинні бути позначені попереджувальними знаками, і особи з електронними стимуляторами серця або металевими імплантатами повинні уникати їх.

- Будь-які хімічні речовини повинні оцінюватися з точки зору їхньої потенційної токсичності та фізичної небезпеки, і більш небезпечні матеріали необхідно замінювати на менш небезпечні скрізь, де це можливо.



- Технології покриття металу, пов'язані з небезпечними забруднювальними речовинами, можуть вимагати встановлення місцевої витяжної вентиляції для видалення забруднювача від місця знаходження працівника. Повітрязбірні пристрої систем припливної вентиляції необхідно розташовувати далеко від випускних труб, щоб потенційно отруйні гази не могли знову потрапити у вентиляційну систему.

### **Правила техніки експлуатації**

- Робоче місце має бути спроектоване так, щоб подача сировини та видалення продукції відбувалися без завад для безпечної роботи.

- При зберіганні та перевезенні повинен дотримуватися принципу безпечного поділу. Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості

### **Термообробка**

#### **Опис небезпечних факторів**

- При термообробці сталеві продукція контролювано нагрівається і охолоджується, внаслідок чого змінюються її фізичні або механічні властивості без зміни її форми. Термообробка використовується для зняття напруги в металі, що виникли під час холодної прокатки, для підвищення його твердості або міцності, або зміни електромагнітних властивостей. Деякі види термообробки включають загартування, коли нагріта сталь занурюється в холодну ванну з водою або олією, де вона швидко охолоджується. Найчастіше використовується технологія термообробки – це відпал, коли сталь повільно нагрівається, витримується при якійсь температурі, а потім охолоджується. Часто це відбувається в закритій печі, з використанням інертного газу для запобігання окисненню або іншого газу для надання сталі особливих властивостей.

- Небезпечні фактори в термообробці включають: опіки та обварювання, механічні джерела небезпеки при поводженні зі сталлю та небезпечні фактори відпалових газів, що включають азот, водень та окис вуглецю. Ізоляційні волокнисті матеріали для печей можуть наразити

працівників на небезпеки внаслідок контакту з волокнами.

### **Контроль за небезпечними факторами**

- Робоча зона та проходження через неї продукції повинні бути продумані так, щоб мінімізувати контакт працівників з гарячою сталлю і можливість обварювання в результаті гартових операцій.

- З інертними відпаловими газами слід звертатися так, щоб запобігти їхньому скупченню в закритих приміщеннях крім самої печі, щоб уникнути удушення. Відпалювальні печі повинні вважатися небезпечними замкнутими просторами.

- Методика поведіння з займистими газами (наприклад, воднем) повинна мінімізувати можливість скупчення вибухових сумішей. Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну та сталі 10

- Окис вуглецю не повинен використовуватися для вуглероджування (збільшення вмісту вуглецю в поверхневому шарі металу), якщо є можливість застосувати більш безпечну технологію.

- У печі необхідно використовувати найбільш безпечний із можливих ізоляційних матеріалів. Говорячи загалом, це означає використання ізоляційних волокнистих матеріалів з низьким вмістом волокон, що вдихаються, які не перетворюються на кремнезем при нагріванні. Ніколи не слід використовувати стиснене повітря для очищення з виготовлених з волокнистих ізоляційних матеріалів залишків ущільнень навколо корпусів відпалювальних печей.

## **4.3 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)**

### **Загальні засоби**

- Як додатковий захист проти впливу небезпечних умов у виробництві чавуну та сталі, у випадку, якщо безпеку працівників неможливо забезпечити іншими засобами (усунути небезпеку, контролювати ризики в момент їх

виникнення або мінімізувати їх), працівники повинні використовувати застосовані в даній ситуації та адекватні ЗІЗ, обрані відповідно до характеру роботи та пов'язаних з нею ризиками у консультації з працівниками та їх представниками; ці кошти повинні надаватися та обслуговуватися роботодавцем без оплати з боку працівників.

- Надані ЗІЗ повинні відповідати встановленим національним стандартам і критеріям, затвердженим або визнаним компетентними органами.

- Відповідальні за керівництво програмою індивідуального захисту та її виконання повинні мати підготовку на вибір належного обладнання, його правильне припасування для кожної людини, яка його використовує, бути знайомі з природою небезпечних факторів, від яких це обладнання має захищати, знати, як забезпечити прийнятний комфорт, і які будуть наслідки його поганої роботи або відмови.

- ЗІЗ необхідно вибирати з урахуванням особливостей користувача та створюваного ними додаткового фізичного навантаження або інших несприятливих наслідків їх носіння. Їх необхідно використовувати, обслуговувати, зберігати та замінювати відповідно до стандартів або рекомендацій для кожного небезпечного фактора, виявленого на виробничій ділянці, та згідно з інформацією виробника.

- ЗІЗ необхідно періодично перевіряти з метою переконатися, що вони перебувають у хорошому стані.

- Різні ЗІЗ та їх частини повинні бути сумісні між собою, якщо вони мають носитися спільно. Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну та сталі 119

- ЗІЗ повинні бути спроектовані з урахуванням вимог ергономіки і, наскільки це можливо, не повинні обмежувати рухливість користувача або його поля зору, слух або інші здібності сприйняття.

- Роботодавці повинні переконатися, що працівники, зобов'язані носити ЗІЗ, повністю поінформовані про вимоги та причини такої необхідності і

мають відповідну підготовку в тому, як вибирати, обслуговувати та зберігати це обладнання.

- Коли працівників належним чином поінформували, вони повинні використовувати видане їм обладнання протягом усього часу, коли можуть наражатися на той ризик, від якого ці ЗІЗ захищають.

- Особливі ЗІЗ для використання при знаходженні поруч із розплавленим металом повинні захищати користувача від теплового випромінювання та повинні витримувати бризки розплавленого металу. Необхідно, щоб ці засоби швидко знімалися у разі попадання розплавлених матеріалів між тілом та спецодягом.

- ЗІЗ не повинні використовуватися протягом часу більшого, ніж це зазначено виробником.

-. Працівники повинні правильно експлуатувати надані їм ЗІЗ та підтримувати їх у належному стані відповідно до своєї підготовки; для цього їм мають бути надані відповідні можливості.

- Перед тим, як повторно видавати спецодяг чи обладнання, роботодавці повинні забезпечити його прання, чистку та знезараження, а також провести обстеження захисного спецодягу або обладнання, які вже використовувалися раніше і тому можуть бути забруднені матеріалами, небезпечними для здоров'я.

-. Засоби захисту, які можуть нести у собі небезпечні здоров'я забруднення, нічого не винні стиратися, чиститися чи зберігатися в працівників будинку. Роботодавці повинні переконатися, що працівники не беруть забруднений спецодяг додому, і мають забезпечити чищення такого спецодягу без оплати з боку працівників.

-. ЗІЗ не повинні містити шкідливі речовини, наприклад, азбест. Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості

### **Захист голови**

- Каски для використання у чорній металургії та сталеливарній промисловості необхідно перевірити на стійкість до бризок розплавленого

металу.

- Будь-яка каска, що витримала важкий удар, повинна списуватися, навіть якщо зовні на ній немає ознак щодо ушкодження.

- При появі тріщин або у випадку, якщо на касці видно ознаки старіння або зношування ременів кріплення, її необхідно списати.

- Там, де існує небезпека контакту з токопровідними частинами, необхідно використовувати каски тільки з непровідних матеріалів.

- Каски для осіб, що працюють на висоті, повинні забезпечуватись підборідними ременями.

- Крім безпеки, слід звернути увагу на фізіологічні аспекти комфорту користувача. Каска повинна бути якомога легшою, кріпильні ремені повинні бути гнучкими і не повинні дратувати або травмувати користувача, а конструкція повинна включати пов'язку для захисту від поту.

- Будь-які запобіжні головні убори необхідно чистити та перевіряти регулярно.

### **Захист обличчя та очей**

- Для захисту проти часток, що розлітаються, диму, пилу та хімічних джерел небезпеки необхідно використовувати лицьовий захисний щиток або протектор для очей.

- При роботі біля печі та в інших умовах, пов'язаних з впливом високих температур у результаті знаходження поруч із джерелом теплового випромінювання, необхідно використовувати лицьові щитки. Також необхідно забезпечити захист проти іскор або інших гарячих предметів, що розлітаються. Переважний захист обличчя – пристрої типу каски та лицьових щитків.

- Оператори, зварювальники та їх помічники повинні носити захисні окуляри, каски або щитки, що дають максимальний захист очей у будь-яких зварювальних та ріжучих операціях.

- Зварювальні та ріжучі процеси, що виробляються на печах, пов'язані з випромінюванням в ультрафіолетовому, видимому і частині II. Безпечні

операції виробництва чавуну та сталі 121 інфрачервоному діапазоні спектру, неминуче надають несприятливий вплив на очі. При зварювальних операціях необхідно використовувати як захист каску та наручні щитки. Необхідно також забезпечити належний захист для помічника зварювальника та всіх осіб, які можуть зазнавати впливу небезпечних факторів.

- При експлуатації захисних пристроїв для очей та обличчя слід приділяти належну увагу комфорту та ефективності.

- Захисні пристрої повинні підганятися під індивідуальні особливості кожного користувача людиною, яка отримала відповідну підготовку.

- Комфорт особливо важливий у разі таких захисних пристроїв, як каски та каптури, оскільки їх носіння може стати майже нестерпним у жарких умовах. Для запобігання цьому можна використовувати спеціально підведені повітряні лінії.

- Захисні пристрої для очей та обличчя повинні забезпечувати адекватний захист завжди, навіть у разі експлуатації спільно з пристроями виправлення зору.

- Захисні пристрої для очей, у тому числі лінзи оптичної корекції, повинні бути зроблені з відповідного ударостійкого матеріалу.

### **Захист рук та ніг**

- При дії теплового випромінювання або поводженні з розжареними, небезпечними та іншими речовинами, здатними викликати пошкодження шкіри, необхідно користуватися захисними рукавичками або рукавицями, відповідними захисними кремами, а також відповідним одягом для належного захисту рук і ніг.

- Руки та ноги необхідно захищати від впливу фізичних, хімічних та інших небезпечних факторів.

- У чорній металургії та сталеливарній промисловості існує ризик опіків ніг розплавленим металом, іскрами або їдкими хімічними речовинами. У разі необхідності слід використовувати спецвзуття та інші засоби захисту ніг.

- Висота, до якої спецвзуття охоплює кісточку, коліна або стегно, залежить від конкретного небезпечного фактора, хоча необхідно враховувати також комфорт і рухливість. Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості

- Черевики або чоботи не повинні мати язичків, а штанини повинні натягуватися поверх халяв, а не заправлятися всередину.

- При виборі взуття необхідно враховувати проти ковзаючі властивості підошви.

- Для захисту ніг вище черевика необхідно використовувати гумові або металеві краги або гетри, особливо у разі ризику опіків.

- Можуть знадобитися захисні пристрої для колін, особливо при роботі, що вимагає вставати на коліна.

- Біля джерел тепла необхідно використовувати алюмінієві теплозахисні черевики, чоботи або гетри.

- Будь-яке спеціальне взуття повинне утримуватись у чистоті та зберігатись у сухому місці, якщо не знаходиться в експлуатації, а за потреби має негайно замінятись.

### **Устаткування захисту органів дихання**

- Коли неможливо здійснити ефективні технічні засоби контролю, або ці засоби перебувають у стані впровадження та оцінки, для захисту здоров'я працівників необхідно використовувати дихальні апарати, що відповідають характеру небезпечних факторів та ризиків.

- Коли неможливо адекватно оцінити небезпеки та ризики для того, щоб визначити відповідний рівень засобів захисту органів дихання, роботодавці повинні надати нагнітальні повітряні пристрої захисту органів дихання.

- При виборі дихальних апаратів необхідно надати відповідний спектр розмірів та моделей, щоб працівник міг вибрати собі підходящий. Різні розміри та моделі повинні охоплювати весь спектр особливостей будови обличчя. Необхідно перевіряти щільність при ляганні дихального апарату до

обличчя.

- Дихальні апарати необхідно чистити і періодично дезінфікувати. Дихальні апарати, призначені для аварійних випадків, необхідно чистити і дезінфікувати після кожного використання.

- Користувач повинен мати достатню підготовку і вміння поводитися з дихальним апаратом, щоб Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну і сталі безпосередньо перед кожним використанням він міг самостійно провести його огляд і переконатися, що той перебуває в робочому стані. Огляд може містити: (а) щільність з'єднань; (б) стан вхідних та вихідних клапанів; (в) внутрішнє оснащення; (г) вентилі; (д) сполучні трубки; (е) кріпильні вузли; (ж) шланги; (з) фільтри; (і) патрони; (к) індикатор закінчення терміну служби; (л) електричні компоненти; (м) дата закінчення терміну зберігання; (н) належне функціонування регуляторів, сигналізаторів та інших систем попередження.

- Дихальні апарати потрібно правильно зберігати. Якщо вони не захищені від фізичних та хімічних факторів впливу, вібрації, тепла, сильного холоду, надмірної вологості чи хімічних речовин, їх нормальна робота може бути порушена.

- Кожен дихальний апарат необхідно використовувати, розуміючи його обмеження, що в свою чергу залежать від ряду факторів, у тому числі рівня та тривалості впливу, характеристик хімічної речовини та терміну служби дихального апарату.

- Перш, ніж від працівника зажадають носити дихальний апарат, він повинен пройти медогляд з метою визначення своєї здатності робити це без загрози для власного здоров'я.

### **Захист органів слуху**

- Коли неможливо здійснити ефективні технічні засоби контролю, або ці засоби перебувають у стані впровадження та оцінки, для захисту здоров'я працівників необхідно використовувати пристрої захисту органів слуху.

- Втрата здатності чути звуки мовної часто ти може статися внаслідок



довготривалого впливу сильного шуму. Використання засобів захисту органів слуху дає найкращі результати у тих користувачів, які добре поінформовані про відповідні ризики та вміють експлуатувати ці пристрої. Якщо використовуються беруші, особливу увагу необхідно приділити належній процедурі їх припасування.

- Засоби захисту органів слуху повинні бути зручними, а користувачі повинні вміти правильно їх експлуатувати. Особливу увагу необхідно приділити можливому збільшенню ризику нещасних випадків у результаті використання засобів захисту органів слуху. Навушні, що заглушають, знижують здатність людини визначати напрямок на джерело звуку і заважають чути попереджувальні сигнали. Особливо це проявляється у разі працівників зі значною втратою слуху.

- Жодна модель не підходить всьому персоналу. Люди, які використовують засоби захисту органів слуху, повинні мати можливість вибирати з ряду альтернативних продуктів, які забезпечують необхідний коефіцієнт ослаблення. Беруші не повинні бути єдиним рішенням, оскільки не всі люди можуть носити їх.

- Необхідно, щоб засоби захисту органів слуху можна було взяти на вхіді в шумну зону, і їх слід надягати перед перетином кордону цієї зони. Шумні зони мають бути позначені відповідними знаками.

- Коефіцієнт ослаблення засобів захисту органів слуху буде високим лише в тому випадку, якщо ці кошти будуть у хорошому стані. Хороше обслуговування полягає в чищенні, заміні зношуються частин (наприклад, подушок навушників) і загальному відстеженні стану засобу захисту органу слуху.

- Засоби захисту органів слуху повинні оцінюватися за допомогою програми аудіометричного обстеження для працівників, що піддаються впливу.

### **Захист від падіння**

- Коли інші заходи не здатні усунути ризик падіння, працівники

повинні забезпечуватись відповідними засобами захисту від падінь, такими як кріпильні ремені та сигнальна рятувальна мотузка, та проходити підготовку з користування ними. Робочі місця та смуги руху, на яких існує небезпека падіння, або межі Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну і стали часті з небезпечною зоною, повинні бути обладнані пристроями, що запобігають падінню працівників або їх попаданню в небезпечну зону.

- Необхідно забезпечити пристрої, що запобігають падінню працівників через отвори в підлозі та інших місцях.

- Там, де це необхідно, слід носити запобіжний пояс, сигнальна рятувальна мотузка якого повинна бути закріплена за відповідну якірну точку.

- Кріпильні ремені необхідно вибирати так, щоб вони не становили загрози при спільному використанні з іншими ЗІЗ.

- При використанні страхувальних пристроїв слід передбачити заходи своєчасного порятунку, щоб запобігти травмам від перебування у висячому стані.

### **Робочий одяг**

- Там, де це впливає з оцінки ризиків, працівники повинні носити відповідний спецодяг, виданий роботодавцем.

- При виборі захисного одягу повинні братися до уваги такі моменти:  
(а) адекватність конструкції та крій спецодягу, що дозволяють свободу рухів для виконання всіх обов'язків працівника, а також відповідність передбачуваному режиму експлуатації; (б) середовище, в якому одяг носитиметься, включаючи здатність матеріалу, з якого він виготовлений, чинити опір проникненню хімічних речовин, мінімізувати термічний стрес, не бути джерелом пилу, чинити опір вогню і не накопичувати статичну електрику; і (в) особливі вимоги працівників, які піддаються впливу розплавленого металу і пов'язаних з ним небезпечних факторів, у тому числі необхідність використання тканини, що відбиває, або ізолюючого спецодягу

з поверхнею, що відбиває, під час впливу інтенсивної променистої енергії і гарячого повітря.

- Спецодяг, забруднений з хімічними речовинами, повинен піддаватися чищенню (якщо це можливо) або утилізації в спеціальному місці на підприємстві. Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості

- Перед тим, як повторно видавати спецодяг, роботодавці повинні забезпечити його прання, чистку та знезараження, а також провести обстеження захисного спецодягу, який вже використовувався раніше і тому може бути забруднений матеріалами, небезпечними для здоров'я.

- Роботодавець повинен переконатися, що працівник знімає захисний спецодяг перед тим, як залишити зону локалізації або робоче місце, що піддаються впливу азбестового пилу або іншої речовини, яка може становити ризик поза зоною локалізації. Забруднений спецодяг повинен утилізуватися безпечним чином.

- Користувач повинен виконувати огляд спеціальної роботи перед кожним її використанням. Частина II. Безпечні операції виробництва чавуну та сталі.

#### **4.4 Готовність до аварійних та непередбачених ситуацій. Загальний огляд**

- Будь-яка всеосяжна програма з ТВ повинна включати плани дій у разі аварії.

- Плани на випадок аварії повинні включати, як мінімум, такі дії: (а) роль та обов'язки працівників, які мають реагувати на виникнення такої ситуації; (б) шлях відходу та процедури на випадок аварії; (в) правила поведінки працівників, які повинні виконати критично важливі операції перед тим, як евакуюватися; (г) евакуація робочої зони; (д) правила

підрахунку працівників після завершення аварійної евакуації; (е) рятувальні, медичні та інші обов'язки тих працівників, на яких покладено відповідні функції; (ж) процедури звітності про пожежі та інші аварії; (з) засоби надання першої допомоги; (і) надавати необхідну інформацію та забезпечувати підготовку персоналу всіх рівнів, включаючи регулярні навчання з попередження аварійних ситуацій, готовності до них та процедур реагування.

- Для захисту персоналу у разі аварії в робочій зоні необхідно надавати найсвіжішу інформацію та забезпечувати внутрішній зв'язок та координацію. Аварійні сигнали повинні бути добре помітними всіма працівниками візуально і на слух; необхідно проводити періодичні навчання з боротьби з аварійними ситуаціями.

- Для захисту працівників і населення в цілому необхідно розробити та втілювати, у співпраці зі сторонніми аварійними службами, такі заходи, як надзвичайне планування, профілактику, готовність до аварійних ситуацій та плани аварійних заходів. Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості

### **Перша допомога та медичне обслуговування**

- Дієва програма першої допомоги повинна здійснюватися спільно за участю роботодавців, працівників та їх представників, організацій гігієни праці та державної охорони здоров'я, а також фабричних інспекцій.

- Перша допомога (у тому числі підготовлений персонал для її надання) повинна бути доступна на кожній виробничій ділянці. Комплекти першої допомоги повинні мати чітке маркування, бути легко доступними і знаходитись біля зон, де можуть відбуватися нещасні випадки. Час доступу до них не повинен перевищувати 1-2 хвилини. Вони повинні бути виконані з відповідних матеріалів, повинні захищати їх вміст від тепла, вологості та пилу, а також від осіб, які бажають зловживати ними.

- Письмові вказівки щодо першої допомоги повинні бути вивішені роботодавцем на видних місцях виробничих ділянок.

- Програма надання першої допомоги на кожному робочому місці повинна бути складена в координації з медичною установою, що забезпечує систематичну допомогу для постраждалих внаслідок нещасного випадку працівників.

- Роботодавець повинен організувати інструктаж всім працівників. Нижче наведені необхідні складові інструктажу: (а) організація першої допомоги на виробничій ділянці, включаючи процедури отримання додаткової допомоги; (б) вказівку працівників, призначених відповідальними за надання першої допомоги; (в) вказівку осіб, яких слід сповістити при нещасному випадку, та способи такого оповіщення; (г) розташування комплекту першої допомоги; (д) розташування кабінету першої допомоги; (е) що повинні робити працівники при виникненні нещасного випадку; (ж) шляхи евакуації у разі аварії; (з) дії працівників після нещасного випадку; (і) методи сприяння персоналу, який надає першу допомогу.

- Вміст комплекту першої допомоги повинен відповідати ризикам, з якими стикаються працівники, повинен забезпечувати захист персоналу, який надає першу допомогу, та підтримуватись у актуальному стані.

- Особи, на яких покладено надання першої допомоги, повинні вибиратися ретельно, беручи до уваги такі особисті якості, як надійність, мотивованість і здатність керувати людьми в кризовій ситуації.

- Там, де потрібне медичне обслуговування, воно має налагоджуватися у співпраці із зовнішніми аварійними службами.

### **Евакуація та рятувальні роботи**

- На кожному заводі повинен існувати відповідний план евакуації та рятувальних робіт.

- Необхідно організувати достатню кількість запасних виходів. Запасні виходи не повинні нічим за громаджуватися.

- Знак запасного виходу повинен бути чітко видимий на кожному повороті проходів, що ведуть до нього.

- Там, де це необхідно, весь персонал на виробничій ділянці повинен

забезпечуватися обладнанням, необхідним для евакуації, у тому числі аварійними дихальними апаратами.

- При деяких аваріях може знадобитися спеціальне рятувальне обладнання для евакуації або звільнення потерпілого; це обладнання має бути у наявності.

- Рятувальне обладнання повинне включати такі елементи: (а) захисний одяг; (б) пожежні ковдри; (в) вогнегасники; (г) автономні дихальні прилади; (д) ріжучі пристрої та механічні або гідравлічні домкрати; (е) мотузки, ремені кріплення та спеціальні ноші для перенесення потерпілого; Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості 130 (ж) обладнання, необхідне для захисту персоналу, який надає першу допомогу, оскільки ці люди самі можуть постраждати під час рятувальної операції; (з) будь-які інші засоби захисту, зазвичай необхідні працівникам у цій зоні.

- Хоча перша допомога повинна надаватися перш, ніж пацієнта почнуть рухати, наготові повинні також бути прості засоби іммобілізації потерпілого або хворого з тим, щоб його можна було евакуювати із зони аварії. кріпильні ремені та спеціальні ноші для перенесення потерпілого; Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості (ж) обладнання, необхідне для захисту персоналу, який надає першу допомогу, оскільки ці люди самі можуть постраждати під час рятувальної операції; (з) будь-які інші засоби захисту, зазвичай необхідні працівникам у цій зоні.

- Хоча перша допомога повинна надаватися перш, ніж пацієнта почнуть рухати, наготові повинні також бути прості засоби іммобілізації потерпілого або хворого з тим, щоб його можна було евакуювати із зони аварії. кріпильні ремені та спеціальні ноші для перенесення потерпілого; Безпека та охорона праці в чорній металургії та сталеливарній промисловості 130 (ж) обладнання, необхідне для захисту персоналу, який надає першу допомогу, оскільки ці люди самі можуть постраждати під час рятувальної операції; (з) будь-які інші засоби захисту, зазвичай необхідні працівникам у

цій зоні.

- Хоча перша допомога повинна надаватися перш, ніж пацієнта почнуть рухати, наготові повинні також бути прості засоби іммобілізації потерпілого або хворого з тим, щоб його можна було евакуювати із зони аварії.

## ВИСНОВКИ

Мідь і сталь не мають значної взаємної розчинності, але, незважаючи на це, їх успішно піддають зварюванню вибухом.

Обстеження зони зварного шва за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу показало, що вздовж хвиль є ділянки, що містять зварювані матеріали, так і ділянки різкого концентраційного переходу.

В роботі показано, що в результаті механохімічної взаємодії в процесі зварювання вибухом у шаруватому композиційному матеріалі сталь 20-бронза, утворюються продукти реакцій у вигляді нерівноважних та рівноважних фаз.

Пояснено утворення нових нерівноважних фаз з погляду сучасних, позицій. А саме, при механічних впливах відбуваються різні зміни атомної структури, що зберігаються довгий час, а також довгоживучі зміни хімічної будови і кристалічної структури, тобто утворення нових фаз.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Chawla N., Chawla. K.N. Metal matrix Composites: New York: Springer Science+Business Media, 2013. 112 p.
2. Wadsworth J., Lesuer D.R. Ancient and modern laminated composites from the Great Pyramid of Gizeh to Y2K *Materials Characterization*. 2000. Vol. 45, P. 289-313.
3. Vecchio K.S. Synthetic Multifunctional Metallic-Intermetallic Laminate Composites. *Journal of the Minerals, Metals and Materials*. 2005. No. 57(3). P. 25-31.
5. Ashby M.F. Bréchet J.M. Designing Hybrid Material *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51. P. 5801-5821.
6. Alderliesten R. Brigante D. Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates. *New Composite Materials: Selection, Design, and Application*. Springer International Publishing. 2014. 179 p.
8. German R.M. Particulate Composites: Fundamentals and Applications. Springer International Publishing. 2016. P. 446.
9. Monazzah A.H. Pouraliakbar H., Baghi R., Reihani S.M.S. Al-Mg-Si/SiC laminated composites: Fabrication, architectural characteristics, toughness, damage tolerance, fracture mechanisms. *Composites Part B*. 2017. Vol. 125. P. 49-70.
10. Parks M. RekrySTALLIZATION Welding *The Welding Journal*. 1953. Vol. XXV. No. 5. P. 32.
11. Карпов Я.С., Ивановская О.В. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия. Харьков : Национальный аэрокосмический университет. 2001. 153 с.
12. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Цыкуленко А.К. Многослойная сталь в сварных конструкциях. Киев : Наукова думка. 1984. 284 с.
13. Bataev I.A. Bataev A.A., Mali V.I., Pavliukova D.V. Structural and mechanical properties of metallic-intermetallic laminate composite produced by

- explosive welding and annealing. *Material and Design*. 2012. No. 35. P. 225-234
14. Bataev I.A., Ogneva T.S., Bataev A.A., Mali V.I., Esikov M.A., Lazurenko D.V. Explosively welded multilayer Ni-Al composites. *Materials and Design*. 2015. No. 88. P. 1082-1087.
15. Mali V.I., Bataev A.A., Maliutina I.N., Kurguzov V.D., Bataev I.A. , Esikov M.A., Lozhkin V.S. Microstructure and mechanical properties of Ti/Ta/Cu/Ni alloy laminate composite materials produced by explosive welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 93. P. 4285-4294
16. Konieczny M. Microstructural characterisation and mechanical response of laminated Ni-intermetallic composites synthesized using Ni sheets and Al foils. *Materials characterization*. 2012. No. 70. P. 117-124.
17. Smirnov S.V., Veretennikova I.A. Comparative Evaluation of Metal Damage on the Free Lateral Surface of Single-Layer and Three-Layer Strips under Rolling. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. No. 4. P 6-15.
18. Mozaffari A., Danesh H., Manesh K. Evaluation of mechanical properties and structure of multilayered Al/Ni composites produced by accumulative roll bonding (ARB) process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. No. 489. P. 103-109
19. Sieber H., Park J.S., Weissmuller J., Perepezko J.H. Structural evolution and phase formation in cold-rolled aluminum–nickel multilayers. *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. No. 7. P. 1139-1151.
20. Wu D., Chen R.S., Han E.H. Bonding interface zone of Mg-Gd-Y/Mg-Zn-Gd laminated composite fabricated by equal channel angular extrusion. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. Vol. 20. No. 2. P. 613-618.
21. Liua X.B., Chena R.S., Hana E.H. Preliminary investigations on the Mg–Al–Zn/Al laminated composite fabricated by equal channel angular extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. No. 10. P. 4675-

4681.

7. Луцюк-Худин В. А. Новый способ производства толстолистного двухслойного проката для сосудов высокого давления. Киев : Научная мысль, 1965. 61 с. с ил.

19. Cowan G., Balchan A. The Physics of fluids, 1965. v. 5. № 10. P. 1817-1828.

20. Carlson R. J. Jinse V. D., Witiman R. H. Materials Engineering, 1968. t. 7. P. 70-75.

21. Otto H. E., Carpenter S. H..Welding Journal, 1972. v. 51. № 7. P. 467-473.

22. Wylie H. K. Crossland B. Explosive cladding with thick flyer plates. International Conference of the use of High-Energy rate methods for forming, welding and Compaction, 27-29 March 1973. University of Leeds. P. 151-157.

24. Станюкович К.П. Неустановившееся движение сплошной среды. Киев : Техника, 1971. 854 с. с ил.

25. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці у Львів : Афіша, 2002. 320с.

26. Трахтенберг А.М., Коршун М.М., Чебанова О.В.. Киев: Гигиена труда и производственная санитария. 1997. 462 с.

27. Геврик Є.О. Охорона праці: [навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів] Київ : Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.