

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Удосконалення технології різання біметалевих матеріалів»

Виконав: студент групи ТМ-17дм

Трощій С.В.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник Сергієнко О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Шевченко О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Удосконалення технології різання біметалевих матеріалів»: 136 с., 15 табл., 67 рис., 104 джерела.

БІМЕТАЛЕВІ КОМПОЗИЦІЇ, ПЛАЗМОВЕ РІЗАННЯ, РЕЖИМИ РІЗАННЯ; ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ; МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес різання біметалевих матеріалів.

Мета магістерської роботи – удосконалення технології тонкоструйного плазмового різання біметалевих композицій, виконаних з різнорідних матеріалів.

Методи дослідження – теоретичні дослідження проводилися на основі положень теорій електрофізичних методів обробки, технології машинобудування, матеріалознавства. Експериментальні результати отримані при використанні відповідних методів дослідження на сучасному аналітичному устаткуванні. Обробка результатів експериментів проводилися за допомогою методів математичної статистики.

У першому розділі проаналізовано сучасні методи різання металевих матеріалів.

У другому розділі виконано огляд матеріалів для отримання біметалічних композицій та технологічного устаткування для тонкоструйного плазмового різання, і наведена методика експериментального дослідження.

У третьому розділі виконано вибір технологічних схем і оптимізацію режимів тонкоструйного плазмового різання модельних матеріалів.

У четвертому розділі виконано експериментальне дослідження тонкоструйного плазмового різання біметалевих композицій.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.

ЗМІСТ

	С.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	5
ВСТУП.....	6
1 Сучасні методи різання металевих матеріалів.....	8
1.1 Методи створення біметалічних композицій.....	10
1.2 Лазерна обробка	18
1.3 Кисневе різання	28
1.4 Плазмово-дугове різання	33
1.5 Мета та задачі дослідження.....	48
2 Матеріали, устаткування і методи експериментальних досліджень....	49
2.1 Початкові матеріали для отримання біметалічних композицій.	49
2.2 Технологічне устаткування для тонкоструйного плазмового різання.....	55
2.3 Методи експериментальних досліджень.....	56
2.3.1 Хімічний аналіз матеріалів.....	56
2.3.2 Методи структурних досліджень.....	57
2.3.3 Методи дослідження топографії поверхні різа.....	57
2.3.4 Оцінка точності різа	58
2.3.5 Вимір мікротвердості поверхневого шару в зоні різа.....	59
3 Вибір технологічних схем і оптимізація режимів тонкоструйного плазмового різання модельних матеріалів.....	60
3.1 Технологічні можливості плазмового розкрою модельних матеріалів.....	61
3.1.1 Конструкційні вуглецеві сталі.....	61
3.1.2 Леговані сталі.....	65
3.1.3 Алюмінієві і мідні сплави.....	67
3.2 Оптимізація режимів плазмового розкрою модельних матеріалів.....	68
3.2.1 Низьковуглецева сталь Ст3 і неіржавіюча сталь	

12X18H10T.....	68
3.2.2 Алюміній А5М і мідь М1.....	75
4 Експериментальні дослідження тонкоструйного плазмового різання біметалевих композицій.....	
4.1 Низьковуглецева сталь Ст3 + неіржавіюча сталь 12Х18Н10Т.....	84
4.1.1 Обробка на режимах розкрою легованих сталей.....	84
4.1.2 Обробка на режимах розкрою конструкційних вуглецевих сталей.....	93
4.2 Низьковуглецева сталь Ст3 + алюміній А5М.....	99
4.2.1 Обробка на режимах розкрою конструкційних вуглецевих сталей.....	100
4.2.2 Обробка на режимах розкрою алюмінієвих сплавів.....	105
4.3 Низьковуглецева сталь Ст3 + мідь М1.....	107
4.4 Технологічні рекомендації по розкрою біметалічних композицій з використанням тонкоструйного плазмового різання	113
5 Охорона праці та техніка безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.....	116
5.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності.....	116
5.2 Вимоги перед початком робіт.....	117
5.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи.....	118
5.4 Вимоги безпеки після виконання роботи.....	121
5.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	122
ВИСНОВКИ.....	123
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	126

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ЕФХКО – електрофізикохімічна та комбінована обробка

HB – твердість за Бринелем

HV – твердість за Вікерсом

HRC – твердість за Роквелом

MOP – мастильно-охолоджуюча рідина

k – постійна Больцмана, Дж/К

σ_m - межа плинності приконтаткних шарів тіла, що зношується

J_h – інтенсивність зносу, мм³/км

δ - інтенсивність зношування інструменту, мкм/км

ρ - щільність інструментального матеріалу, кг/м³

σ_T - межа плинності інструментального матеріалу, МПа

n_T - запас пластичної міцності інструменту

n – кількість дослідів

T – температура, К

σ_s - напруга плинності, МПа

σ_b – границя міцності, МПа

σ_t – границя текучості, МПа

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, МПа

σ_{-1} – границя втоми, МПа

ψ – відносне звуження, %

μ - коефіцієнт Пуасона

ВСТУП

Технологічний процес виготовлення деталей в загальному випадку передбачає традиційну його структуру: заготівельна операція, комплекс механічних операцій, включаючи обдирні, чорнові, чистові і обробні етапи обробки, різного роду термічні операції (нормалізація, відпал, гартування, відпуск), операції нанесення покриттів, миття, контроль. Вдосконалення технологічного процесу виготовлення деталей направлене на вибір найбільш прийнятних для конкретних умов виробництва методів обробки на кожній з відмічених стадій. Основним критерієм вибору служить технологічна собівартість обробки за умови забезпечення необхідної якості. Технологічна собівартість, у свою чергу, визначатиметься продуктивністю у проваджуваних методів, економічністю витрачання різного роду ресурсів (енергетичних, матеріальних і так далі), рівнем кваліфікації обслуговуючого персоналу, мірою автоматизації процесів обробки, ціною технологічного устаткування.

Перспективним шляхом зниження технологічної собівартості виготовлення деталей є використання таких методів обробки, які дозволили б скоротити або виключити певні стадії в технологічному процесі. Так на етапі заготівельного виробництва вживання литих заготовок передбачає подальшу механічну обробку по видаленню ливників і прибутків, для зварних конструкцій необхідна зачистка швів, газополум'яна і плазмова різання, що супроводжується поганою якістю різання вимагають подальших обдирних операцій по видаленню зайвого припуску і так далі.

Розвиток сучасного устаткування, використання систем ЧПУ дозволяє певною мірою вирішити питання підвищення точності на заготівельних стадіях технологічного процесу, зокрема, при розкрії листових матеріалів. Поява нових технологічних процесів, що відносяться до методів електрофізикохімічної і комбінованої обробки матеріалів, таких як лазерна обробка, тонкоструйна плазмова обробка, струминна гідравлічна обробка, електроерозійна обробка

дозволило підвищити якість самого різання і його точність, що виключає необхідність створення зайвих припусків на механічну обробку.

Для ефективного використання того або іншого методу різання на заготівельній стадії процесу виготовлення необхідна наявність технологічних рекомендацій для обробки того або іншого класу металевих матеріалів.

Окрім цього поява нових класів матеріалів, таких як аморфні і нанокристалічні сплави, шаруваті композиції різнорідних матеріалів, отримані плющенням або зваркою вибухом, вимагає як теоретичних, так і експериментальних досліджень, направлених на технологічний відробіток для впровадження того або іншого методу розділового різання.

В даний час в заготівельному виробництві машинобудівної галузі в світі, в цілому, і в Україні, зокрема, ефективно використовується тонкоструйне плазмове різання листових металевих матеріалів. Світові лідери по виробництву даного устаткування (фірми Kjellberg, Германію і Hypertherm, США) надають технологічне забезпечення у вигляді рекомендацій по вибору технологічних схем і призначенню режимів для розкрою вуглецевих, легованих сталей, алюмінієвих сплавів. Існуючі наукові дослідження присвячені оптимізації технологічних режимів в рамках певної технологічної схеми при обробці конкретної марки матеріалу. Проте питання тонкоструйного плазмового різання біметалічних композицій, виконаних з різнорідних матеріалів, залишається невирішеним.

1 СУЧАСНІ МЕТОДИ РІЗАННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасні технології різання металевих матеріалів засновані на використанні електрофізичних процесів. Можливість концентрації енергії в зоні обробки пояснює ефекти, що досягаються, в обробці різного класу металевих матеріалів. Використання електричної енергії або специфічних фізико-хімічних процесів пояснює принципові відмінності даних технологій від традиційних технологічних методів обробки матеріалів, заснованих переважно на механічній дії на механічній дії на оброблювані матеріали. Головні відмінності полягають в наступному [1]:

1. Електро-фізико-хімічні і комбіновані методи (ЕФХКО) обробки будь-яких матеріалів незалежно від їх механічних властивостей (твердості, в'язкості, крихкості та ін.) здійснюється без додатка значних механічних зусиль. У більшості методів обробка виробляється без механічного контакту оброблювального інструменту з поверхнею заготовки.

2. При ЕФХКО повністю відсутня необхідність у вживанні спеціальних оброблювальних інструментів, твердіших і міцніших, чим оброблюваний матеріал. Відповідно, виключається необхідність передачі значних механічних зусиль через систему СНІД, що дозволяє спростити кінематику і зменшити масу устаткування. У багатьох випадках оброблювальний інструмент (у звичайному його розумінні) взагалі відсутній, а його функції виконує відповідним чином сформований потік електронів, іонів, фотонів і так далі.

3. За допомогою ЕФХКО можна виконати безліч технологічних операцій, що не виконуються методами обробки різанням або тиском.

4. При ЕФХКО скорочується витрата інструментальних і абразивних матеріалів, а через можливість концентрації енергії в зоні різання і втрати оброблюваного матеріалу.

5. Можливість механізації і автоматизації даних методів створює хороші передумови для програмного управління процесом і перехід на

багатоверстатне обслуговування при невисокій кваліфікації оператора, обслуговуючого устаткування.

Поряд з комплексом істотних позитивних технічних, технологічних і економічних показників кожному методу ЕФХКО властиві недоліки і обмеження, обумовлені їх природою:

1. Підвищена енергоємність в порівнянні з обробкою різанням деталей простих форм із звичайних конструкційних матеріалів при порівнянних показниках продуктивності і якості поверхні.

2. Відставання масового випуску дешевого універсального устаткування від процесів вдосконалення самої технології.

Загальним положенням, яке можна віднести до даних методів ЕФХКО, є те, що в порівнянні з обробкою різанням ці методи тим перспективніші, чим складніше форма оброблюваного виробу і важче піддається обробці різанням матеріал деталі. Цим положенням і визначається загальна принципова спрямованість методів ЕФХКО як нових, прогресивних технологічних методів, переважно використовуваних при створенні об'єктів нової техніки з використанням новітніх матеріалів, при переході до нових форм організації виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести порівняльний техніко-економічний аналіз найбільш перспективних методів різання, вживаних в сучасному виробництві.

Відомо, що електро-фізико-хімічні методи орієнтовані переважно на використання в технологічних процесах здобуття деталей з так званих важкооброблюваних механічним різанням матеріалів. До них слід віднести нетрадиційні конструкційні матеріали – різного роду шаруваті металеві композиції, матеріали з покриттями, аморфні і наноструктуровані метали і сплави. У зв'язку з цим ухваленню рішення про призначення тієї або іншої технології для обробки подібного класу матеріалів повинне передувати вивчення як методів їх здобуття, так і специфіки фізико-механічного і

структурного стану. Це необхідно для розуміння процесів, що відбуваються при обробці в рамках певного електрофізичного методу.

Дана робота присвячена пошуку ефективних технологій різання біметалічних композицій, заснованих на термічних методах обробки, з позицій точності, якості обробки і продуктивності процесу.

1.1 Методи створення біметалічних композицій

З існуючого різноманіття технологічних методів з'єднання різнорідних матеріалів, у тому числі і листових металевих композицій, можна виділити технології, засновані на зварці різнорідних металів при плющенні [2] і метанні пластин за допомогою вибуху [3-20].

Технологія плющення шаруватих композицій полягає в багатопрокатний пластичній деформації попереднього зібраного пакету з листових матеріалів. Згодне [2] міцне з'єднання матеріалів забезпечується за рахунок реалізації в різній мірі, плівкового і дифузійного механізмів рекристалізації, що виникають при розвитку значних пластичних деформацій в зоні стику. При механізмі рекристалізації зварка листових матеріалів здійснюється за рахунок рекристалізації зерен на кордоні стику унаслідок локального підвищення температури при деформації. Виникнення значних температур на кордоні стику також сприяє розвитку дифузійних процесів, що забезпечують формування міцної зварної зони. Розвиток плівкового з'єднання можливий за наявності відносно крихких оксидних плівок на поверхні металів, що сполучаються. При значному тиску виникаючих при плющенні, плівки руйнуються, забезпечуючи надійне з'єднання ювенільних, очищених від окисних плівок, поверхонь металів [16].

Якщо метод плющення для забезпечення достатньої міцності з'єднання вимагає реалізації багатократного циклу, що приводить у результаті до 5-7 кратного стоншування вихідного пакету, тоді як з'єднання листових матеріалів за допомогою зварки вибухом здійснюється за один технологічний цикл. Як і будь-який технологічний метод, зварювання вибухом має певну область для

реалізації і має конкретні обмеження, пов'язані із специфікою самого процесу. Специфіка зварювання вибухом, що дозволяє розглядати її як технологічний метод здобуття шаруватих композицій, полягає в наступному [4]:

1. Можливість високоміцного з'єднання різнорідних металів, дифузійна зварювання яких і зварювання плавленням не можливі.

2. Зварювання вибухом дозволяє отримувати композиції з'єднань з металів з температурами плавлення, що різко розрізняються. Наприклад, з'єднання алюмінію з $T_{пл} = 660^{\circ}\text{C}$ і танталу з $T_{пл} = 2996^{\circ}\text{C}$.

3. Особливості процесів, що мають місце при зварюванні вибухом, дозволяють сполучати метали з міцними поверхневими плівками, зруйнувати які для створення контакту металів по ювенільних поверхнях не представляється можливим при використанні методу плющення.

4. З'єднання пар металів, таких як сталь – титан, сталь – алюміній, мідь – титан, мідь – алюміній, створюючих інтерметалідні прошарки, можливо лише при розвитку високих температур в зоні стику у вузькому тимчасовому діапазоні, що реалізується при зварюванні вибухом.

5. Технологічний діапазон товщини плакувального металу при зварюванні вибухом складає від 0,03 до 30 мм, що є вельми привабливим чинником з метою здобуття шаруватих композицій, призначених для використання в різних галузях промислового виробництва. Як відзначає автор [4] нижній кордон товщини плакучого матеріалу пов'язаний з технічними складнощами установки тонкої фольги на необхідному зазорі, а також з проблемами точного розрахунку шару вибухової речовини для забезпечення заданої швидкості детонації. У той же час максимальні значення товщини плакувального металу обмежені фізичними процесами зварки вибухом. Так, час існування стискуючої напруги на кордоні розділу матеріалів, що сполучаються, зростає пропорційно збільшенню товщини зварюваних пластин, а час застигання рідкої фази в зварному шві пропорційно квадрату товщини. Все це призводить до зменшення розміру зони зварювання при збільшенні товщини

зварюваних металів. Дана обставина є особливо критичною для металів з низькою теплопровідністю і температурою плавлення.

6. Висока швидкість розвитку процесів на кордоні стику металів, що сполучаються, при зварці вибухом накладає обмеження на розвиток дифузійних процесів, що забезпечує максимальне збереження хімічного складу металів поблизу зони зварного шва.

Технічне обмеження зварювання вибухом як технологічного методу пов'язано з наступними обставинами:

1. Значні просторові деформації виробу після зварки вибухом, особливо характерні при порівнянній товщині плакуючого і плакуючих листів, вимагають використання в технології спеціальних опор під плакуючий лист [17], або введення правки виробу після зварки вибухом.

2. Мають місце обмеження в зварці вибухом матеріалів, схильних до крихкого руйнування. Автор [4] відзначає, що для даної технології придатні матеріали з подовженням не менше 5% і ударною в'язкістю не менше 13,6 Дж. Для розширення технологічних можливостей даного методу підвищення пластичності зварюваних матеріалів досягається проведенням процесу при підвищених температурах. Проте дане рішення приводить до його ускладнення і дорожчання.

3. Неможливість локального плакування на певній частині виробу.

4. Забезпечення стабільності результатів зварки вимагає ретельного контролю складу, вологості, щільності і інших параметрів сумішевих вибухових речовин, що також створює певні технічні і організаційні труднощі.

5. Впровадження технології зварки вибухом у виробництво вимагає вирішення ряду організаційних завдань, пов'язаних із зберіганням, перевезенням вибухових речовин, а також підготовкою персоналу для проведення вибухових робіт.

6. Забезпечення ефективності будь-якого технологічного процесу пов'язане з підвищенням рівня його механізації і автоматизації. Дана технологія зварки має низький рівень відмічених показників. Аналіз вище перелічених

особливостей зварки вибухом як технологічного методу показує, що найбільшу ефективність слід чекати в дрібносерійному виробництві для створення композицій з металевих матеріалів, які неможливо отримати іншими методами, таких як сталь + алюміній, сталь + титан, сталь + цирконій. Ефективне використання зварки вибухом замість технології наплавлення міді і латуні на сталь для створення матеріалу для підшипників ковзання.

Використання композиційних з'єднань, отриманих зваркою вибухом, як специфічних конструкційних матеріалів вимагає пошуку технологічних методів їх обробки, у тому числі і розкрою на етапі заготівельного виробництва. Для успішного вирішення даного завдання необхідно виявити особливості формування структур в біля шовної зони при зварці вибухом.

Дослідження різних схем створення вибухових навантажень, детально описаних А.А. Дерібасом [3] і І.Д. Захаренко [4], показали на перспективність з точки зору практичних додатків навантаження ковзаючою детонаційною хвилею, що реалізовується при косих зіткненнях металевих поверхонь. У загальному вигляді схема зварки вибухом представлена на малюнку 1.1. Для забезпечення надійного зварного з'єднання між плакіруемими і плакуючими матеріалами необхідне призначення режимів зіткнення, які визначаються початковими параметрами, що відображують на схемі (рис. 1.1).

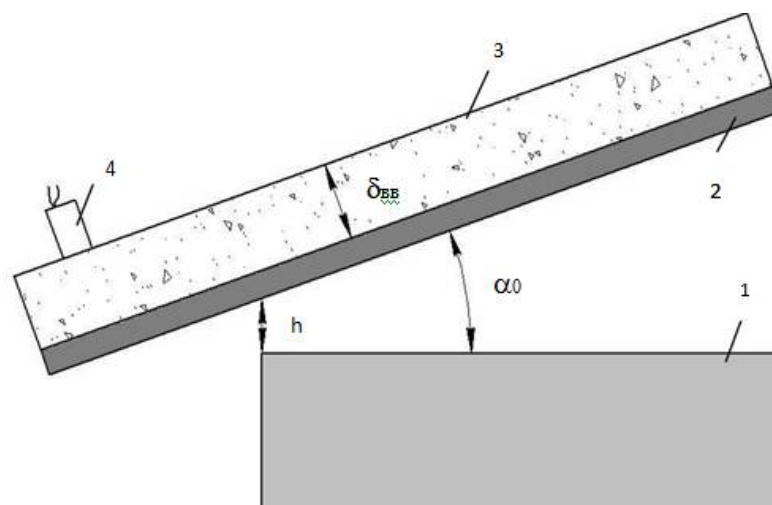


Рисунок 1.1 – Схема зварювання вибухом: 1 - плакуєма пластина; 2 - пластина плакуюча; 3 – заряд вибухової речовини; 4 – детонатор [4]

До початкових параметрів зварного процесу автор відносить: вихідний зазор (h) між пластинами, початковий кут (α_0) нахилу пластини, що метається, по відношенню до плакіруємою, висоту ($\delta_{ВВ}$)заряду, його щільність ($\rho_{ВВ}$), швидкість детонації (D) і показник політропи (K) продуктів детонації.

Схема зіткнення пластин в процесі зварки вибухом, представлена на рис. 1.2, відображає кінематичні параметри процесу. Зі схеми виходить, що кінематика процесу характеризується двома параметрами – кутом зіткнення (γ) і швидкістю точки контакту (V_K). Зв'язок кінематичних параметрів з початковими параметрами має вигляд:

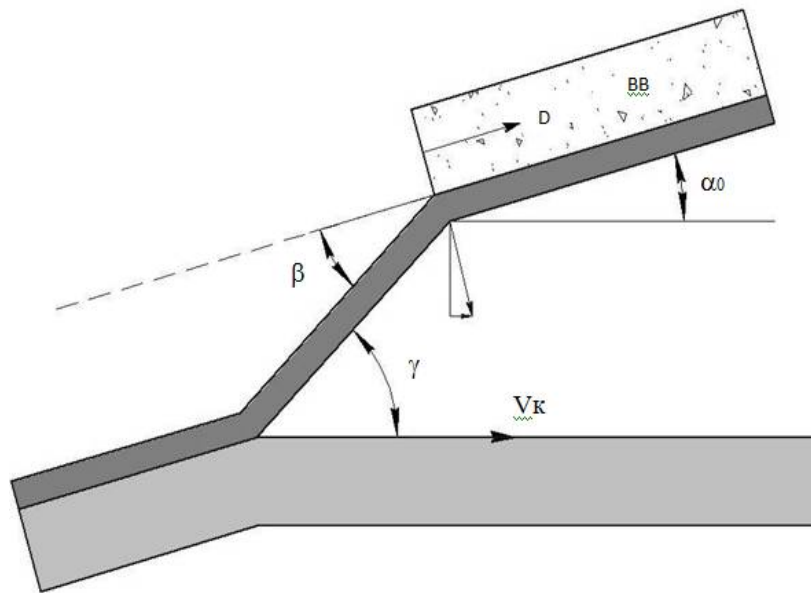


Рисунок 1.2 – Схема зіткнення пластин при зварюванні вибухом [4]

$$\gamma = \alpha_0 + \beta, \quad V_K = D \frac{\sin \beta}{\sin \gamma},$$

де β - кут повороту пластини, що метається, який пов'язаний з кінематичними параметрами процесу: $\beta = \beta(r, k, y)$;

r – величина, яку автор [4] визначає як коефіцієнт навантаження:

$$r = \frac{\delta_{ВВ} \rho_{ВВ}}{\delta_{П} \rho_{П}};$$

де $\rho_{\text{ВВ}}$, $\delta_{\text{ВВ}}$, $\rho_{\text{П}}$, $\delta_{\text{П}}$ – плотность и толщина взрывчатого вещества и метаемої пластини, соответственно.

Слід зазначити, що при використанні вибухової речовини для метання пластин встановлені вище параметри їх зіткнення можуть варіюватися в широких діапазонах, частина яких не завжди забезпечує міцне з'єднання матеріалів. Вперше в роботі Уйтмана [18] були визначені кордони реалізації процесу зварки вибухом в координатах кінематичних параметрів зіткнення пластин (рис. 1.3). Якщо положення лівого кордону (1) визначається значенням критичної швидкості, відповідної переходу до хвильового перебігу металів на кордоні стику і залежною від твердості і щільності зварюваних матеріалів, то існування правого кордону (2) підтверджує той факт, що при надзвукових швидкостях зіткнення струєвинеєння неможливе, а отже, зварки металів не відбувається. У теж час, в діапазоні дозвукових швидкостей зіткнення струєвинеєння має місце при будь-яких кутах зіткнення (γ).

Аналіз механізму формування з'єднання при зварці вибухом свідчить про те, що верхній кордон в основному визначається теплофізичними властивостями пластини (температура плавлення, теплоємність, теплопровідність), що метається, її товщиною, а також об'ємною швидкістю звуку [18].

Наявність нижнього кордону області зварки вибухом пояснюється тим, що існують критичні значення кутів зіткнення $\gamma = \gamma_{\text{крит}}$ і швидкостей точки контакту $V = V_{\text{крит}}$, які визначають формування кумулятивного струменя, а, отже, і створення потоку часток пластини, що кидається попереду точки контакту.

Таким чином, формування кумулятивного струменя забезпечує самоочищення поверхні пластини, що метається, від різного роду оксидів і забруднень. Очищення ж плакуючої пластини здійснюється за рахунок процесів тертя при русі по ній часток кумулятивного струменя.

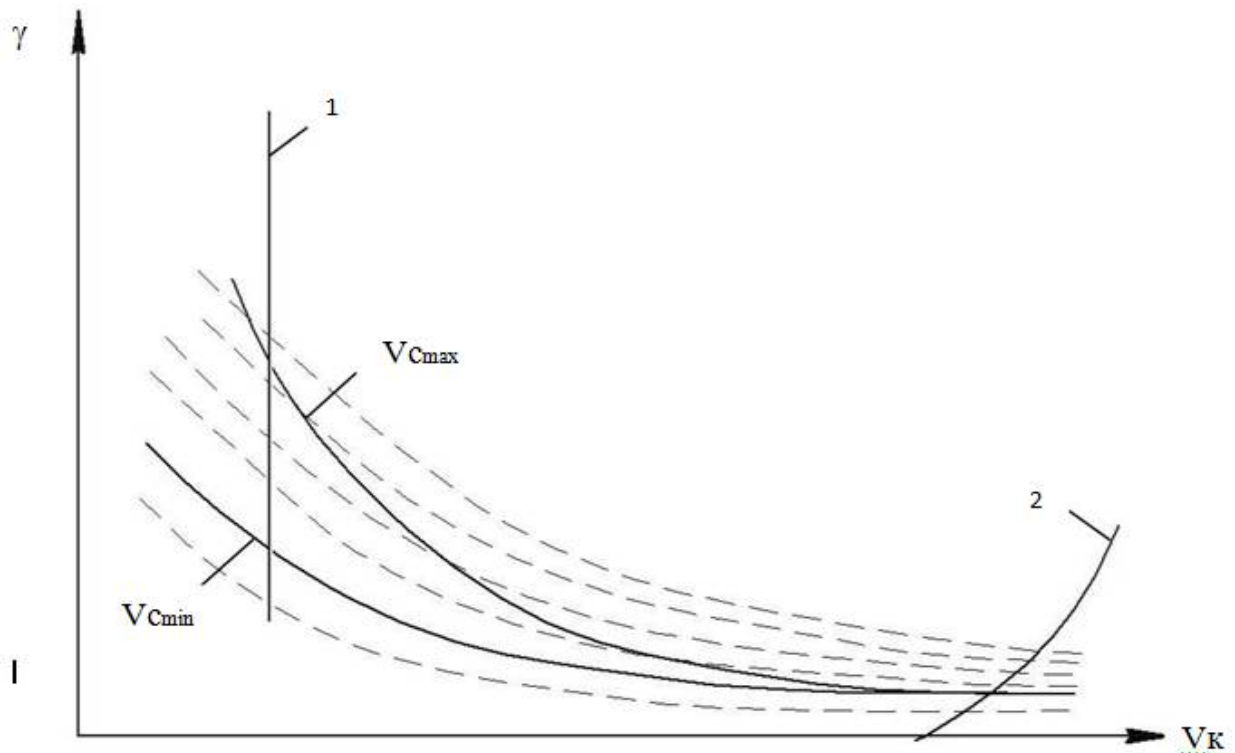


Рисунок 1.3 – Область зварювання [18] в координатах кінематичних параметрах процесу: 1 – кордон, визначуваний швидкістю ($V_K = V_{кр}$) переходу від без хвильового характеру перебігу матеріалу до хвильового; 2 – кордон, що розраховується з критичних умов струмоутворення; $V_{сmax}$ – кордон, що розраховується з умов застигання розплаву до моменту зняття напруги на кордоні розділу пластин; $V_{сmin}$ – кордон, визначуваний критичним тиском, що забезпечує розвиток процесів течії і струмоутворення на кордоні металів

Експериментальне підтвердження даного механізму самоочищення зварюваних поверхонь було отримане в роботі [19] І.Д. Захаренко, коли зварювані поверхні зразків заздалегідь піддавали ретельній зачистці шліфувальними шкірками аж до повної їх поліровки. Після проведення ряду спеціальних процедур, що унеможливають окислення зварюваних поверхонь, вироблялася оцінка значення мінімального кута зіткнення, що забезпечує формування зварного шва. Таким чином було встановлено, що надійне з'єднання заздалегідь очищених поверхонь досягалося на кутах зіткнення $\gamma =$

3°, тоді як мінімальний кут в умовах самоочищення за рахунок кумулятивного струменя складав 5°20'. Експериментальні дослідження зварних з'єднань [3, 4, 7, 8] показали, що характер перебігу матеріалу на кордоні розділу може бути ламінарним, вихровим і турбулентним, що виражається в хвилеутворенні в зоні з'єднання.

Вперше спроба теоретичного пояснення природи хвилеутворення була зроблена Абрахамсоном в 1961 р. [20]. Надалі його модель отримала розвиток в роботі Бахрані, Блека, Кроссланда [9, 11]. Абрахамсон передбачив, що при падінні струменя на поверхню в околиці точки гальмування виникає високий тиск, що приводить до деформації поверхні по обидві сторони від точки гальмування і як результат виникнення і зростання горба деформації попереду точки контакту. Автори [11], приймаючи як факт утворення горба деформації в моделі Абрахамсона, вважали, що в процесі свого зростання горб досягає поверхні падаючого струменя і закриває частину зворотного (кумулятивного) струменя, формуючи «вихровий мішок». При цьому точка гальмування стрибком «перестрибує» на вершину горба, а далі процес хвилеутворення продовжується.

Дане уявлення про механізм хвилеутворення отримало назву моделі Бахрані-Кроссланда, схемне відображення якої представлено на рис. 1.4.

Таким чином, композиційні з'єднання різнорідних металів і сплавів, отримані зварюванням вибухом, можуть розглядатися як конструкційні матеріали для створення різного роду виробів, що вимагає пошуку ефективних методів їх різання.

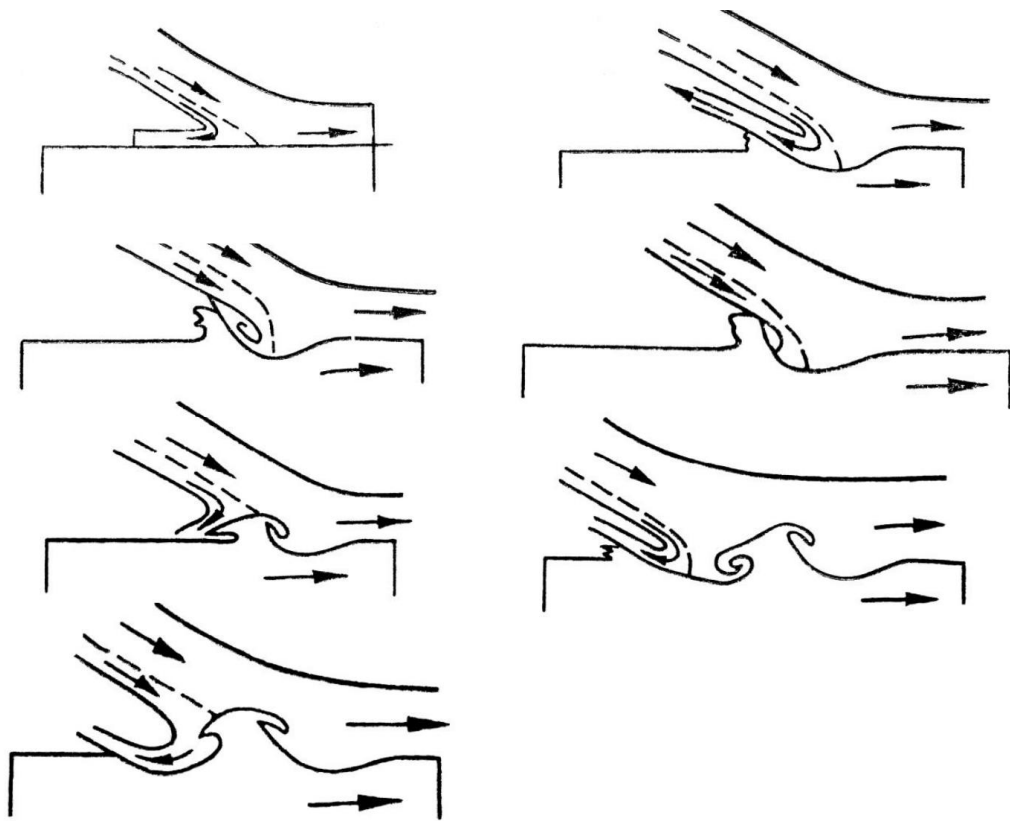


Рисунок 1.4 – Модель Бахрані – Кроссланда [3]

1.2 Лазерна обробка

Можливості створення високої концентрації енергії в локальному об'ємі простору і оперативного управління зміною енергії в часі і її переміщення в просторі, властиві висококонцентрованим джерелам енергії, таким як лазерні і електронно-променеві, відкривають широкий спектр перспектив в області обробки матеріалів з новими технологічними можливостями і високим рівнем техніко-економічних показників.

Високі техніко-економічні показники вживання лазерної обробки в різних технологічних процесах для різного роду матеріалів пояснюється не лише достоїнствами високої концентрації енергії як технологічного інструменту, але і універсальністю і гнучкістю лазерного променя.

Важливим показником для оцінки рівня сучасного наукотехнічного прогресу в області металообробки є доля лазерної техніки в парку технологічного устаткування в промисловій індустрії темпи практичного освоєння лазерних технологій. Останнє наочно ілюструється цифрами

щорічних продажів лазерного устаткування на світовому ринку. Так, за період з 1994 р. по 2000 р. об'єм продажів збільшився з 2,1 до 8,8 млрд. доларів [21].

Привабливість технологічних властивостей лазерного променя, таких як гнучкість, універсальність, швидкодія поряд з унікальністю властивостей лазерного випромінювання – високою монохроматичністю і когерентністю, малим розходом і високим рівнем енергетичних показників дозволили створити перспективний вигляд технологічного інструменту для ряду технологічних операцій: термообробки, зварки, різання, паяння, наплавлення, модифікування, легування, маркування, гравіювання, прошивки, хіміко-термічної, лазерно-плазмової, лазерно-електрохімічної обробки тощо.

Лазерне випромінювання відноситься до висококонцентрованих джерел енергії і характеризується одним з найвищих коефіцієнтів зосередженості джерела [22], що забезпечує найбільше значення щільності потужності в порівнянні з іншими джерелами теплової енергії – газополум'яним, дуговим, плазмовим. У таблиці 1.1 наведені значення коефіцієнта зосередженості і радіусу пучка для різних джерел енергії.

Високе значення коефіцієнта зосередженості лазерного джерела дозволяє сконцентрувати в зоні обробки щільності потужності $>10^5$ Вт/см². Такий рівень енергії має принципове значення, забезпечуючи розвиток подій в зоні обробки по іншому механізму формування і кристалізації рідкої фази для таких операцій, як термообробка, зварка, різання і так далі.

Досягнення щільності потужності в зоні обробки $>10^5 - 10^6$ Вт/см² приводить до істотної зміни закономірностей взаємодії потоків енергії з оброблюваною речовиною завдяки синергетичному характеру його нагріву [23, 24].

Високі значення щільності потужності лазерного випромінювання дозволяють перевести нагрів з режиму теплопровідності в режим глибокого (кинджального) проплавлення [25].

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнта зосередженості і радіусу пучка для різних джерел [22]

№	Вигляд джерела енергії	Коефіцієнт зосередженості, K, 1/см ²	Радіус пучка, Г ₀ , см
1	Газове полум'я	$\sim 0,2 \cdot 10^0$	$\sim 2,0 \cdot 10^0$
2	Дуга неплавкого електроду (вольфрам)	$\sim 1,0 \cdot 10^1$	$\sim 3,0 \cdot 10^{-1}$
3	Світлопреміневої	$\sim 1,0 \cdot 10^2$	$\sim 1,0 \cdot 10^{-1}$
4	Плазмовий струмінь	$\sim 4,0 \cdot 10^4$	$\sim 5,0 \cdot 10^{-3}$
5	Електронний промінь	$\sim 2,0 \cdot 10^6$	$\sim 8,0 \cdot 10^{-4}$
6	Лазерний промінь (безперервний)	$\sim 3,0 \cdot 10^6$	$\sim 6,0 \cdot 10^{-4}$

Механізм поглинання енергії лазерного випромінювання металевими матеріалами добре описується моделлю вільних електронів (електронами провідності), які в основному і поглинають кванти світла. Процес поглинання швидкоплинний і займає проміжок часу $10^{-11} - 10^{-10}$ с і розвивається в тонкому поверхневому шарі товщиною 0,1-1 мкм, від якого поширення енергії передається в останні об'єми матеріалу за допомогою наступних механізмів теплопровідності – електронною, фотонною, променистою. Перший механізм теплопровідності є домінуючому в технології лазерної обробки з нагрівом в діапазоні температур від сотень до декількох тисяч градусів [26].

Основними параметрами лазерного випромінювання, що визначають результат його взаємодії з оброблюваним матеріалом, є щільність потужності, тривалість дії, довжина хвилі. Окрім цього важливим моментом є фізичні властивості оброблюваного матеріалу і мікрогеометричний стан поверхні.

Залежно від рівня щільності потужності (W_p) лазерного випромінювання розрізняють наступні форми його взаємодії з речовиною [26]:

- при $W_p \approx 10^3 \div 10^4$ Вт/см² відбувається нагрів матеріалу без фазового переходу;
- при $W_p \approx 10^4$ Вт/см² відбувається нагрів матеріалу з фазовим переходом;
- при $W_p \approx 10^4 \div 10^5$ Вт/см² відбувається плавлення металу в режимі теплопровідності;
- при $W_p \approx 10^5 \div 10^6$ Вт/см² відбувається плавлення металу в режимі кінджального проплавлення і інтенсивне паротворення;
- при $W_p \approx 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ Вт/см² відбувається оптичний пробій пари металу в електричному полі потужного лазерного випромінювання з утворенням низькотемпературної нерівноважної щільної плазми з температурою $T < 50 \cdot 10^3$ К;
- при $W_p \approx 5 \cdot 10^6 \div 10^8$ Вт/см² відбувається лазерна ерозія, тобто процес інтенсивного видалення металу із зони лазерної дії у вигляді розплаву і парової фази металу;
- при $W_p \approx 10^9 \div 10^{12}$ Вт/см² формуються умови в поверхні металу, при яких відбувається сублімація, тобто випар твердої речовини без утворення рідкої фази.

На рис. 1.5 приведена діаграма стану оброблюваної зони металу залежно від щільності потужності і часу дії лазерного випромінювання [27].

Автори [27] справедливо відзначають, що дана діаграма відображає лише оцінні значення параметрів W_p і τ , оскільки процес лазерної обробки багато в чому залежить і від інших чинників – теплофізичних властивостей металу, шорсткості оброблюваної поверхні, вигляду використовуваних технологічних газів і інших параметрів обробки.

Зі всього різноманіття лазерних технологій, обумовлених специфікою лазерного випромінювання і універсальністю лазерного променя як інструменту, найбільше вживання в різних галузях машинобудування отримала

газолазерне різання металевих і неметалічних матеріалів. Найбільш ефективним виявилося її використання в заготівельному виробництві при обробці листових заготовок на підприємствах одиничного, малого і середньосерійного виробництва [28].

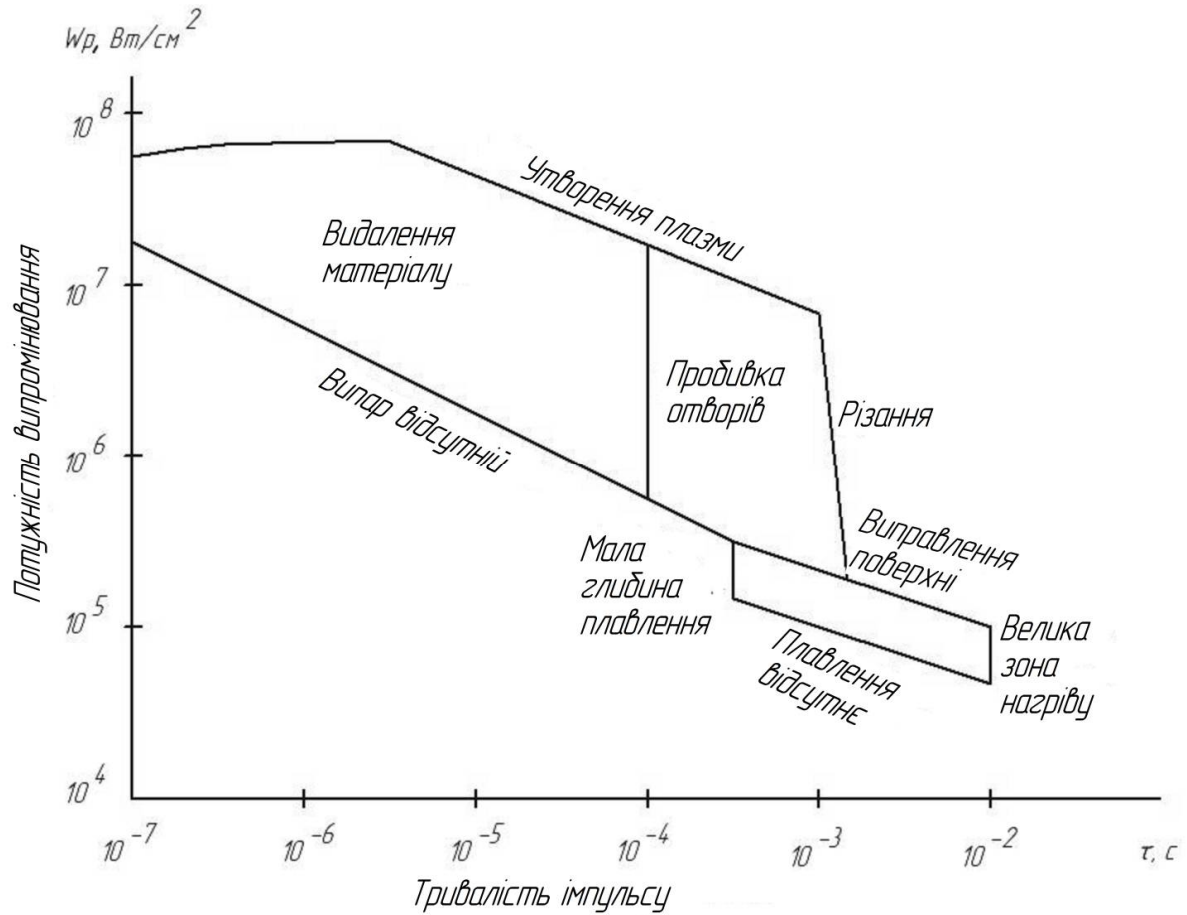


Рисунок 1.5 – Діаграма стану зони обробки металевих матеріалів залежно від щільності потужності і часу дії лазерного випромінювання

Основними перевагами лазерного різання є [26]:

- підвищення якості обробки за рахунок мінімальних зон термічного впливу, зниження теплових деформацій, відсутності силової дії інструменту на деталь;
- підвищення швидкості обробки порівняно з традиційними методами механічної обробки у декілька разів;
- зниження у декілька разів часу на підготовку виробництва при освоєнні випуску нової продукції;

- підвищення коефіцієнта використання матеріалу за рахунок впровадження автоматизованих систем оптимізації розкрою;
- якість різання конструкційних сталей дозволяє у багатьох випадках виробляти зварку встик без попередньої механічної обробки;
- відсутність зсуву кромки різа.

В цілому впровадження технології лазерного розкрою дозволяє знизити витрати на підготовку виробництва, забезпечуючи гнучкість заготівельного виробництва. Точність обробки складноконтурних деталей - від 100 до десятка мікрометрів.

Використання роботів зі світловолоконними лазерними системами дозволяє виробляти обробку об'ємних деталей, наприклад, елементів кузовів автомобілів без проектування і виготовлення спеціального технологічного оснащення.

Головними достоїнствами лазерного різання металевих листів є високі показники якості різа і хороша продуктивність обробки. У свою чергу, швидкість різання, як і товщина матеріалу, що розрізає, залежать від потужності і якості лазерного пучка. Останнім часом спостерігається створення лазерних комплексів для розкрою листових матеріалів потужністю 5-6 кВт і більш. В той же час відомий, що вимога одночасного підвищення потужності і досягнення високої якості пучка знаходяться в протиріччі [29], оскільки при збільшенні потужності в резонаторі збуджуються моди вищих порядків, що неминуче позначається на якості лазерного пучка. Якщо при потужності проточних CO₂- лазерів 3÷4 кВт коефіцієнт якості променю $K=0,6\div 0,9$, то збільшення потужності до 5 кВт супроводиться зниженням коефіцієнта K до 0,55, і далі при потужності 8÷12 кВт, коефіцієнт K зменшується до 0,26 [26].

При зменшенні ж коефіцієнта K зростає діаметр сфокусованого пучка на поверхні оброблюваного матеріалу, що не дозволяє ефективно використовувати потужність лазерного випромінювання, і супроводиться збільшенням ширини різа і зниженням швидкості різання.

Коефіцієнт K визначається відношенням розбіжності ідеального пучка з розподілом гауса енергії до реальної розбіжності пучка.

Для одномодового лазерного випромінювання з розподілом гауса енергії по перетину при кривій поляризації пучок вважається ідеальним і $K=1$ [30].

Для оцінки впливу окремих параметрів лазерного випромінювання на процес різання слід скористатися відомим вираженням щільності потужності в зоні обробки [26]:

$$W_p = \frac{\pi P K^2}{4\lambda^2 \left(\frac{F}{d}\right)^2}, \quad (1.1)$$

де P – потужність лазерного випромінювання, Вт;

K – коефіцієнт якості лазерного пучка;

λ - довжина хвилі лазерного випромінювання, мкм;

F – фокусна відстань лінзи, мм;

d - діаметр променя лазерного випромінювання, мм.

Аналіз виразу (1.1) показує, що чим вище якість пучка, тим при меншому вугіллі фокусування може бути досягнута необхідна щільність потужності у фокальній плямі при одному і тому ж значенні потужності випромінювання. А меншим кутам фокусування відповідає велика довжина фокальної області. З технологічних позицій це дозволяє формувати вузькі канали різа з паралельними стінками при лазерному різанні навіть товстолистових матеріалів. Для якісного різання товстих листів використання малих кутів фокусування є єдиним технологічним рішенням при лазерному різанні в струмені інертного газу. Це пояснюється тим, що в зоні обробки єдиним джерелом енергії є енергія лазерного випромінювання і для забезпечення необхідного рівня потужності в нижній частині матеріалу, що розрізає, фокус променя заглиблюється в матеріал. Заглиблення фокусу може складати половину товщини, а інколи і велику її частину. У даних умовах

малий кут фокусування забезпечує менший діаметр на поверхні, і відповідно і меншу ширину різа і кращу геометрію каналу. У таблиці 1.2 приведені геометричні параметри різа і шорсткість поверхні вуглецевої сталі різної товщини [31].

З результатів таблиці 1.2 витікає, що ширина різа в найвужчій частині каналу (близькою до нижньої кромки) близька до діаметру лазерного променя в перетяжці. Розкид ширини різа по довжині каналу тим більше, чим більше товщина аркуша.

Призначення основних параметрів технологічних режимів, таких як потужність випромінювання і швидкість різання, визначається, з одного боку досягненням максимальної продуктивності, а з іншої – забезпеченням необхідної точності і якості різа.

Таблиця 1.2 – Параметри різання вуглецевої сталі

Товщина, мм	Потужність, Вт	Швидкість різання, м/хв	Ширина різа, мм			Шорсткість Rz, мкм	
			На верхній кромці	На половині товщини	На нижній кромці	На верхній кромці	На нижній кромці
10	4500	1,3	0,43	0,31	0,29	-	-
16	4500	0,32	0,61	0,45	0,33	31...42	37...42
20	4500	0,25	1,0	0,46	0,49	-	-

Важливим параметром на операціях різання матеріалів є ширина різа, яка визначає не лише точність розміру вирізаної деталі, але і кількість матеріалу, що вирушає у відхід. Результати експериментальних досліджень [27, 32] свідчать про зменшення ширини різа, як при збільшенні швидкості різання, так і при підвищенні потужності лазерного випромінювання.

Окрім геометрії різа, параметром операції різання, що регламентується, є його мікрогеометрія. Аналіз фрактографічного стану поверхні після лазерного різання показує, що мікрогеометрія обробленої поверхні є сукупністю своєрідних штрихів, не властивих традиційним методам механічної обробки, і пов'язана з фізичним механізмом взаємодії лазерного випромінювання з оброблюваним матеріалом.

Авторами [33, 34] встановлені залежності кроку штриха від швидкості різання і виявлена наявність критичного її значення, що викликає стрибкоподібну зміну кроку штриха. Показаний характер залежності критичної швидкості від параметрів різання, що свідчить про роль окислювальних процесів у формуванні штрихів. Авторами сформульована гіпотеза, згідно якої утворення характерних для лазерного різання штрихів пов'язане з розподілом хвилі окислення заліза. Спостережуваний же стрибок кроку в зоні критичних швидкостей різання можна пояснити рівністю швидкостей руху променю і хвилі окислення. Глибина штриха, що визначає у результаті величину шорсткості, складає не більше $1/3$ від щита штриха [32].

Дослідженню топографії поверхні різа присвячені роботи [35, 36], в яких показано формування шорсткості різа, яка є сукупністю регулярно розташованих і певним чином просторово орієнтованих нерівностей (у даній роботі іменованих борозенками) для різних груп металевих матеріалів: низковуглецеві, середньовуглецеві і низьколеговані сталі; високовуглецеві, високолеговані (у тому числі і неіржавіючі) сталі; титан і його сплави; кольорові метали (алюміній, мідь). У роботі для оцінки ефективності і якості процесу запропоновано використовувати комплексний параметр, що є відношенням потужності випромінювання до швидкості різання (P/V_p), або відношення потужності випромінювання до глибини прорізання металу (P/h).

Окрім точності, геометрія різа і його якості важливою характеристикою газолазерного різання є формування зони термічного впливу (ЗТВ), в якій відбуваються зміни фазового і хімічного складу металу [37]. У таблиці 1.3 [38] представлені режими і результати різання різних металевих матеріалів

випромінюванням безперервного CO₂ – лазера з діаметром фокусування 0,2 мм. Для зменшення розмірів ЗТВ на кромках різа і запобігання надмірному перегріву матеріалу деталі, що приводить до термічних деформацій, а також до займання металу, лазерне різання слід здійснювати з охолодженням зони різання кільцевим струменем води [35].

Таблиця 1.3 – Режими і результати різання різних металевих матеріалів випромінюванням безперервного CO₂ – лазера [38]

Матеріал	Товщина листа, мм	Потужність, Вт	Швидкість різання, м/хв	Тиск газу, МПа	Параметри розрізів		
					Ширина, мм	Глибина ЗТВ, мм	Шорсткість Rz, мкм
Вуглицева сталь	1,0	1000	6,0	0,15	0,41	0,08	-
	1,0	1000	8,0*	0,15	0,37	0,06	-
	3,3	1000	2,0	0,15	0,51	0,26	-
	5,2	1000	1,0	0,15	0,51	0,26	-
Вуглицева сталь	5,2	1000	2,5	0,15	0,46	0,17	-
	10,0	1000	0,4	0,15	0,82	0,40	80,0
Нержавіюча сталь	2,0	1000	3,5	0,25	0,39	0,10	-
	2,0	1000	3,0	0,15	0,40	0,09	-
	5,0	1000	0,9	0,15	0,64	0,27	-
Титан	2,0	1000	2,2	0,15	0,34	-	-
	1,0	1000	2,3	0,15	0,34	0,24	16,4
	10,0	900	1,8	0,60	-	-	0,8
Алюміній	2,0	1000	0,2	0,15	0,38	-	-
	2,0	1000	0,5	0,15	0,34	-	-
	8,0	3000	0,6	-	0,5	-	-

1.3 Кисневе різання

Кисневе різання є одним з найбільш поширених способів термічного різання, заснованих на видаленні незначних об'ємів металу в зоні обробки за допомогою хімічної і електрофізичної дій. Кисневе різання призначене для здобуття заготовок для подальшого виготовлення різного вигляду зварних конструкцій з листових матеріалів, прокату, труб і інших виробів [39 - 47].

Суть фізико-хімічних процесів при кисневому різанні полягає в інтенсивному окисленні металу в зоні різання з подальшим видаленням рідкого оксиду струменем кисню. Процес розігрівання металу підігрівуючим полум'ям починається з верхньої кромки різа до температури займання металу в кисні, яка складає $T_{всп} = 1323-1473$ °К залежно від хімічного складу. У подальший момент часу в зону різання ріжучим соплом подається струмінь кисню і відбувається спалах металу з утворенням оксидів, що у свою чергу, приводить до виділення значної кількості теплоти в зоні різа, що забезпечує нагрів металу до температури плавлення. В результаті цього на верхній кромці утворюється суміш розплаву оксидів і розплаву залоза, яка під дією струменя кисню переміщається по бічній стінці різа і здійснює нагрів шарів металу, що пролягають нижче, з подальшим їх окисненням, далі розплавленням металу до тих пір, поки різ не буде сформований по всій товщині металу. Одночасно з цим починається переміщення різачка у напрямі різа з певною швидкістю. Різання виходить на квазістаціонарний режим, коли на лобовій поверхні різа по всій його товщині формується шар металу, що безперервно горить.

Таким чином, для стабільного розвитку і протікання процесу кисневого різання необхідно, щоб:

- підігрівання основного металу до температури займання;
- виділення продуктами горіння необхідної кількості теплоти для освіти на поверхні різа шару рідкого металу;
- достатня в'язкість рідкого розплаву для його переміщення струменем кисню;

- здійснювався безперервний контакт струменя кисню і рідкого металу. Відмічені фізичні умови для процесу кисневого різання накладають певні вимоги до металу, що розрізає. В першу чергу, для забезпечення початку кисневого різання необхідно, що температура займання металу має бути нижче за температуру його плавлення.

Схемний процес кисневого різання представлений на рис. 1.6 [39].

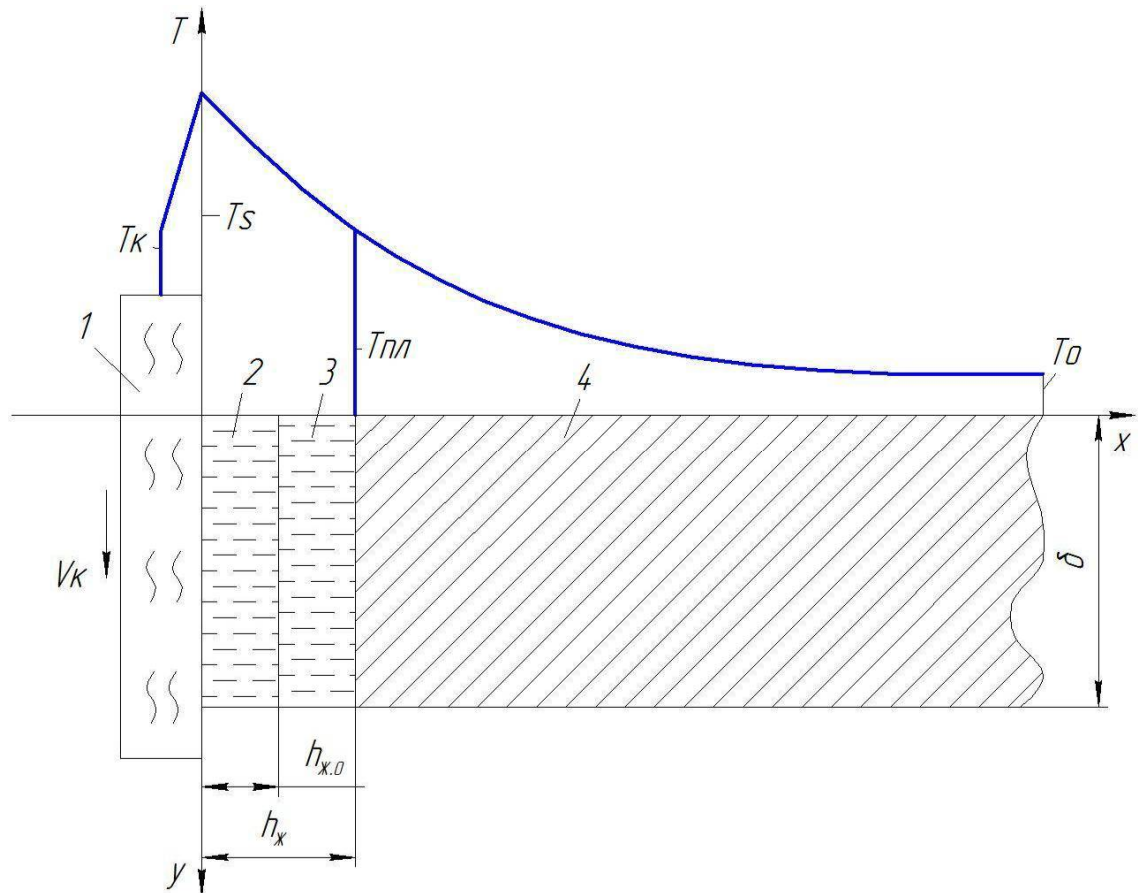


Рисунок 1.6 – Схема процесу кисневого різання:

1 - струмінь кисню; 2 - рідкий оксид; 3 - розплавлений метал; 4 - твердий метал; T_k – температура струменя кисню; T_s – температура на поверхні оксидного шару; $T_{пл}$ - температура плавлення металу; T_o – температура металу у вихідному стані; b – товщина різання (аркуша); $h_{ж.о}$ – товщина шару рідкого оксиду; $h_{ж}$ - товщина рідкого шару на лобовій поверхні різання; V_k – швидкість струменя кисню

Інакше, оброблюваний метал почне плавитися і видуватися струменем кисню, що і визначає умову розвитку процесу різання по плавильному механізму, а це вимагає значних енергетичних витрат. Так, температура плавлення заліза складає 1808°K , температура займання 1323°K .

Далі, необхідне дотримання умови співвідношення температур плавлення оксидів і самого оброблюваного металу. Температура плавлення оксидів має бути нижче, інакше струмінь кисню не зможе окислювати розплавлений метал. Так, температура плавлення оксиду FeO складає 1643°K проти температури плавлення заліза - 1808°K .

Наступна вимога по тепловиділенню в зоні обробки при освіті оксидів пов'язана з тим, що малу кількість теплоти не забезпечить прогрівання лобової поверхні реза до температури плавлення, що викличе переривання процесу різання. Аналогічний ефект спостерігатиметься при обробці металів з високою теплопровідністю. Прикладом може служити краща оброблюваність титану в порівнянні із сплавами заліза унаслідок значного тепловиділення (до 906 МДж/моль) при горінні титану і нижчою його теплопровідністю.

Істотний вплив на розвиток процесів при кисневому різанні надають різного роду легуючі елементи у складі залізовуглецевих сплавів, такі як, Mn , Ni , Ti , Al , Cr і ін. Наявність домішок приводить до освіти в рідкому розплаві тугоплавких оксидів, що зменшують його рідкотекучість і що перешкоджають інтенсивному теплообміну між розплавом і киснем ріжучого струменя.

Головною відмінністю між різними марками залізовуглецевих сплавів є процентний вміст вуглецю. Так, збільшення вмісту вуглецю приводить до підвищення температури займання металу і до зниження температури його плавлення. Не дивлячись на це, сталі з вмістом вуглецю до 1% (а це практично весь діапазон низько, середньо і високовуглецевих сталей) добре обробляються кисневим різанням. Подальше підвищення вмісту вуглецю приводить до істотного обмеження в обробці так, наприклад, звичайне кисневе різання чавунів неможливе. Окрім цього, підвищення вмісту вуглецю знижує в'язкість рідкої фази, що є сприятливим чинником для різання високовуглецевих сталей.

Слід мати на увазі, що вміст у складі тієї або іншої комбінації різних домішок приводить при кисневому різанні до утворення шлаків складного хімічного складу, що істотно впливають на протікання процесу обробки.

Окрім розглянутих чинників істотний вплив на процес кисневого різання роблять технологічні чинники, пов'язані із струменем ріжучого кисню (параметри струменя – тиск, швидкість виділення з сопла, витрата газу, а також, міра чистоти самого кисню). Так, підвищення міри чистоти з 98,0 до 98,8% дозволяє збільшити швидкість різання до 35% [39, 48].

Зважаючи на термічний характер даного процесу різання і високий градієнт температурного поля в зоні різання, слід чекати утворення гартівних структур на поверхні різа навіть при обробці низковуглецевих сталей. Розмір зони термічного впливу досягає значних величин (до 55мм) при товщині матеріалу, що розрізає, 1000 мм.

Ефективність будь-якої механічної обробки, так само як і термічного різання, багато в чому визначається точністю розмірів, що досягається, і якістю поверхні, які регламентуються ГОСТом 14792-80 [49], у відповідність з яким точність визначається значенням розмірного допуску, а якість – відхиленням від перпендикулярності різа до поверхні аркуша і шорсткістю поверхні самого різа. Шорсткість в даному випадку визначається як найбільша висота нерівностей на поверхні різа.

Залежно від технологічного призначення деталей після термічного різання, стандартом встановлено три класи точності:

- клас 1 – вищі вимоги до якості різа;
- клас 2 – вимоги до якості різа досягаються на звичайних серійних машинах у виробничих умовах;
- клас 3 – вимоги до якості, що досягаються при максимальних показниках економічності процесу різання.

Допустимі відхилення розмірів від номінальних значень для різних класів представлені в таблиці 1.4, а граничні відхилення поверхні різа від перпендикулярності і допустимі значення шорсткості – в таблиці 1.5.

У таблиці 1.6 приведені швидкості фігурного машинного кисневого різання конструкційних сталей різної товщини для досягнення 1 класу якості поверхні різа при чистоті ріжучого кисню 99,5% [48].

Таблиця 1.4 – Допустимі відхилення (мм) розмірів від номінальних значень для різних класів точності по ГОСТ 14792-80

Клас точності	Товщина розрізаемого метала, мм	Номінальні розміри деталей, мм			
		менше 500	500...1500	1500...2500	2500...5000
1	5-30	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
	31-60	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
2	5-30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
	31-60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
3	5-30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
	31-60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0

Таблиця 1.5 – Граничні відхилення поверхні від перпендикулярності і допустимі значення шорсткості при кисневому різанні стали згідно ГОСТ 14792-80

Показник якості	Товщина розрізаемого метала, мм	Клас точності		
		1	2	3
Відхилення від перпендикулярності, мм	5-12	0,2	0,5	1,0
	13-30	0,3	0,7	1,5
	31-60	0,4	1,0	2,0
Шорсткість, мм	5-12	0,05	0,08	0,16
	13-30	0,06	0,16	0,25
	31-60	0,07	0,25	0,50

Таблиця 1.6 – Залежність швидкості різання від товщини розрізаємої сталі

	Товщина розрізаємої сталі, мм								
	3,0	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0
Швидкість різання, м/хв.	0,55	0,50	0,45	0,40	0,38	0,35	0,32	0,30	0,25

Для визначення значення швидкості різання при необхідності досягнення класу якості різа, відмінного від першого, і при використанні ріжучого кисню іншої чистоти, в роботі [48] пропонуються поправочні коефіцієнти:

$$V_p = V_1 \cdot V_K \cdot V_{ч},$$

де V_p – швидкість різання, що розраховується, м-кодів/мін;

V_1 – швидкість різання, відповідна 1 класу якості і при використанні кисню чистотою 99,5%;

V_K – коефіцієнт, визначуваний класом якості;

$V_{ч}$ – коефіцієнт, визначуваний чистотою кисню.

Так, для 2-го класу значення $K_k = 1,2$; для 3-го класу $K_k = 1,4$.

Залежність відносної швидкості різання від чистоти ріжучого кисню представлена в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Залежність коефіцієнта швидкості різання від чистоти кисню

	Чистота кисню, %					
	99,8	99,5	99,2	99,0	98,5	98,0
Коефіцієнт швидкості різання, $K_{ч}$	1,19	1,00	0,92	0,90	0,84	0,74

1.4 Плазмово-дугове різання

У останні десятиліття плазмово-дугове різання набуло широкого

поширення і знаходиться в одному ряду з кисневим різанням [50 - 56]. Обидва способи є різновидами термічного різання, але відрізняються суттю процесів, закладених в основу обробок.

Низькотемпературна плазма є нагрітою до температури $5 \cdot 10^4$ °К електропровідний газ, що складається з позитивно і негативно заряджених часток, – іонів [57]. Низькотемпературну плазму, як особливий стан речовини отримують в стовпі електричної дуги, яка створюється в спеціальних пристроях, – плазмотронах.

Існують дві основні схеми плазмено-дугового розряду – плазмено-дуговий струмінь і плазмова дуга. У першому випадку незалежна плазмова дуга збуджується між незалежними електродами, а оброблюваний виріб є електрично нейтральним. У другому – має місце дуга прямої дії, коли оброблюваний виріб є одним з електродів.

Зважаючи на факт, що дуговий розряд розвивається у вузьких каналах джерела (плазмотрона), стає очевидним, що при відносно невеликих витратах плазмовинекаючих газів удається отримати значні швидкості потоків плазми.

На відміну від кисневого різання, фізична суть плазменодугового різання полягає в розплавленні оброблюваного матеріалу потоком низькотемпературної плазми у вузькому каналі різа і подальшому видуванні розплаву потоком.

Основними технологічними параметрами даної обробки є потужність дуги (і в першу чергу – напруга), що визначає граничні можливості по товщині різа. Сила струму призначається з умов, що забезпечують необхідний рівень потужності дуги, при якій інтенсивність розплавлення металу в каналі різа відповідала б заданою швидкості різання. Щільність потужності, що реалізовується, в плямі нагріву плазменодугою складає 10^8 - 10^9 Вт/см², що на порядок перевищує потужність плазмового струменя. При цьому тепловий ККД в першому випадку досягає 70-80 %, при 50-60 % - в другому.

Для розуміння фізики процесу плазмено-дугового різання доцільно розглянути схемне зображення взаємодії плазмено-дугового розряду з оброблюваним матеріалом (рис. 1.7) [39]. Зі схеми видно, що формування різа в оброблюваному металі здійснює-ся трьома різними ділянками плазмової дуги: стовпом (l_1), анодною плямою (l_2) і факелом (l_3). Ефективність нагріву на відмічених ділянках різна, що і визначає форму фронту просування різа при обробці.

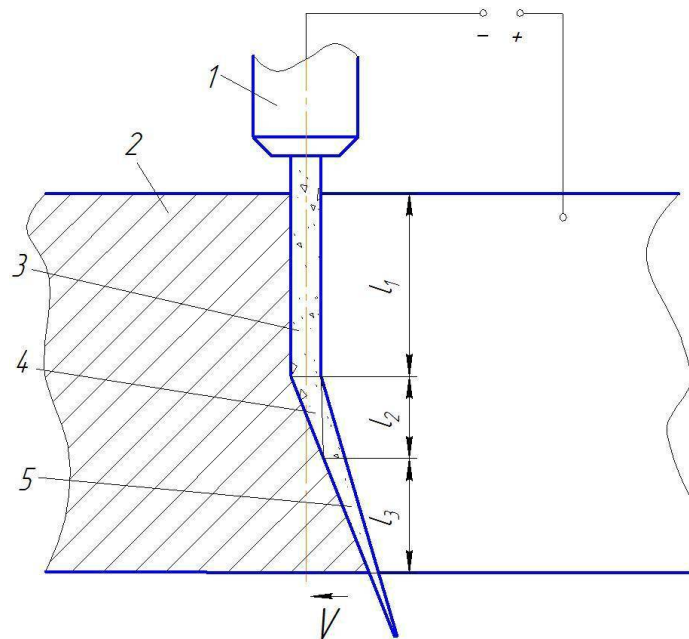


Рисунок 1.7 – Схема плазмено-дугового різання: 1 – плазмотрон; 2 – оброблювальний метал; 3 – стовп дугового розряду; 4 – анодна пляма; 5 – факел дуги; l_1 – протяжність стовпа дуги; l_2 – протяжність анодної плями; l_3 – протяжність факела; V – напрям різання

Ширина і форма різа визначаються як режимами процесу, так і параметрами елементів плазмотрона, що формують геометрію стовпа дуги. Якщо управління режимами здійснюється напругою, струмом, швидкістю різання, складом і параметрами плазмовиникаючих газів, то геометрія стовпа значною мірою залежить від розмірів і геометрії ріжучого сопла. При оптимальних режимах різання і відносно невеликій товщині металу різ формується з відносно паралельними кромками.

Проте, фізика процесу, що характеризується наявністю трьох ділянок теплового джерела з різною ефективною потужністю, обумовлює формування при плазмено-дуговому різанні більшої конусності в порівнянні з кисневим різанням.

Головним технологічним параметром плазмено-дугового різання є швидкість, пов'язана з енергетичними параметрами плазмової дуги, вибір яких, у свою чергу, визначається як теплофізичними властивостями матеріалу, що розрізає, так і його товщиною. Залежність швидкості різання від відмічених характеристик визначається вираженням [39]:

$$V = \frac{0,24IU\eta - q}{\rho t \delta \Delta s}, \quad (1.2)$$

де V – швидкість плазмено-дугового різання, м/год;

I – сила струму дуги, А;

U – напруга на дузі, В;

η - ефективний ККД дуги;

q – інтенсивність тепловіддачі в метал, Вт;

ρ - щільність металу, кг/м³;

t - ширина різа, мм;

δ – товщина металу, що розрізає, мм;

Δs – приріст питомої ентальпії металу, Дж/кг.

Вплив теплофізичних властивостей матеріалу позначається на швидкості різа таким чином. Легші метали з меншими значеннями теплоємності і теплопровідності допускають вживання великих швидкостей обробки

У теж час, необхідною умовою по рівнянню (1.2) для здійснення процесу різання як такий є дотримання нерівності, що визначає перевищення потужності ріжучої дуги над кількістю теплоти, необхідною для плавлення, попередньо в метал, в наступному вигляді:

$$0,24IU\eta > q \quad (1.3)$$

Дане співвідношення є необхідною умовою для повного прорізання металу заданої товщини. При цьому, окрім енергетичних явищ при плазмено-дуговому різанні необхідно враховувати і правильний розвиток гідродинамічних процесів в зоні різання, що визначають умову видалення розплавленого металу і що значною мірою впливають на якість різа.

Практика плазмово-дугового різання показує, що характерною умовою правильного призначення швидкості є напрям потоку шлаку, так званого «хвоста», витікаючого з різа. При оптимальній, з точки зору якості різа, швидкості, напрям потоку відрізняється від нормального по відношенню до поверхні аркуша і направлене під невеликим кутом (5-10°) убік, зворотну напрямку різання. Зменшення швидкості від оптимальної, приводить до розширення різа і підвищеного скупчення шлаку, що легко видаляється, на нижній кромці різа. Підвищення ж швидкості від оптимальної приводить до появи спочатку на нижній кромці важко відокремлюваних крапель розплавленого металу, а потім до утворення не прорізу з формуванням перемичок в нижній частині металу з викидом розплавленого металу вгору.

Як і для всіх методів термічного різання, якість плазмено-дугового відповідно до ГОСТ 14792-80, регламентується наступними показниками: розмірним допуском, не перпендикулярністю поверхні різа, її шорсткістю і глибиною зони термічного впливу. Допустимі відхилення розмірів деталей від номінальних значень для різних класів точності були представлені в таблиці 1.4, а граничні нормативні відхилення поверхні різа від перпендикулярності і допустимі значення шорсткості і глибини зони термічного впливу для різних класів якості наведені в таблицях 1.8, 1.9.

Порівняння досяжних показників по точності і якості кисневого і плазмено-дугового різання показує на їх ідентичність, за виключенням показника перпендикулярності поверхні різа. По цьому показнику плазмено-дугове різання (таблиця 1.8) поступається кисневому різанню (таблиця 1.5), що пояснюється різною фізикою процесу формування різа в обох випадках.

Таблиця 1.8 – Допустимі нормативні відхилення (мм) поверхні різа від перпендикулярності по ГОСТ 14792 -80

Клас якості	Товщина металу, мм		
	5-12	13-30	31-60
1	0,4	0,5	0,7
2	1,0	1,2	1,6
3	2,3	3,0	4,0

Таблиця 1.9 – Допустимі значення шорсткості поверхні різа і глибини зони термічного впливу по ГОСТ 14792-80

Клас Якості	Норми шорсткості, мм, при товщині металу, мм			Норми глибини ЗТВ, мм, при товщині металу, мм		
	5-12	13-30	31-60	5-12	13-30	31-60
1	0,05	0,06	0,07	0,1	0,2	0,4
2	0,1	0,2	0,32	0,4	0,8	1,6
3	0,2	0,32	0,63	0,8	1,6	3,2

Важливим для плазово-дугового способу різання є плазовиникаюче середовище, як яке використовуються технічні гази, які по своїй дії на катод підрозділяються на неактивних (азот, аргон, водень) і активних (повітря і кисень). До плазовиникаючих газів пред'являються наступні вимоги:

- забезпечення стабільного горіння дуги;
- ефективне перетворення електричної енергії в теплову;
- рівномірну передачу енергії по товщині різа;
- відсутність негативної дії, як на електрод, так і на оброблюваний матеріал.

Використання інертних газів як плазовиникаючих забезпечує хорошу іонізацію в стовпі дугового розряду, добре захищає вольфрамовий електрод плазмотрона, не надає несприятливої дії на поверхню різа. Проте висока

вартість інертних газів і неможливість їх деіонізації в стовпі дугового розряду стримує їх широке вживання в даній технології. Тому для підвищення продуктивності плазово-дугового різання і збільшення діапазону оброблюваних матеріалів по товщині як добавки до аргону використовують два три атомні гази, що є активними теплоносіями. Аргоноводневі суміші широко використовують при різанні таких металів як магнієві і алюмінієві сплави.

Плазово-дугове різання із застосуванням стислого повітря як плазовиникаючого газу рекомендується для конструкційних і високолегованих сталей. Для підвищення продуктивності в даному випадку рекомендується використовувати стисле повітря з підвищеним вмістом кисню або чистий кисень. Проте при цьому необхідно забезпечити захист електроду інертним газом.

Алюмінієві сплави також рекомендують розрізати з використанням азото-водневих сумішей. При знижених вимогах до якості різа алюмінієві сплави завтовшки 5.20 мм допускається різати в середовищі повітря або азоту. Особливо точні і якісні різи виходять на аргоно-водневих сумішах. Технологічні режими плазово-дугового різання алюмінієвих сплавів, що рекомендуються, представлені в таблиці 1.10 [39].

Таблиця 1.10 – Технологічні режими плазово-дугового різання алюмінієвих сплавів

Товщина розрізаємого металу, мм	Діаметр сопла, мм	Робочий струм, А	Напруга на дузі В	Витрати плазовиникаючого газу, м ³ /ч				Швидкість різання, м/хв
				аргон	азот	водень	повітря	
10	5	450	85	-	5,0	-	-	6,0
30	5	450	90	-	1,5	1,0	-	1,0
80	5	450	110	-	1,5	1,0	-	0,5
200	7	700	165	0,4	-	4,0	1,0	0,18

Для різання конструкційних сталей як плазмовинекаючі газу використовується повітря або суміші з підвищеним вмістом кисню (до 50%). Режими плазмового для повітря різання конструкційних сталей представлені в таблиці 1.11 [39].

Для різання високолегованих сталей застосовуються ті ж технологічні режими, як і для низковуглецевих сталей, а як плазмовинекаючі газу окрім повітря використовують суміші азоту і кисню.

Технологічний режим за швидкістю різа для мідних сплавів занижений в порівнянні із сталями, що пов'язане з вищими значеннями теплоємності і теплопровідності. Як плазмовинекаючі газу в цьому випадку використовується азот або його суміші з воднем.

Таблиця 1.11 – Режими плазмового для повітря різання низковуглецевих сталей

Товщина роз- різаймого ме- тала, мм	Робочій струм, А	Діаметр со- пла, мм	Витрати по- вітря, м ³ /ч	Швидкість різання, м/хв
10	200	3,0	6,0	2,0
10	300	3,0	6,0	3,2
20	200	3,0	6,0	0,83
20	300	3,0	6,0	1,57
30	300	3,0	6,0	0,90
30	400	3,0	6,0	1,50
50	400	4,0	8,0	0,48
70	400	4,0	8,0	0,24
100	400	4,0	8,0	0,08
130	450	4,0	8,0	0,03

Аналіз технічних характеристик і технологічних можливостей плазмено-дугового різання показав, що даний спосіб призначений в основному для різання листових матеріалів від 10 мм і вище (табл. 1.10, 1.11). Недоцільність використання даної технології для малої товщини металів (до 10 мм) пояснюється технічними особливостями процесу. Так, діаметр сопла, що визначає ширину різа, порівнянний і навіть перевершує товщину матеріалу, що розрізає, що при використовуваних значеннях струму (200-700 А) не забезпечує достатньої концентрації енергії в зоні різа і не дозволяє отримати високу якість і точність різа при значній зоні термічного впливу. Таким чином, плазмово-дугове різання в розглянутого вище виконання може розглядатися як попереднє різання листових матеріалів, що вимагає додаткової механічної обробки.

Вдосконалення технології плазмово-дугового різання, направлене на підвищення ефективності процесу як з позицій забезпечення високих показників точності і якості обробки, так і досягнення максимальної продуктивності при різанні широкої номенклатури металів і сплавів, дозволило розробити ефективну технологію і устаткування тонкострумового плазмового різання [58 - 68]. Досягнення підвищених показників точності і якості різа у поєднанні з високою продуктивністю процесу дозволяє розглядати тонкоструйну плазмову різання як інноваційну технологію в заготівельному виробництві [61, 63].

У роботах [58 – 60, 67, 68] представлені результати по вивченню тонкоструйного плазмового різання з позицій оцінки точності і якості різа конструкційних сталей. Аналізу причин погрешностей формоутворення і пошуку доріг їх усунення присвячені дослідження авторів [62 - 65].

Моделювання процесів формоутворення при обробці криволінійних контурів з використанням даної технології дозволило розширити її технологічні можливості [64, 66].

Можливість здобуття вузького різа з високою точністю при використанні даної технології розкрою, з одного боку, визначається тонкоструйним характером виділення потоку плазми з високою концентрацією

енергії, а з іншою, значною мірою залежить від стану витратних елементів плазмотрона і, в першу чергу, катода і сопла. У роботах [69 - 71] представлені результати по впливу зносу витратних елементів на точність і якість різа і запропоновані дороги по збільшенню терміну їх служби.

Відмітною особливістю даної технології є поєднання високої продуктивності процесу різання, властивого плазмено-дуговому способу, з досягненням показників точності і якості різа, характерних лазерній обробці. Даний факт дозволяє розглядати тонкоструйне плазмове різання як альтернативу лазерній обробці для різання листових металевих матеріалів товщиною до 10 мм [72].

Ефективність використання тонкоструйної плазмового різання стає тим вище, чим ближче знаходиться товщина різа до верхнього кордону. Це пов'язано з тим, що ККД лазерної обробки істотно нижче, ніж в плазмових технологій. Високий ККД (70-80%) тонкоструйної плазми пояснюється мірою концентрації енергії в плазмовій дузі, температура якої досягає значень 5000 до 30000 ° С [57, 73]. Для розуміння фізичних основ тонкоструйного плазмового різання необхідне вивчення, як самого процесу формування плазмової дуги, так і її взаємодії з оброблюваним матеріалом. Конструктивна схема елементів плазмотрона для тонкоструйного плазмового різання представлена на рис. 1.8.

Для створення ріжучої дуги між катодом плазмотрона і деталлю (анодом) заздалегідь запалюється пілотна дуга між катодом і соплом яка і приводить до часткової іонізації плазмовиникаючого газу, що подається в канал 3 плазмотрона. Іонізований газ, будучи електропровідним, на виході з сопла плазмотрона замикає електричний ланцюг «катод – деталь», запалюючи ріжучу дугу, яка і є джерелом теплової енергії для розділення матеріалу деталі. В той же час не вся дуга на своєму протязі бере участь в процесі обробці.

Автори роботи [74] виділяють характерні ділянки в стовпі плазмової дуги (рис. 1.9).

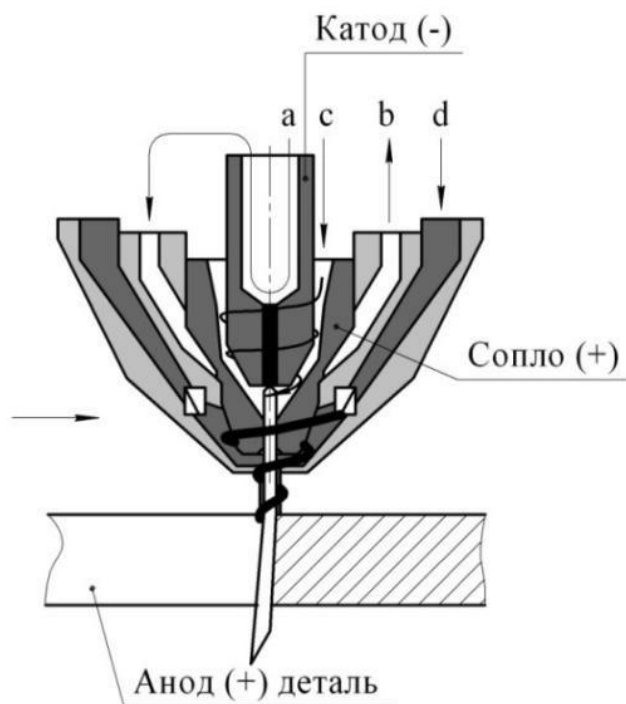


Рисунок 1.8 – Конструктивна схема формування тонкоструйної плазми: а, b – канали охолодження катода і сопла; з – канал плазмовиникаючого газу; d – канал завихрюючого газу

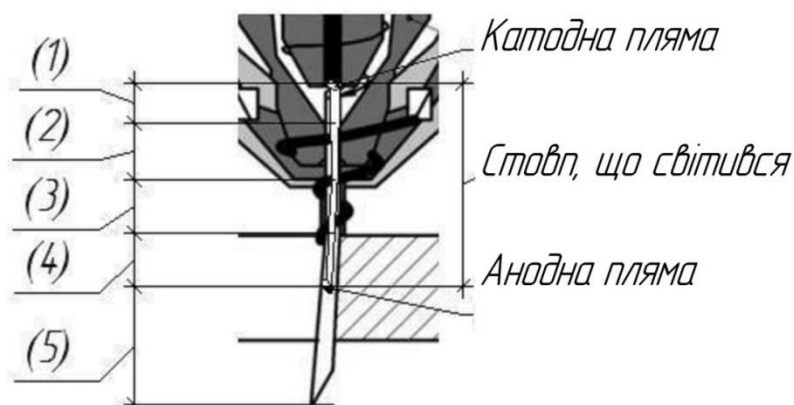


Рисунок 1.9 – Характерні ділянки стовпа плазмової дуги

Так, ділянка (1), що має назву «Закритий стовп», знаходиться між катодною плямою і верхнім зрізом каналу сопла. Даній ділянці характерний відносний спокійний перебіг плазмовиникаючого газу. Наступна ділянка (2) стовпа дуги схильна до стискування охолоджуваними стінками сопла. Далі від нижнього зрізу сопла аж до поверхні оброблюваної деталі розташована ділянка

(3), який на відміну від попереднього знаходиться у відкритому просторі. При цьому його стабілізація і напрям забезпечується співвісним потоком плазми і оболонкою холодного неіонізованого плазмовиникаючого газу, а також потоком завихрюючого газу. Додаткова дія на дугу завихрюючого газу забезпечує додаткове її стискування і стабілізацію. Стискування дуги, зменшуючи поперечний перетин стовпа, забезпечує підвищення щільності потужності. З технологічних позицій стабілізація дуги покращує якість різа, зменшує гратовиникнення на нижній кромці різа, підвищує точність форми різа за рахунок зменшення оплавлення на верхніх кромках. Введення стискування і стабілізації дуги завихрюючим газом і є відмітним моментом в технології тонкоструйного плазмового різання. Так, при використанні традиційних технологій плазмово-дугового різання ширина різа досягає 5 мм при товщині різа 10 мм [74], а при використанні тонкоструйного плазмового різання – 1,8 мм [75].

Наступна ділянка (4) в стовпі плазмової дуги, розташований від поверхні різа аж до анодної плями, безпосередньо бере участь в розділенні оброблюваного матеріалу, продукти якого в розплавленому стані виносяться із зони різа плазмовим струменем (ділянка 5).

Якщо елементи 1,2,3 стовпа плазмової дуги є ділянками, на яких відбувається її формування, то ділянки 4,5 забезпечують формоутворення каналу різа в оброблюваному матеріалі.

Різна природа дії на оброблюваний матеріал лазерного променя і плазмової дуги накладає певні обмеження на лазерну обробку матеріалів з високою відбивною здатністю. У цих випадках удаються до додаткових прийомів по зниженню відбивної здатності подібного класу матеріалів за рахунок нанесення на поверхню різного роду що поглинають світлове випромінювання покриттів.

Проте дане рішення виявляється не прийнятним при різанні шаруватих композицій, коли одна із складових з високою відбивною здатністю знаходиться усередині композиції. Так, малюнок 1.10 ілюструє результат

лазерного різання композиції сталь + мідь при накладенні лазерного випромінювання з боку сталі.

Технологія і режими лазерного різання відповідали розкрою стали, раціональності яких свідчить формування каналу різа у верхній частині композиції, яке може бути описане процесами поглинання лазерного випромінювання оброблюваним матеріалом, його нагрівом аж до температур плавлення і випару з подальшим видаленням продуктів розплаву із зони різа. У міру просування лазерного променя углиб композиції характер процесу різко міняється на кордоні двох металів. Через високу здатність міді, що відображає, на даному етапі обробки відбувається практично повне віддзеркалення світлової енергії від кордону розділу. Факт повного віддзеркалення лазерного променя підтверджується розширенням каналу різа в нижній частині сталевій складовій, що примикає до кордону розділу, і відсутністю практично будь якого результату у формуванні каналу різа в міді.

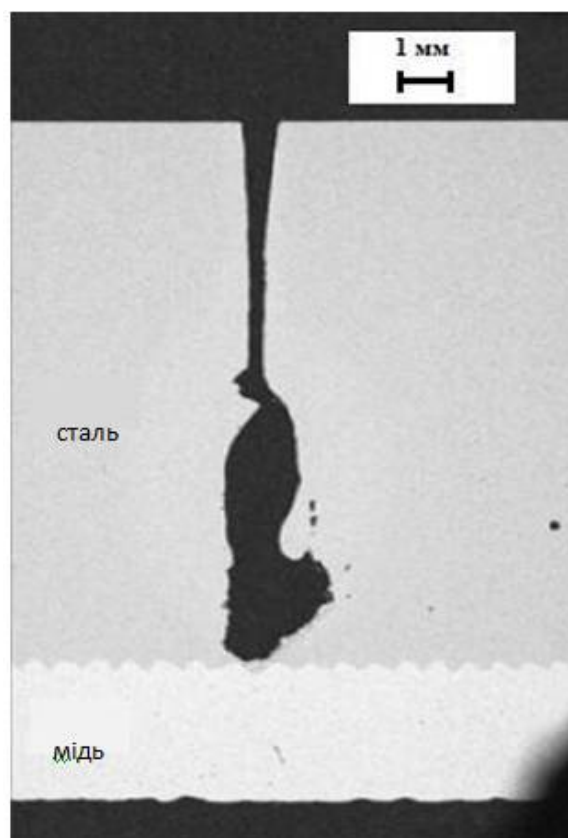


Рисунок 1.10 – Результат лазерного різання шаруватої композиції «сталь + мідь», отриманою зваркою вибухом

Аналіз можливих механізмів по усуненню даних проблем при розкрої подібного роду композицій матеріалів за допомогою лазерного променя показав на відсутність відомих в практиці лазерного розкрою технічних і технологічних рішень.

Очевидно, що для різа даних матеріалів необхідно задіювати технологічні методи, засновані на інших фізичних процесах взаємодії енергії, що підводиться, і оброблюваного матеріалу [76]. Зважаючи на специфіку тонкоструйного плазмового різання як аналога лазерної обробки по забезпеченню високої точності і якості різа, передбачається доцільним її використання як технологічного методу обробки шаруватих композицій, виконаних з різного роду листових металевих матеріалів.

Аналіз можливих технологій термічного різання металевих матеріалів – кисневою, тонкоструйною плазмовою і лазерною показує, що кожна з них володіє певними перевагами і недоліками з позицій точності, якості різа і продуктивності процесу. В цілому можна погодитися з порівняльною оцінкою даних технологій, запропонованою одним з провідних виробників устаткування для термічного різання фірмою HYPERTHERM (США). Порівняння представлено по оцінках якості різання, продуктивності, експлуатаційних витрат і технічного обслуговування компонентів устаткування (таблиця 1.12) [77].

Таблиця 1.12 – Порівняльна оцінка технологій термічного різання

	Кисневе різання	Тонкоструйне плазмове різання	Лазерне різання
Якість різання	<ul style="list-style-type: none"> • Хороша кутастість • Велика зона термічного впливу • Кількість окалини вимагає обробки • Не ефективна для неіржавіючої сталі і алюмінію 	<ul style="list-style-type: none"> • Відмінна кутастість • Маленька зона термічного впливу • Практично без утворення окалини • Різка дрібних деталей з якістю від хорошого до відмінного 	<ul style="list-style-type: none"> • Відмінна кутастість • Маленька зона термічного впливу • Практично без утворення окалини • Різка дрібних деталей з якістю від хорошого до відмінного при найвужчому розрізі

Продовження таблиці 1.12

Продуктивність	<ul style="list-style-type: none"> • Низькі швидкості різання • Час попереднього нагріву збільшує час пропалення 	<ul style="list-style-type: none"> • Дуже високі швидкості різання для будь-якої товщини матеріалу • Дуже короткий час пропалення • Різаки з можливістю швидкого відключення забезпечують максимальну продуктивність 	<ul style="list-style-type: none"> • Дуже швидко для тонких матеріалів (тонше 6 мм); повільніше для товстих матеріалів • Довгий час пропалення для товстих матеріалів
Експлуатаційні витрати	<ul style="list-style-type: none"> • Низька продуктивність і необхідність у вторинній обробці підвищують витрати на одиницю продукції, роблячи їх вище, ніж в плазмового різання 	<ul style="list-style-type: none"> • Тривалий термін служби витратних матеріалів і відмінну якість різання знижують витрати на одиницю продукції, роблячи їх нижче, ніж при використанні інших технологій 	<ul style="list-style-type: none"> • Високі витрати на одиницю продукції у зв'язку з високими енерговитратами вжитком газів, високими витратами на технічне обслуговування і відносно низькими швидкостями різання при обробці товстих матеріалів
Технічне обслуговування	<ul style="list-style-type: none"> • Прості вимоги до технічного обслуговування частенько дозволяють виконувати обслуговування силами власних фахівців 	<ul style="list-style-type: none"> • Помірні вимоги до технічного обслуговування: обслуговування багато компонентів можна виконувати силами власних фахівців 	<ul style="list-style-type: none"> • Складні завдання по технічному обслуговуванню, для виконання яких потрібні спеціалізовані технічні фахівці

На підставі досвіду експлуатації даних технологій можна виділити сфери їх раціонального застосування з позицій оброблюваного матеріалу, його товщини і масштабу промислового виробництва. Схемне порівняння конкуруючих технологій представлено на рис. 1.11.

Дані порівняльні оцінки застосовні лише для різання мономатеріалів, але не прийнятні для пошуку рішень в обробці шаруватих композицій, виконаних з різнорідних металів і сплавів.

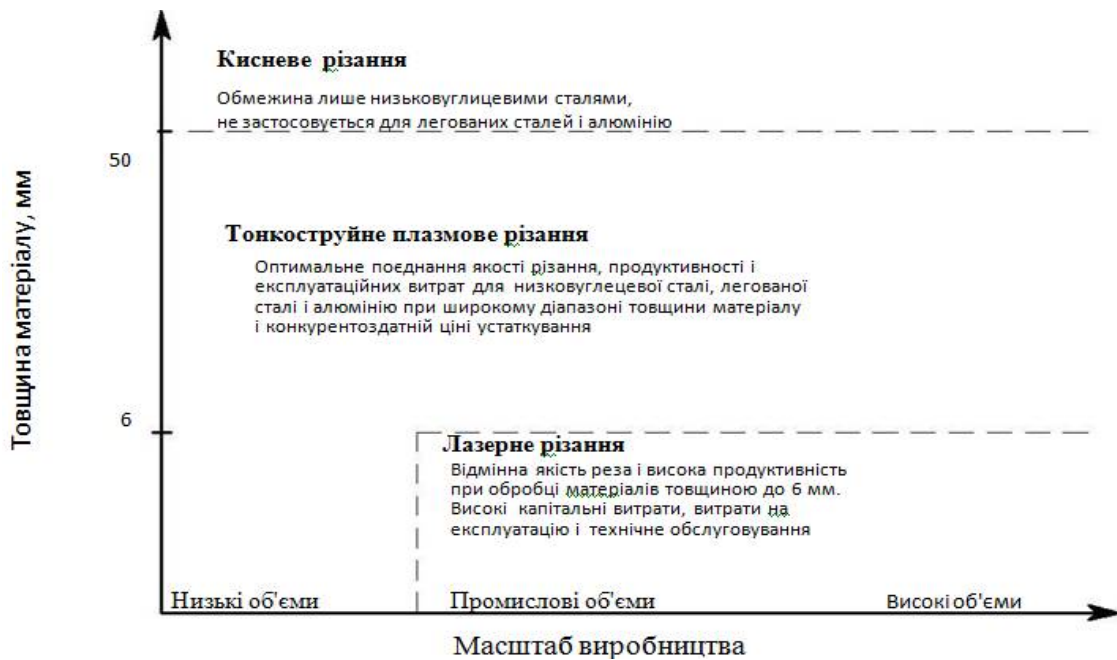


Рисунок 1.11 – Порівняння технологій термічного різання матеріалів

1.5 Мета та задачі дослідження

Мета магістерської роботи – удосконалення технології тонкоструйного плазмового різання біметалевих композицій, виконаних з різнорідних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

1. Вибір методу здобуття шаруватих матеріалів і аналіз існуючих технологій різання.
2. Призначення технологічних схем і оптимізація режимних параметрів тонкоструйного плазмового різання модельних матеріалів, складових досліджуваних біметалічних композицій з оцінкою точності і якості різання.
3. Проведення експериментальних досліджень розкрою біметалічних композицій для вибору раціональних технологічних схем тонкоструйного плазмового різання з оптимізацією режимних параметрів по критеріях точності і якості різання.
4. Вивчення процесів, що протікають в каналі різання для різних схем плазмового розкрою досліджуваних зварних біметалічних композицій, виконаних на основі структурних досліджень.

2 МАТЕРІАЛИ, УСТАТКУВАННЯ І МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Даний розділ роботи відповідно до сформульованої мети і поставлених для її досягнення завдань присвячений вибору початкових матеріалів для створення біметалічних композицій зварюванням вибухом, а також методик і аналітичного і технологічного устаткування для проведення експериментальних досліджень.

2.1 Початкові матеріали для отримання біметалічних композицій

У даних дослідженнях в якості початкових металевих матеріалів для отримання біметалічних з'єднань зварюванням вибухом були вибрані мідь, алюміній, нержавіюча сталь. Основою для плакування відміченими вище матеріалами служила низьковуглецева сталь Ст3, що пояснюється широким її поширенням як дешевого конструкційного матеріалу. Створення ж на основі сталі плакувального шару з певного матеріалу спрямоване на забезпечення необхідних властивостей для конкретних умов експлуатації виробу. Цим пояснюється вибір нержавіючої сталі в якості плакуючого матеріалу у біметалічній композиції для використання у виробках, призначених для експлуатації в умовах корозії.

Вибір міді в якості плакуючого елемента у біметалічному з'єднанні, дозволяє створити матеріал, що має хороші антифрикційні властивості з одного боку, і що забезпечує достатню конструктивну міцність виробу з іншою. Вибір зварювання вибухом як технологічного методу отримання композиції "Сталь+Мідь" пояснюється тим, що в звичайних умовах ці метали не утворюють хімічної сполуки, оскільки мають обмежену розчинність в твердому стані, погано змочуються, а температури їх кристалізації істотно розрізняються. Біметалічні композиції "Сталь+Алюміній" мають хороші перспективи як легкий конструкційний матеріал, що має необхідну конструктивну міцність.

В цілому біметалічні композиції з матеріалів, що мають значну різницю

в механічних, фізичних та ін. властивостях, можна розглядати як клас нових конструкційних матеріалів, що мають комплекс особливих властивостей.

Як зазначено вище, як основа біметалічних з'єднань використовувався листовий прокат вуглецевої сталі звичайної якості марки СтЗсп ГОСТ 380-2005, завтовшки 3 мм Хімічний склад сталі, механічні властивості і теплофізичні характеристики представлені в таблицях 2.1 - 2.3 [78]

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі СтЗсп

	Масова доля хімічних елементів, %										
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Ti
Основні елементи згідно ГОСТ 380-2005	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30	Не регламентовано							
Фактично	0,1505	0,4892	0,2379	0,0064	0,0102	0,0940	0,0694	0,1850	0,0068	0,0005	0,0013

	Al	Nb	W	As	Sn	Co	Pb	B	Sb	Ta
Основні елементи згідно ГОСТ 380-2005	Не регламентовано									
Фактично	0,0376	0,0017	0,0007	0,0060	0,0177	0,0105	-	-	0,0014	0,0034

	Zr	Bi	Ca	Mg	Zn	Ce	La	N	Te	Fe
Основні елементи згідно ГОСТ 380-2005	Не регламентовано									
Фактично	-	0,0059	0,0010	0,0002	0,0048	0,0015	0,0030	0,0146	-	98,6423

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сталі СтЗсп

Стан матеріалу	Товщина листа, мм	Тимчасовий опір, δ_B , МПа	Відносне видовження, δ_5 , %
Лист горячекатаний	2-3,9	360-460	22

Таблиця 2.3 – Теплофізичні властивості сталі СтЗсп

Щільність, г/см ³	Теплоємність, кал/г·град	Теплопровідність, ккал/м·год·град			Температура плавлення, °С	Питома теплота плавлення, кДж/кг
		20°С	200°С	500°С		
7,80	0,1077	63	53	37	1539	277

В якості антикорозійного плакуючого матеріалу для біметалу використовувався листовий прокат нержавіючої сталі аустенітного класу марки 12Х18Н10Т ГОСТ 5582-75 завтовшки 2 мм. В таблицях 2.4-2.6 представлений хімічний склад, механічні властивості і теплофізичні характеристики цього матеріалу [79].

В якості іншого плакуючого матеріалу служив алюміній марки А5М ГОСТ 21631-76 у вигляді листового прокату завтовшки 3 мм. Хімічний склад, механічні і теплофізичні властивості представлені в таблицях 2.7-2.9 [80].

Таблиця 2.4 – Хімічний склад сталі 12Х18Н10Т

	Масова доля хімічних елементів, %							
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
Основні елементи згідно ГОСТ 5582-75	не більше 0,12	не більше 0,8	не більше 2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	5-с-0,8	0,020	0,035
Фактично	0,0503	0,5450	1,2215	17,3036	9,1888	0,3207	0,0007	0,0242

	Cu	Mo	V	Al	Nb	W	As	Sn
Основні елементи згідно ГОСТ 5582-75	Не регламентовано							
Фактично	0,1465	0,0850	0,0452	0,08	0,0202	0,0188	0,0094	0,0069

	Co	Pb	B	Sb	Ta	Zr	Bi	Ca
Основні елементи згідно ГОСТ 5582-75	Не регламентовано							
Фактично	0,1880	0,0052	0,0005	0,014	-	0,0075	0,0270	0,0002

	Mg	Zn	Ce	La	N	Te	Fe
Основні елементи згідно ГОСТ 5582-75	Не регламентовано						
Фактично	0.0110	0.0248	0.0181	0.003 8	0.022 6	0.005 0	70.6065

Таблиця 2.5 – Механічні властивості Сталі 12X18Н10Т

Режим термічної обробки листів	Тимчасовий опір, δ_b , МПа	Межа пластичності, δ_T , МПа	Відносне видовження, δ_5 , %
	не менше		
Загартування 1050-1080° С, охолодження вода чи повітря	530	205	40

Таблиця 2.6 – Теплофізичні властивості сталі 12X18Н10Т

Шільність, г/см ³	Теплоємність, кал/г·град	Теплопровідність, ккал/м·год·град			Температура плавлення, ° С	Питома теплота плавлення, кДж/кг
		20° С	200° С	500° С		
7,80	0,1077	12-13	14-15	18	1460-1500	277

Таблиця 2.7 – Хімічний склад алюмінію А5М

	Масова доля хімічних елементів, %								
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	Ti
Основні елементи згідно ГОСТ 21631-76	не менше 99,50	0,25	0,30	0,02	0,05	0,03	0,06	0,03	0,02
Фактично	99,4863	0,0791	0,3312	0,0301	0,0033	0,0010	0,0107	0,0093	0,0057

	Cr	Ni	B	Be	Bi	Ca	Cd	Co
Основні елементи згідно ГОСТ 21631-76	Не регламентовано							
Фактично	0,0030	0,0046	0,0008	-	0,0036	0,0015	0,0023	0,0037

	P	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zr
Основні елементи згідно 21631-76	Не регламентовано						
Фактично	-	0,0020	0,0031	0,0008	-	0,0171	0,0009

Таблиця 2.8 – Механічні властивості листів алюмінію А5М

Стан матеріалу листів	Товщина листа, мм	Тимчасовий опір, δ_B , МПа	Межа текучості, δ_T , МПа	Відносне подовження, δ_5 , %
		не менше		
Відпалене	0,9-10,5	60	-	30

Таблиця 2.9 – Теплофізичні властивості алюмінію А5М

Щільність, г/см ³	Теплоємність, кал/г·град	Теплопровідність, ккал/м·год·град	Температура плавлення, °С	Питома теплота плавлення, кДж/кг
2,70	0,2129	197	660	390

Для створення ще однієї біметалічної композиції як плакуючий матеріал був використаний листовий прокат міді марки М1 ГОСТ 495-92 завтовшки 2 мм. У таблицях 2.10-2.12 відображують хімічний склад, механічні властивості і теплофізичні характеристики даного матеріалу [81].

Таблиця 2.10 – Хімічний склад міді М1

	Cu+Ag , %	Домішки, %							
		Pb	Fe	Sn	Si	Sb	As	Mn	Ni
Згідно ДСТУ 27.4- 00195452- 015-2003	99,90	Інші елементи (виключаючи Ag, Ni, O ₂) всього 0,05%							
Фактично	99,97	0,0024	0,0015	0,0042	Сл.	0,0012	0,0001	-	0,0109

	Домішки %										
	Bi	P	Zn	S	Ag	Cd	U ₂	Co	Cr	Se	
Згідно ДСТУ 27.4- 00195452- 015-2003							0,100				
Фактично	0,0004	0,0020	0,0023	0,0005	-	Сл.	0,0042	-	-	-	

Таблиця 2.11 – Механічні властивості листів міді М1

	Тимчасовий опір, δ_B , МПа	Відносне подовження, δ , %, не менше
Згідно ГОСТ 495-92	200-260	36
Фактично	213-215	45-47

Таблиця 2.12 – Теплофізичні властивості міді М1

Щіль- ність, г/см ³	Теплоємність, кал/г·град	Теплопровідність, ккал/м·год·град			Темпера- тура плав- лення, °С	Питома теплота плавлення, кДж/кг
		20°С	200°С	500°С		
9,0	0,0913	330	321	309	1083	213

2.2 Технологічне устаткування для тонкоструйного плазмового різання

Розкрій листових матеріалів здійснювався на технологічному комплексі тонкоструйного плазмового різання, що складається з наступних основних блоків: система ЧПУ BURNY PHANTOM ST (1), координатний стіл з порталом (2), плазмотрон Percut 160 (3), джерело струму Ні – Focus 130і з газовою консоллю (4), газобалонне устаткування (5) (рис. 2.1).

Система ЧПУ забезпечує переміщення плазмотрона по заданій траєкторії, а розкрій здійснюється за програмою обробки одиначної деталі або за програмою розкладки деталей в межах аркуша з врахуванням

інформації про налаштування процесу для забезпечення необхідної точності формоутворення [65, 66].

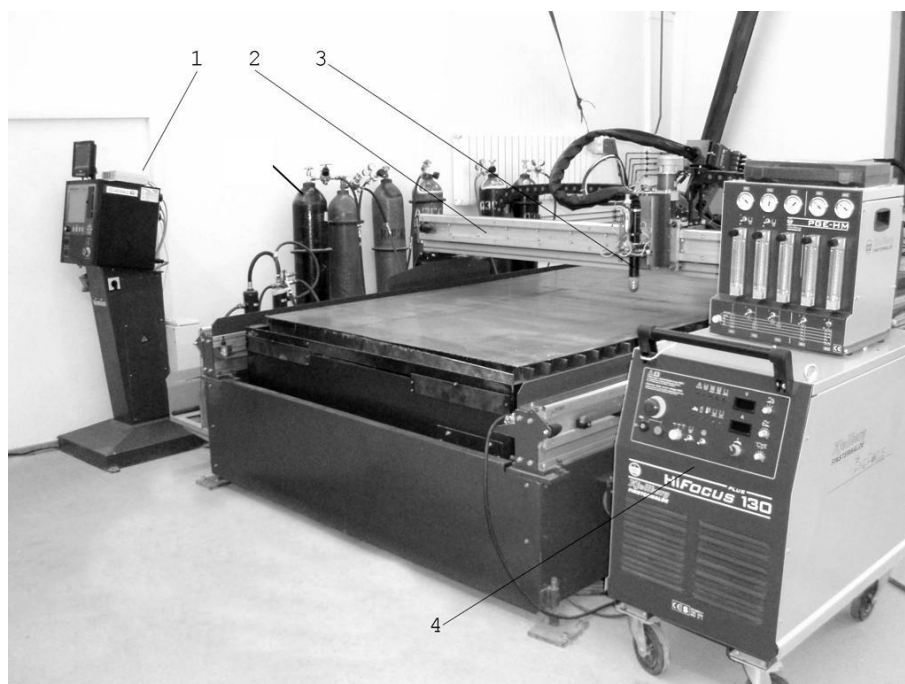


Рисунок 2.1 – Технологічний комплекс тонкоструйного плазмового різання

Джерело технологічного струму Ні – Focus 130i забезпечує необхідні енергетичні параметри процесу, а вбудована газова консоль – витрати плазмовиникаючого і завихрюючого газів [75].

2.3 Методи експериментальних досліджень

2.3.1 Хімічний аналіз матеріалів

Визначення хімічного складу використовуваних в роботі матеріалів – вуглецевої сталі марки Ст3, неіржавіючої сталі марки 12X18H10T, алюмінію марки А5М, проводилося на оптико-емісійному спектрометрі моделі ARL 3460 з точністю визначення концентрації легуючих елементів не нижче 0,001%. Результати вимірів для вказаних матеріалів представлені в таблицях 2.1, 2.4, 2.7. Хімічний склад міді марки М1 відповідно до сертифікату – свідоцтва про приймання № EN 10204-3.1 приведений в таблицях 2.10 - 2.12.

2.3.2 Методи структурних досліджень

Для вивчення структурно-фазового стану матеріалів в роботі застосовувалася оптична і растрова електронна мікроскопія.

2.3.2.1 Оптична мікроскопія

Металографічні дослідження проводили на мікроскопі моделі Axio Observer A1m з використанням методів світлого і темного поля у всьому діапазоні збільшень від 25x до 1500x. Зйомка зображень з мікроскопа здійснювалася камерою моделі AxioCam Mrc5. Підготовка зразків для металографічних досліджень проводилася з використанням преса Buchler Simplimet 1000 відповідно до рекомендованих методик. Шліфування і полірування зразків здійснювалося на установці Struers Laborol-5, починаючи з операцій шліфування на абразивних кругах зернистістю 110, 22 мкм з подальшим переходом на тонке шліфування і послідовне полірування з діамантовою суспензією розміром від 9 мкм до 1 мкм. Те, що труїть зразків для виявлення структурного стану матеріалу вироблялося 3% розчином H₂O₂ в етиловому спирті і слабким розчином хлорного заліза.

2.3.2.3 Рентгенофазовий аналіз

Аналіз хімічних процесів, що протікають в каналі різа при тонкоструйному плазмовому різанні, проводився методом рентгенівської дифракто-метрії. Дифракційні картини зразків реєструвалися на $\theta - \theta$ дифрактометрі мод. ARL X'TRA з використанням мідної рентгенівської трубки як джерело рентгенівського випромінювання. Немонохроматизоване випромінювання реєструвалося енергодисперсійним детектором Si (Li), налаштованим на реєстрацію Cu K α_1/α_2 довжин хвиль. Пучок падаючих на зразок променів мав прямокутний поперечний перетин, розміри якого, а також кут розходимості пучка змінювалися за допомогою ряду щілин і коліматора

Соллера. Розміри опромінюваної області на зразку складали $\sim 15 \times 5$ мм. Рентгенограми реєстрували в режимі часу ($t = 5$ з) з кроком $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$.

2.3.3 Методи дослідження топографії поверхні різа

Геометричний стан поверхні після будь-якої обробки є одним з критеріїв оцінки якості обробки в цілому. Для вивчення геометричного стану поверхні необхідна оцінка як її мікрогеометрії, так і макрогеометричних спотворень. Вивчення профілів поверхні по перетинах вироблялося на профілографі - профілометрі моделі 252 з цифровою індикацією результатів вимірів. Оцінка висотних і крокових характеристик геометрії поверхні можлива при використанні наступних параметрів у відповідних діапазонах:

- R_a (от 0,02 до 100 мкм);
- H_{\max} , H_{\min} (от 0,1 до 100 мкм);
- t_p (90-100%); при відповідних горизонтальному (від 0,5 до 2000) і вертикальному (від 10 до 50000) збільшеннях.

2.3.4 Оцінка точності різа

Оцінка точності різа проводилася на поперечних шліфах зразків після розкрою і полягала у визначенні кутів нахилу кромки різа відповідно до методики, що рекомендувалася, по ISO 9013: 2002 [82] (рис. 2.2).

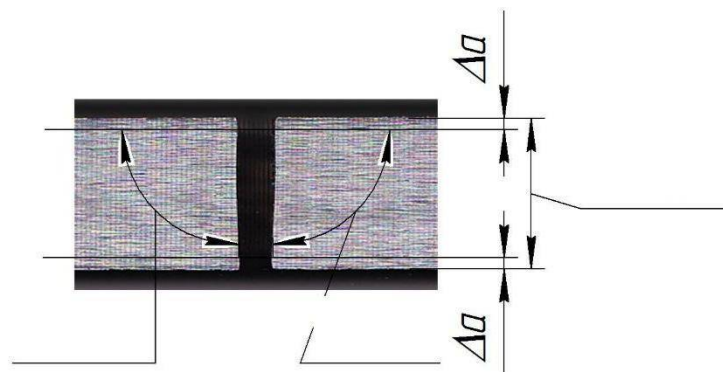


Рисунок 2.2 – Схема визначення відхилення кромки різа від перпендикулярності відповідно до методики по ISO 9013: 2002

Кутове відхилення кромки різа від перпендикулярності (δ_1, δ_2) оцінювалося на базовій довжині, значення якої визначалося як $(S - 2\Delta a)$, де S – товщина різа;

Δa – залежить від товщини різа і визначається по таблиці 2.13.

В справжній роботі для оцінки точності різа використаний параметр $\alpha = \delta - 90^\circ$. Якісна оцінка стану поверхні різа і кількості грата на нижній кромці здійснювалася на мікроскопі МБС-10.

Якісна оцінка стану поверхні різа і кількості грата на нижній кромці здійснювалася на мікроскопі МБС-10.

Таблиця 2.3 – Залежність величини Δa від товщини різа

Товщина різа, мм	Δa , мм
$S \leq 3$	0,1
$3 < S \leq 6$	0,3
$6 < S \leq 10$	0,6
$10 < S \leq 20$	1,0
$20 < S \leq 40$	1,5

2.3.5 Вимір мікротвердості поверхневого шару в зоні різа

Вивчення полягання матеріалу в зоні термічного впливу при тонкоструйному плазмовому різанні проводилося по розподілу мікротвердості, як характеристики, що відображає комплекс механічних властивостей і структурно-фазовий стан матеріалу. Вимір мікротвердості виконувався на мікротвердомірі ПМТ – 3М відповідно до ГОСТ 4950 – 76 [83], що регламентує методи виміру мікротвердості виробів з чорних і кольорових металів, сплавів, мінералів, стекол, пластмас і так далі втискуванням діамантових наконечників. Вимір мікротвердості виконувався при навантаженнях 50, 100 г.

3 ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ І ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТОНКОСТРУЙНОГО ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ МОДЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Аналіз сучасних технологій різання металевих матеріалів, представлений в 1 розділі роботи, дозволив виявити певні обмеження в їх використанні для реалізації поставленої мети по пошуку технологічних рішень в обробці біметалічних композицій, що складаються з різнорідних матеріалів. Так кисневе різання виявляється неприйнятним з причини обмеження в номенклатурі оброблюваних матеріалів, представлених лише класом низковуглецевих сталей. Це обмеження зв'язане, перш за все, з фізикою процесу обробки в умовах кисневого різання. Також має місце обмеження, пов'язане з діапазоном товщини матеріалу, що розрізає, що рекомендується.

Лазерне різання із специфіки взаємодії світлового випромінювання з речовиною також має обмеження в обробці певних класів матеріалів, особливо, якщо ці матеріали знаходяться усередині шаруватих композицій, і відомі технічні і технологічні рішення не застосовні. Для даної технології також існують обмеження, пов'язані з товщиною оброблюваного матеріалу, але вже з боку великих значень.

В зв'язку з цим представляється перспективним дослідження технологічних схем тонкоструйного плазмового різання, що наближається по точності і якості до лазерної обробки, але що має переваги по продуктивності і собівартості процесу [72, 77]. Інший механізм передачі енергії від плазмового стовпа до оброблюваного матеріалу (в порівнянні з лазерним випромінюванням) дозволяє розраховувати на досягнення позитивних результатів в обробці шаруватих композицій різнорідних матеріалів. Основне завдання при цьому полягає в пошуку раціональних технологічних схем, оптимізації режимних параметрів, виборі лобової сторони розкрою біметалічних композицій.

Оскільки тонкоструйне плазмове різання є термічним способом розділення матеріалів, то очевидно, що основним параметром, що визначає процес обробки, є щільність потужності плазмової дуги. Остання залежить від струму дуги і діаметру стовпа. Для реалізації процесу розкрою певної товщини конкретного матеріалу необхідне призначення швидкості переміщення теплового джерела відносно виробу нижче критичною, забезпечувати крізьний проріз матеріалу [84]. Виходячи з даних міркувань розробником технологій тонкоструйного плазмового різання (фірма Kjellberg, Німеччина) запропонований ряд технологічних схем (Ні – Focus, Ні – Focusplus, Ні – FOCUSF) для різної товщини різа. Клас оброблюваного матеріалу в межах вказаних технологічних схем визначає вибір плазмовиникаючого (ріжучого) і завихряючих газів і призначення їх параметрів (витрата і тиск), що обумовлює характер газів і гідродинамічних процесів в зоні різа [75].

Оптимізація швидкості, як технологічного параметра, направлена на забезпечення таких критеріїв обробки як відсутність грата на нижній кромці різа, досягнення його перпендикулярності, мінімізація оплавлення на верхніх кромках.

3.1 Технологічні можливості плазмового розкрою модельних матеріалів

3.1.1 Конструкційні вуглецеві сталі

Зважаючи на вибір для дослідження певних марок металевих матеріалів, представимо узагальнені залежності швидкостей обробки від товщини різа для відмічених вище технологічних схем тонкоструйного плазмового різання.

На рисунку 3.1 показана залежність швидкості обробки від товщини різа конструкційних сталей для технології Ні – Focus [85].

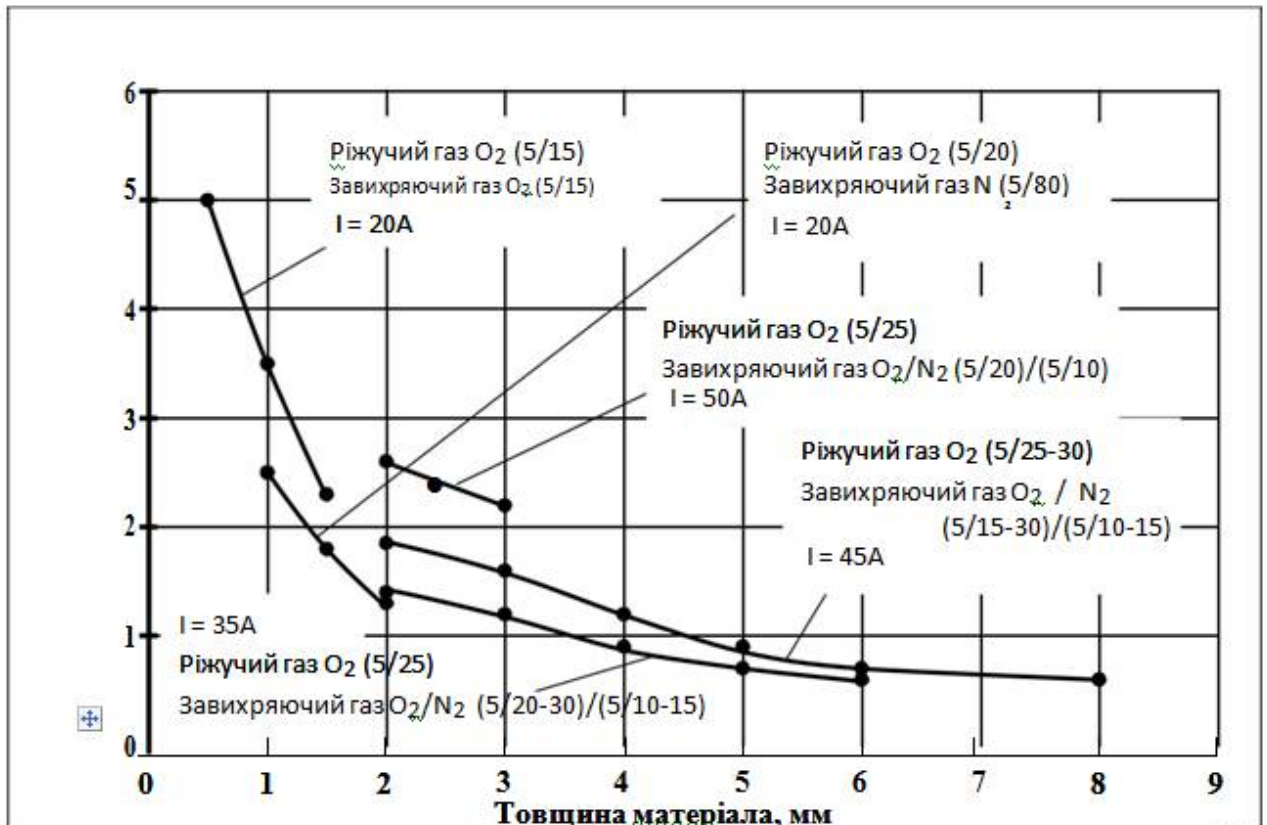


Рисунок 3.1 – Технологічні параметри розкрою конструкційних сталей для технологічної схеми Ні – Focus

Дана технологія обмежена діапазоном товщини різання від 0,5 до 8 мм при зміні струмових значень від 20 до 50 А. Діапазон рекомендованих швидкостей знаходиться в межах від 0,5 до 5 м-кодів/мін. За даною технологією при обробці конструкційних сталей як ріжучий газ використовується кисень з параметрами тиску 5 панів і витрати від 10 до 25 умовних ділень за шкалою приладу установки Ні – Focus 130i. Так, при мінімальному значенні струму $I = 20$ А, формування якісного різання в конструкційних вуглецевих сталях можливо в діапазонах товщини від 0,5 до 1,5 мм при відповідних швидкостях обробки. Реалізація даної технологічної схеми на великій товщині можлива при підвищенні струму дуги до 35–45 А, відповідному збільшенні витрати ріжучого газу і зниженні швидкості обробки. Окрім цього, при товщині різання понад 1,5 мм необхідна зміна завихряючого газу з кисню на азот, а при товщині, що перевищує 2 мм, – на кислородноазотну суміш.

Слід звернути увагу, що для зміни струму дуги як технологічного параметра необхідна установка відповідного сопла, що незмінно приведе до зміни ширини різа від 1,2 мм при $I = 20$ А до 2,3 мм при $I = 45$ А.

При необхідності обробки конструкційних сталей в розширеному діапазоні товщини різа (від 4 до 30 мм) рекомендується використовувати наступну технологічну схему - Ні – Focusplus (рис. 3.2) [85]. Дана схема характеризується розширеним діапазоном робочих струмів (від 50 до 130 А), забезпечуючи формування якісного різа на швидкостях від 0,5 до 2,7 м-кодів/мін. Як і в попередній схемі як ріжучий газ використовується кисень, але на підвищеному тиску (10 панів) при регульованих витратах від 20 до 60 умовних ділень шкали приладу. Як завихряючий газ застосовується азот (на струмах 50 А) і кислородоазотна суміш ($I = 100$ -130 А). Як і слід було чекати, перехід до максимальних струмів на значній товщині різа супроводжується збільшенням його ширини до 3,2 мм.

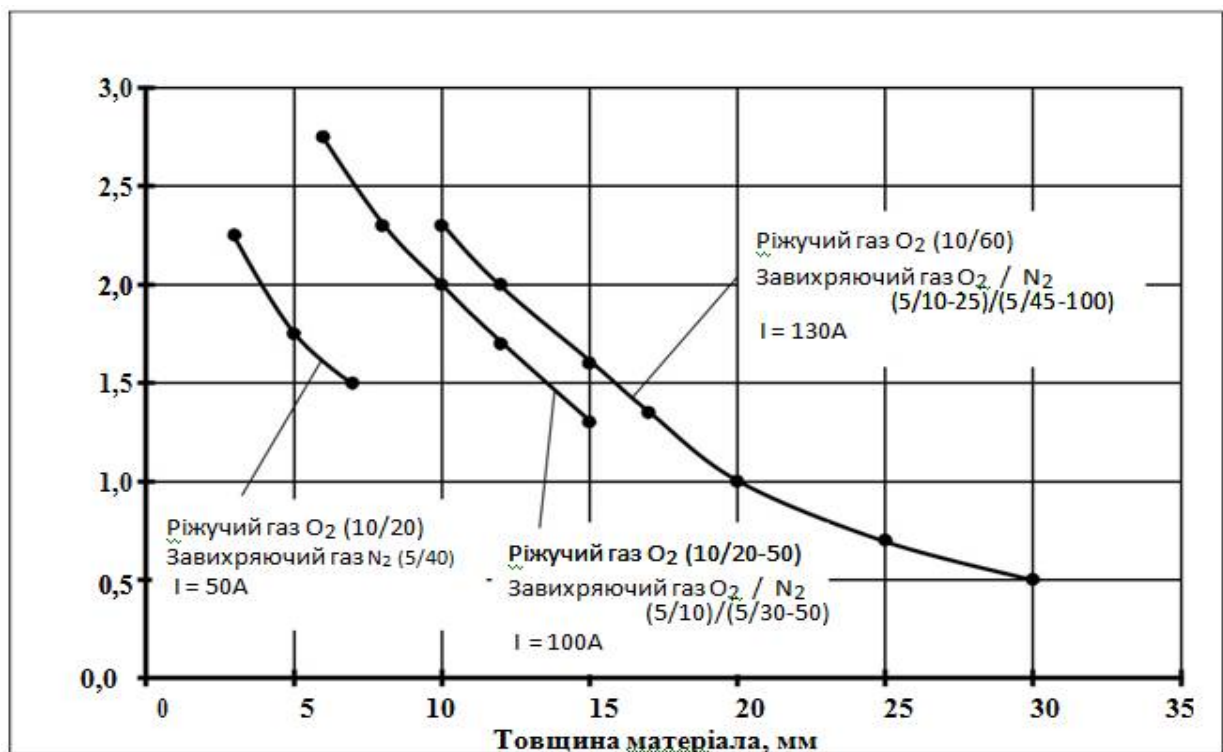


Рисунок 3.2 – Технологічні параметри розкрою конструкційних сталей для технологічної схеми Ні – Focusplus

Третя технологічна схема (Ні – FOCUSF) в обробці конструкційних

сталей також орієнтована на широкий діапазон товщини різа (6-25 мм) як і передуюча (Ні – Focusplus), але така, що відрізняється постійністю потужності дуги при максимально можливому струмі $I = 130$ А установки Ні – Focus 130i (рис. 3.3) [85].

По суті технологічна схема Ні – FOCUSF є аналогом схеми Ні – Focusplus, з єдиною відмінністю використання максимальних струмів на відносно малій товщині різа (6-10 мм).

Можливість обробки широкого діапазону товщини на одних технологічних режимах, з одного боку, є привабливою, оскільки не вимагає додаткової переналадки плазмотрона, а з іншого боку, експлуатація на максимальних струмах веде до прискореного зносу витратних елементів плазмотрона і зростанню енерговитрат.

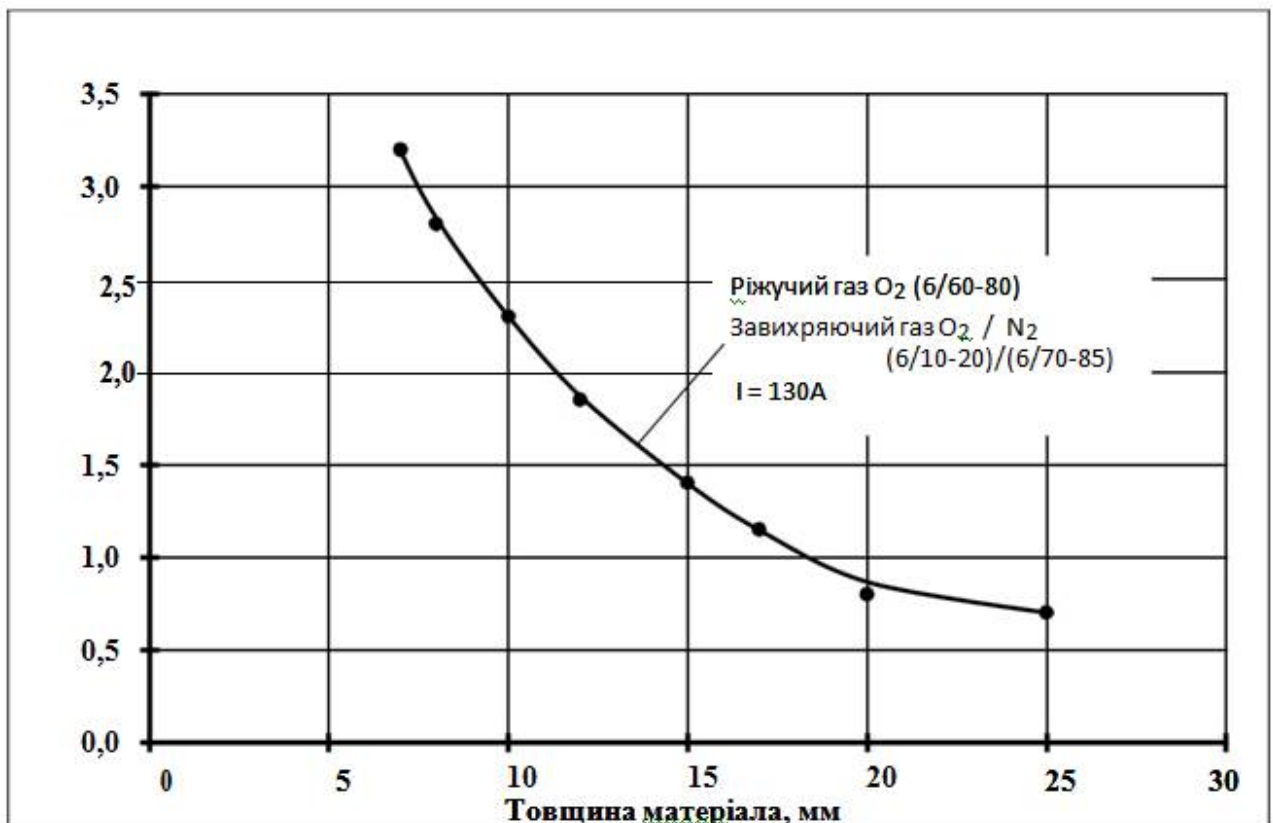


Рисунок 3.3 – Технологічні параметри розкрою конструкційних сталей для технологічної схеми Ні – FOCUSF

3.1.2 Леговані сталі

Легування залізовуглецевих сплавів різними хімічними елементами, направлене на створення в матеріалі сприятливих міцнестевих, корозійних, жароміцних і ін. властивостей, надає істотну скруту в механічній обробці традиційними методами, заснованими на процесах лезвійного і абразивного різання.

Зважаючи на специфіку термічного методу розділення металевих матеріалів, слід чекати, що характер зміни технологічних параметрів тонкостуйного плазмового різання в досліджуваному діапазоні товщини різа в легованих і конструкційних вуглецевих сталей буде аналогічний. На малюнку 3.4 представлені режимні параметри розкрою легованих сталей для технологічних схем Ні – Focus і Ні – FOCUSF [86].

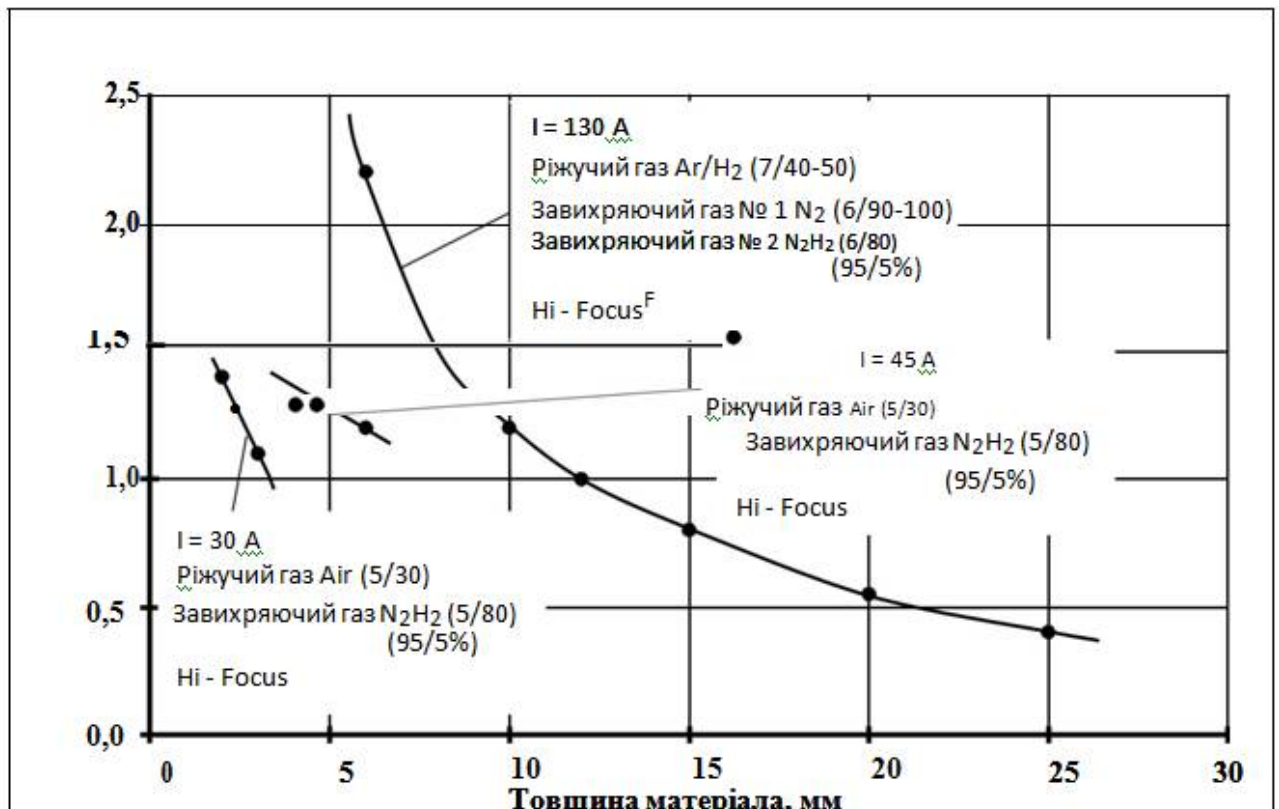


Рисунок 3.4 – Технологічні параметри розкрою легованих сталей для технологічних схем Ні – Focus, Ні – FOCUSF

Спільний аналіз результатів, представлених на рисунках 3.1, 3.3 і 3.4, підтвердив ідентичний характер залежностей у всьому діапазоні товщини різа. Відмінність виявляється в складах ріжучих і завихрюючих газів, що пояснюється різницею в хімічних складах порівнюваних матеріалів.

Слід зазначити, що при обробці вуглецевих конструкційних сталей швидкість обробки в середньому в 1,5 разу вище в порівнянні з обробкою легованих сталей у всьому діапазоні товщини різа.

3.1.3 Алюмінієві і мідні сплави

Різання алюмінієвих сплавів реалізується з використанням технологічних схем Ні – Focus для товщини матеріалу в інтервалі від 1 до 6 мм (рисунок 3.5) і Ні – FOCUSF – в інтервалі від 5 до 25 мм (рис. 3.6) [87].

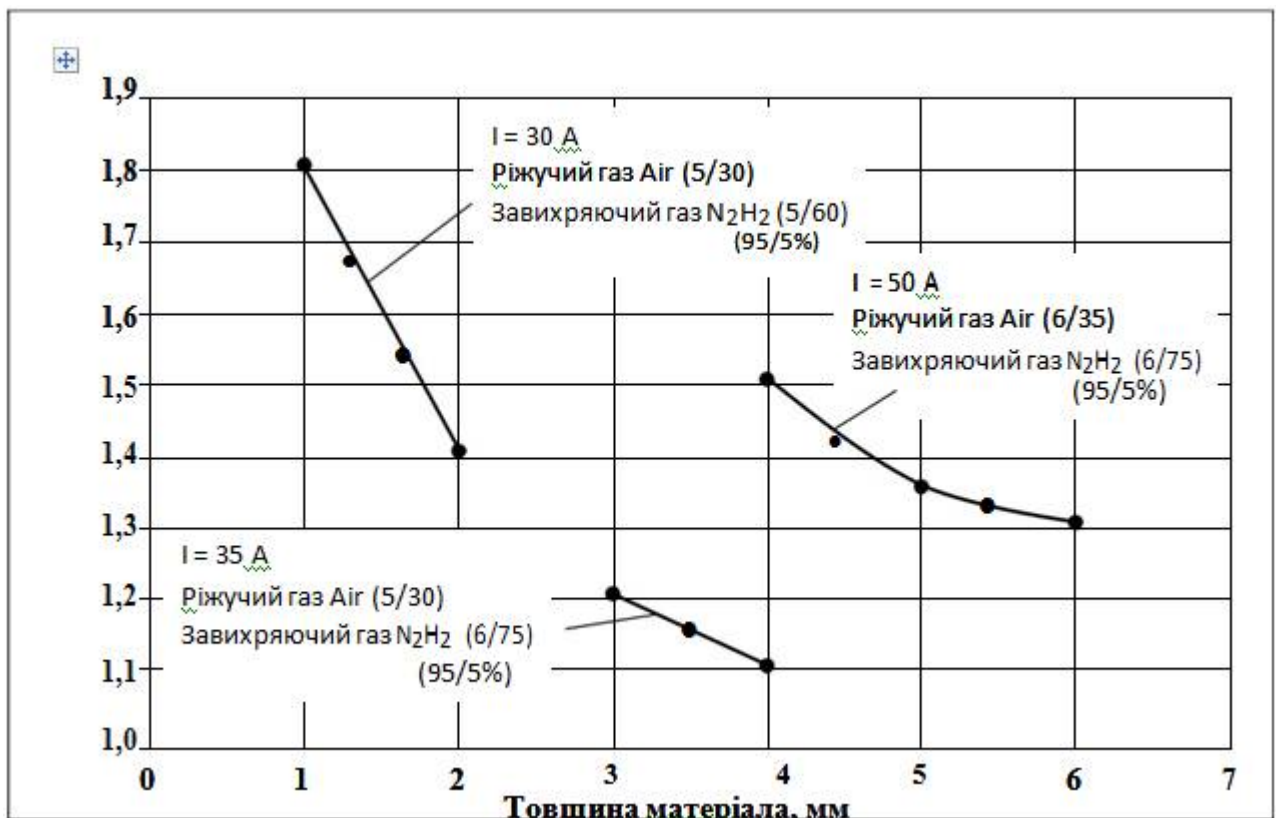


Рисунок 3.5 – Технологічні параметри розкрою алюмінієвих сплавів для технологічної схеми Ні – Focus

Для малої товщини як ріжучий газ використано повітря, а завихрюючого – азото-воднева суміш. Різання на струмах від 30 до 50 А реалізована на швидкостях від 1,3 м-кодів/мін для товщини різа 6 мм до 1,8 м/хв – для 1 мм. При цьому ширина різа змінювалася від 1,9 до 1,5 мм.

Перехід до технологічної схеми Ні – FOCUSF передбачає заміну робочого газу на водень, а завихрюючий газ є двокомпонентним, таким, що складається з азоту і азото-водневої суміші.

У цілому характер зміни швидкості обробки від товщини різа для обох технологічних схем аналогічний результатам обробки як вуглецевих конструкційних, так і легованих сталей.

Для тонкоструйного плазмового розкрою міді і мідних сплавів розробник устаткування рекомендує використовувати технологічні схеми і режимні параметри для обробки вуглецевих конструкційних сталей (рисунках 3.1, 3.3) [88].

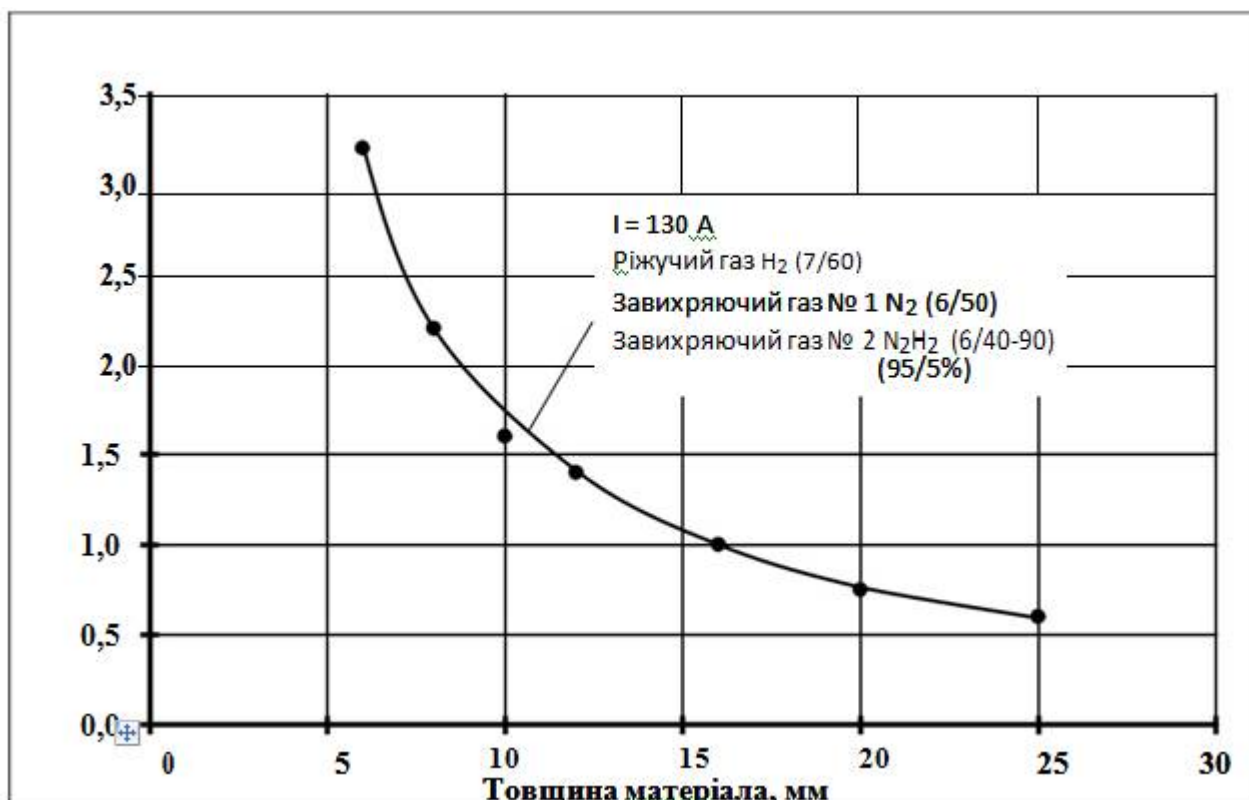


Рисунок 3.6 – Технологічні параметри розкрою алюмінієвих сплавів для технологічної схеми Ні – FOCUSF

Результати, представлені на рисунках 3.1 – 3.6, можуть розглядатися як режимні області для технологічних схем обробки досліджуваних класів матеріалів. Для виявлення режимів розкрою конкретної марки металу в певному стані постачання необхідне проведення експериментальних досліджень з оптимізацією обробки по відмічених вище критеріях якості різа.

3.2 Оптимізація режимів плазмового розкрою модельних матеріалів

У розділах 3.1.1 – 3.1.3 робіт були визначені технологічні можливості плазмового розкрою досліджуваних класів модельних матеріалів, які дозволяють оцінити область реалізації тієї або іншої технологічної схеми (Ні – Focus, Ні – Focusplus, Ні – FOCUSF) залежно від товщини передбачуваного різа.

Оптимізація режимів обробки в рамках конкретної технологічної схеми, яка може бути призначена на основі попереднього аналізу за даними малюнків 3.1 – 3.6, повинна вироблятися по критеріях точності і якості різа певної марки матеріалу і його товщини.

3.2.1 Низковуглецева сталь Ст3 і неіржавіюча сталь 12Х18Н10Т

Так для основного модельного матеріалу – вуглецевої сталі марки Ст3сп завтовшки 3 мм на підставі аналізу результатів малюнків 3.1 – 3.3 як основна технологічна схема тонкоструйного плазмового різання доцільно використовувати технологію Ні – Focus. З можливих варіантів обробки із струмами 35 А, 45 А і 50 А слід зупинитися на послідинім, як що володіє найбільшою потужністю плазмової дуги, а, отже, що допускає обробку на максимальних швидкостях (2,2 м/хв).

Приймаючи для обробки певну технологічну схему з відповідним значенням струмової характеристики, набором ріжучого і завихрюючого (завихрюючих) газів і їх параметрів, в ролі технологічного режиму для оптимізації якості різа конкретної марки матеріалу певної товщини і стану постачання може бути використана лише швидкість обробки. Як

оптимізаційні параметри якості різа відповідно до стандарту якості для термічних методів різання [49] були прийняті геометричні характеристики різа (відхилення від перпендикулярності), макро і мікрогеометрія поверхні різа (хвилястість і шорсткість) і характеристики структурнофазових перетворень в зоні різа (зона термічного впливу), а також наявність і розмір ґрата на нижній кромці різа.

За результатами попередніх експериментів був встановлений діапазон варіювання швидкістю обробки і складав 2,0 – 2,4 м /хв [89].

Спосіб оцінки геометричної точності різа через параметр відхилення від перпендикулярності представлений в розділі 2.2.3 справжньої роботи і відповідає методиці ISO 9013: 2002. Залежність даного параметра точності різа від швидкості обробки представлена на рисунку 3.7.

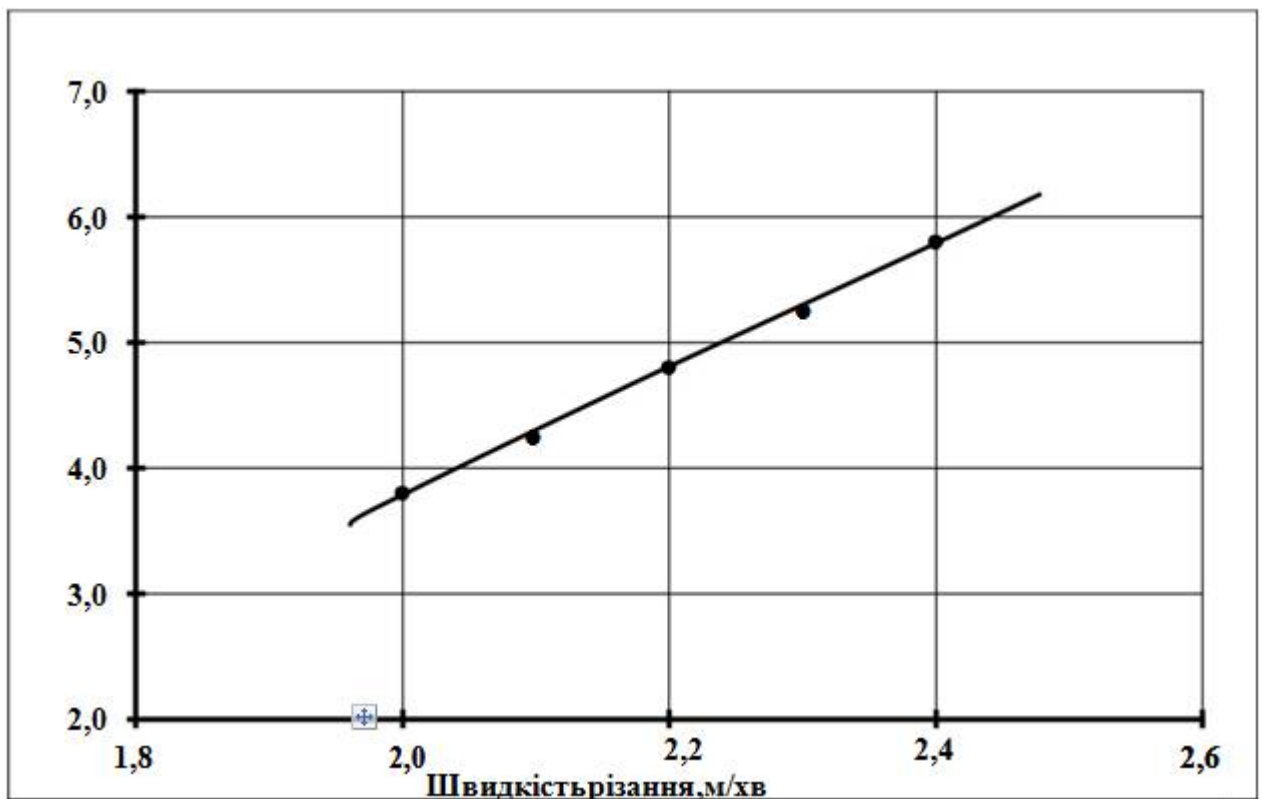


Рисунок 3.7 – Вплив швидкості різання сталі Ст3 на точність розрізу

Зниження точності різання із збільшенням швидкості обробки пояснюється тим, що розділення металу при великих швидкостях

супроводиться «тяжкими» умовами термічної дії із значним градієнтом температур по товщині різа.

Даний результат підтверджується дослідженнями робіт [59, 65], де показаний вплив швидкості обробки на геометричну точність різання.

Аналогічний характер має залежність шорсткості поверхні різа від швидкості обробки (рисунок 3.8).

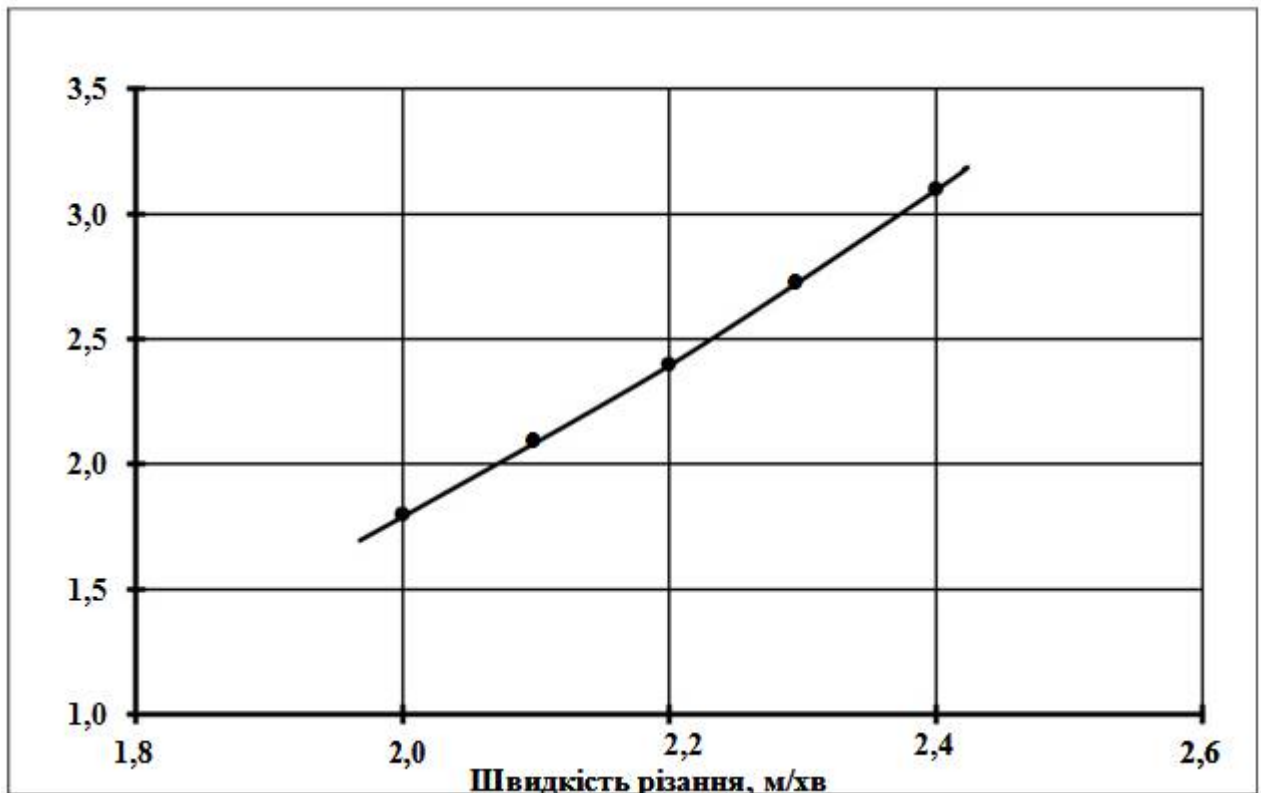


Рисунок 3.8 – Вплив швидкості різання сталі Ст3 на шорсткість поверхні різа

Зовнішній вигляд поверхні різа сталі Ст3 при різних швидкостях обробки показаний на рисунку 3.9. Якщо на швидкості $V = 2$ м/хв морфологія поверхні різа відносно однорідна, то із збільшенням швидкості до $V = 2,4$ м/хв на поверхні різа з'являється рельєф, характерний для термічних методів різання. Рельєфом є сукупність слідів від миттєвих положень потоків продуктів розплаву із зони різа. Збільшення швидкості обробки вносить

обмеження в розвиток газодинамічних потоків, що беруть участь у видаленні продуктів розплаву з поверхні різа.

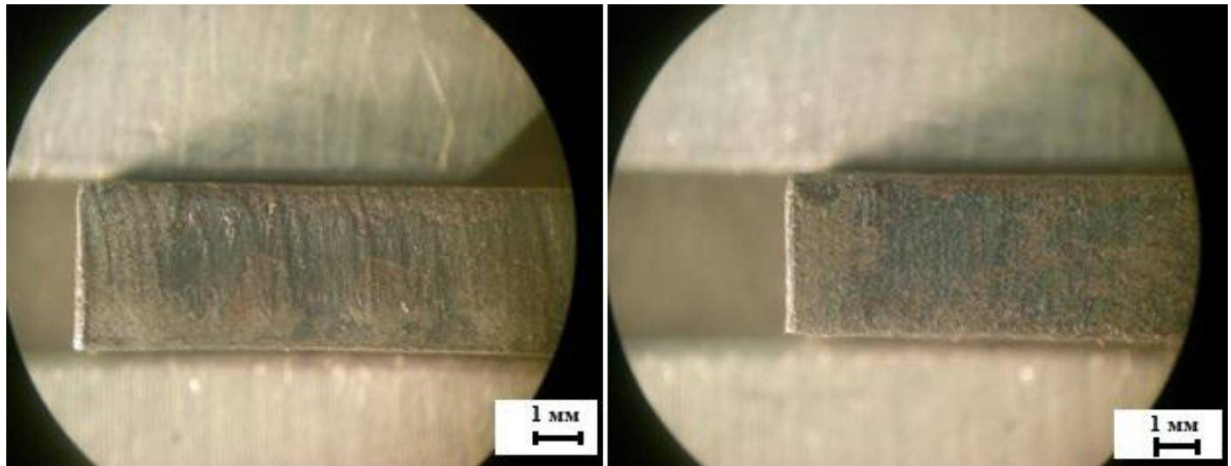


Рисунок 3.9 – Морфологія поверхні різа сталі Ст3: а- $V = 2$ м/хв; б - $V = 2,4$ м/хв.

Вивчення процесів гратвинекнення на нижній кромці різа показало на відсутність даного дефекту в істотній мірі. Величина грата трохи збільшується із зниженням швидкості обробки, що пояснюється «пом'якшенням» газодинамічних потоків в зоні різання. При цьому грат, що утворюються, легко відокремимо від кромки різа [90, 91].

Для оптимізації технологічних режимів розкрою листових матеріалів, виконаних з неіржавіючої сталі марки 12Х18Н10Т товщиною 2 мм в першу чергу необхідний підбір відповідної технологічної схеми, що визначає як струмові значення процесу, так і відповідні склади, і параметри ріжучого і завихрюючого або завихрюючих газів [92]. При постійності технологічної схеми призначення режимів обробки зводиться до встановлення взаємозв'язку параметрів якості різа із швидкістю обробки.

Виходячи з вищевикладеного, доцільним представляється вибір технологічної схеми Ні – Focus із струмовою характеристикою $I = 30$ А, ріжучим газом - Air (повітря), завихрюючим газом – азото-водневою

сумішшю з тиском і витратами, вказаними на рисунку 3.4. Діапазон зміни швидкостей в дослідженні складав $V = 0,9 - 1,3$ м/хв [86].



Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд поверхні різа неіржавіючої сталі 12X18H10T після тонкоструйного плазмового різання ($I = 30$ А, $V = 1,3$ м/хв)

Зовнішній вигляд поверхні різа неіржавіючої сталі 12X18H10T (рисунок 3.10) свідчить про наявність на ній різних ділянок. Так на тлі основної ділянки, утвореної слідами рухомої плазмової дуги, у верхньої кромки різа має місце ділянка з відмінною від основної морфологією. Утворення цієї ділянки можна пояснити низькою теплопровідністю досліджуваного матеріалу. Так після розплавлення металу в зоні різа і у міру його видалення потоками плазми, на верхній кромці різа, унаслідок збереження високих температур можливі хімічні реакції окислення металу, як атмосферним повітрям, так і неіонізованою частиною ріжучого газу з утворенням тугоплавких з'єднань типу Cr_2O_3 . Поява в розплаві подібного роду оксидів приведе до підвищення його в'язкості і скрути повного видалення із зони різа. Тому частина розплаву осідає у верхній частині різа. Підтвердженням даного пояснення служить результат зростання зони осадження продуктів розплаву на поверхні різа при зниженні енергетичних і гідродинамічних характеристик процесу, що виявляються при зменшенні струму різання і швидкості обробки (рис. 3.11) [86].



Рисунок 3.11 – Збільшення зони осадження розплаву на поверхні різання неіржавіючої сталі 12X18H10T при зменшенні струму і швидкості різання ($I = 26 \text{ A}$, $V = 0,9 \text{ м/хв}$)

Низька теплопровідність неіржавіючої сталі обумовлює високу чутливість якості різання до енергетичних параметрів плазмового розкрою. У зв'язку з цим, поряд зі встановленням взаємозв'язку якості різа із швидкістю обробки, необхідно оцінити і вплив струму різання. Оскільки максимальне значення струму визначається типорозміром сопла, то його зміна можлива лише в меншу сторону. Це обмеження і визначило діапазон варіювання параметром від $I = 26 \text{ A}$ до $I = 30 \text{ A}$.

Збільшення сили струму при тонкоструйному плазмовому різанні неіржавіючої сталі 12X18H10T призводить до зниження шорсткості поверхні і зменшення кількості грата на нижній кромці різа (рисунок 3.12, 3.13).

Збільшення значення струму веде до зниження ділянки осадження розплаву. Так при максимальному значенні струму ($I = 30 \text{ A}$) відмічена ділянка рельєфу на поверхні різа практично відсутня (рис. 3.13, в).

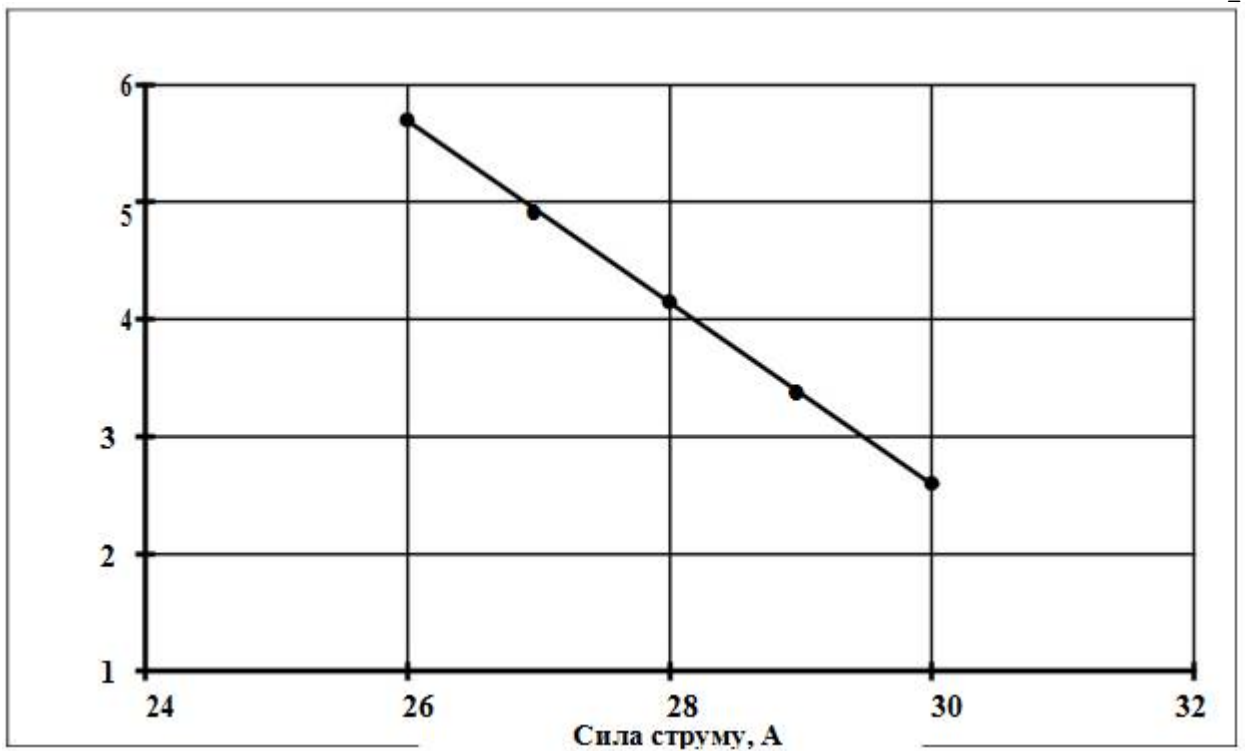


Рисунок 3.12 – Вплив сили струму на шорсткість поверхні різа сталі 12Х18Н10Т ($V = 1,1$ м /хв)

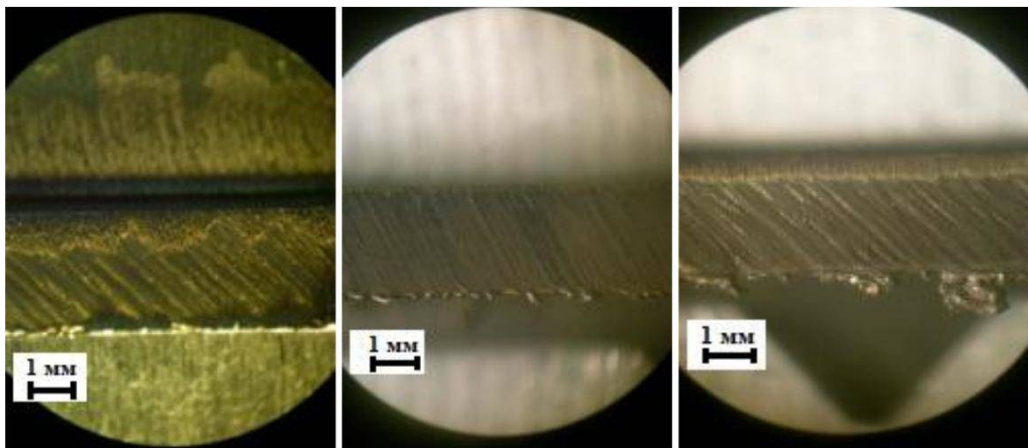


Рисунок 3.13 – Морфологія поверхні різа неіржавіючої сталі 12Х18Н10Т при зміні сили струму:

а - $I = 26$ А; б - $I = 28$ А; в - $I = 30$ А; $V = 1,1$ м/хв.

Як і при обробці конструкційних вуглецевих сталей, збільшення швидкості обробки неіржавіючої сталі веде до зростання шорсткості в досліджуваному діапазоні струмів різання (рисунок 3.14).

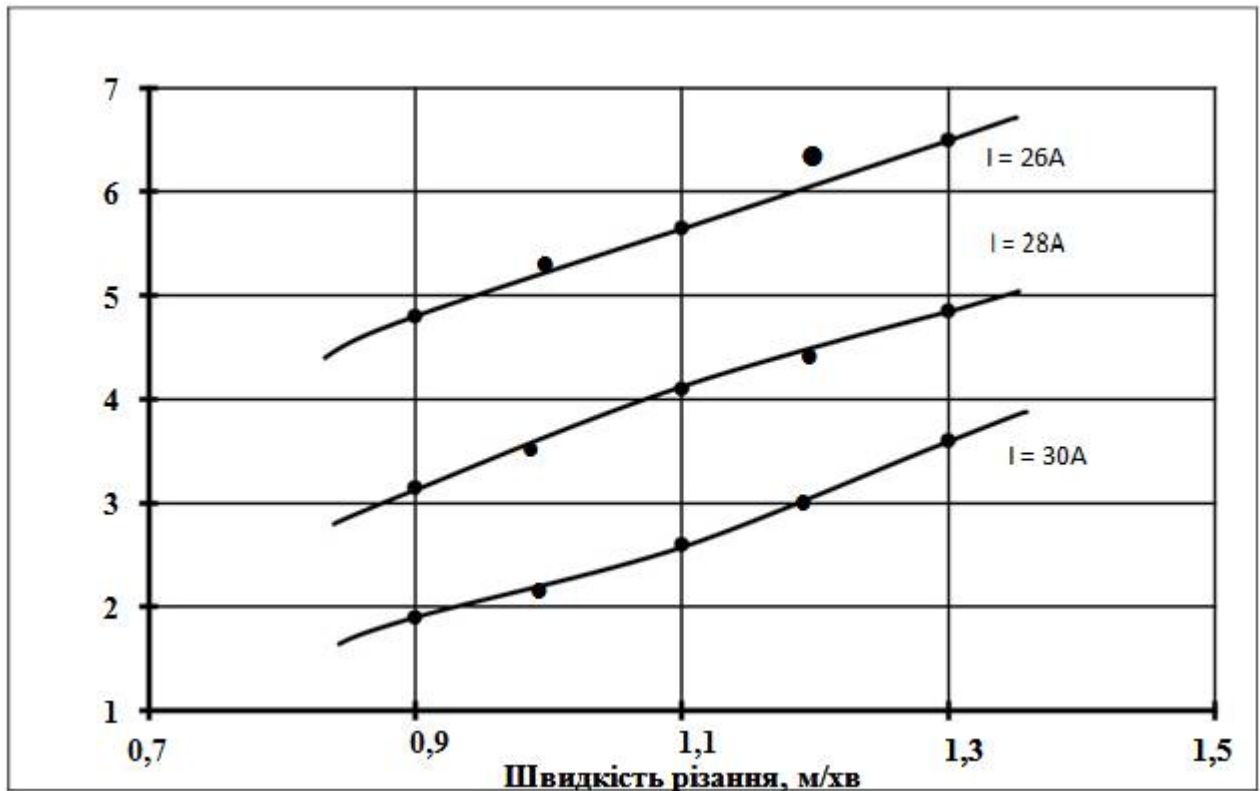


Рисунок 3.14 – Вплив швидкості обробки на шорсткість поверхні різання неіржавіючої сталі 12X18H10T

Вплив швидкості обробки на шорсткість поверхні різа має певне протиріччя. Не дивлячись на те, що зниження швидкості різання веде до появи і зростання ділянки осадження елементів розплаву на рельєфі поверхні різа, її шорсткість при цьому знижується. Цей факт можна пояснити тим, що морфологія поверхні різа без слідів розплаву має грубі ризики, які заповнюються розплавом, і шорсткість поверхні в цілому знижується [86].

Вивчення впливу зміни швидкості різання на геометричну точність різа неіржавіючої сталі показало на аналогічну поведінку залежності, відмічену для конструкційних сталей.

3.2.2 Алюміній А5М і мідь М1

Параметри технологічних схем для обробки алюмінієвих сплавів, представлені на рисунках 3.5 і 3.6, можуть розглядатися як узагальнені режимні області. Для встановлення оптимальних режимів розкрою сплаву

конкретної марки, зокрема, алюмінію А5М, в певному стані постачання (листовий прокат) необхідне проведення експериментальних досліджень з оптимізацією обробки по критеріях якості різання.

Зважаючи на товщину листового прокату (3 мм) алюмінію і слідуючи рекомендаціям вибору технологічних схем (рисунок 3.5) для експериментів по оптимізації якості різа найбільш відповідною виявляється схема Ні – Focus із струмовим режимом $I = 35$ А на швидкості розкрою, що рекомендується, 1,2 м-кодів/мін. При цьому як ріжучий газ використано повітря з тиском 5 панів і витратою 30 умовних одиниць шкали приладу, а завихряючого – азотно-воднева суміш в співвідношенні 95/5 % з тиском 6 бар і витратою 75 одиниць [87].

Як наголошувалося раніше, для оптимізації якості різа в рамках вибраної технологічної схеми найбільш прийнятним режимним параметром є швидкість обробки. На підставі попередніх експериментів був визначений діапазон її варіювання, який складав 1,0 – 1,4 м /хв.

Експериментальні дослідження по розкрою алюмінію марки А5М з використанням вибраної технологічної схеми показали на освіту грата на нижній кромці різа у всьому дослідженому діапазоні швидкостей (рисунок 3.15).

Утворення грата на кромці різа можна пояснити дією декількох чинників. По-перше, гратовиникнення при термічних методах розкрою багато в чому визначається ефективністю видалення газодинамічними потоками продуктів розплаву з каналу різа. В основному це залежить від раціонального поєднання таких параметрів плазмовиникаючого і завихряючого газів, як тиск і витрата. У других, ефективність виділення продуктів розплаву із зони різа багато в чому визначається його в'язкістю. Так, рух реальних розплавів супроводиться виникненням сил тертя між шарами рідини. Відомо, що відношення сил тертя до одиниці площі пропорційно градієнту швидкості переміщення шарів. Коефіцієнт

пропорційності є характеристикою конкретного розплаву в певних температурних умовах і називається коефіцієнтом динамічної в'язкості [93].

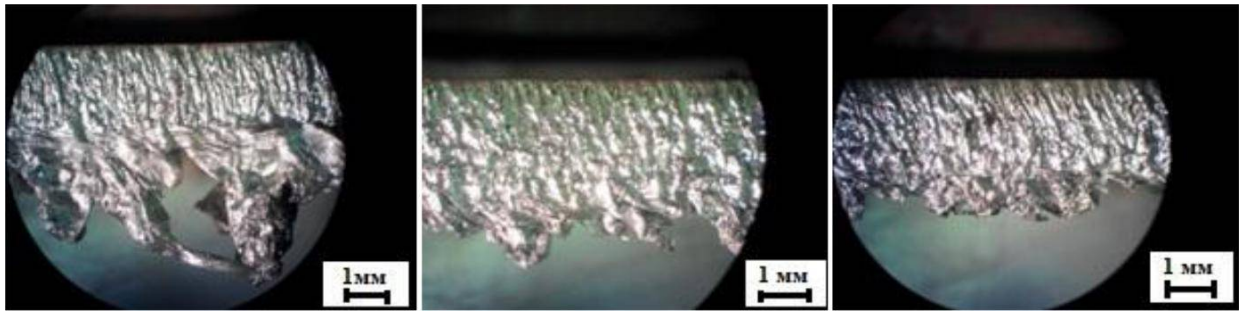


Рисунок 3.15 – Морфологія поверхні різа алюмінію А5М і формування грата на нижній кромці при обробці на швидкостях:

а– $V = 1,0$ м/хв; б - $V = 1,2$ м/хв; в - $V = 1,4$ м/хв.

Не дивлячись на те, що в інтервалі температур плавлення ($\sim 700^\circ \text{C}$) розплав алюмінію має менше значення коефіцієнта динамічної в'язкості (2,9 мПа·с) в порівнянні з останніми модельними матеріалами (4,5 – 6,0 мПа·с – для широкого діапазону сталей в інтервалі температур плавлення $1480 - 1680^\circ \text{C}$; 3,12 мПа·с – для міді при температурі 1200°C), характер перебігу розплаву по каналу різа визначатиметься значенням його кінематичної в'язкості. Остання визначається як відношення коефіцієнта динамічної в'язкості до щільності розплаву. Враховуючи, що алюміній зі всіх досліджуваних матеріалів володіє найменшою щільністю, значення кінематичної в'язкості виявляється максимальним ($1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ для алюмінію; $(0,64 - 0,85) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – для сталей; $0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – для міді) [93]. Ймовірно, цим можна пояснити різницю в параметрах плазмовинекаючих і завихряючих газів в аналогічних технологічних схемах (Ні – Focus) з однаковим струмовим режимом ($I = 35 \text{ A}$) для розкрою алюмінієвих сплавів (рисунок 3.5) і вуглецевих сталей (рисунок 3.1). Якщо параметри ріжучих газів по тиску і витраті (5 бар/30 умов. од. – для алюмінієвих сплавів 5 бар/25 умов.од. – для сталей) практично збігаються, параметри завихряючих газів відчутно відрізняються (6 бар/75 умов.од. – для алюмінієвих сплавів, 5 бар/30

- 45 умов.од. – для сталей). Збільшений тиск і підвищена витрата завихрюючого газу при розкрої алюмінієвих сплавів, ймовірно, і призначені для компенсації сил тертя, пов'язаних з підвищеною кінематичною в'язкістю розплаву алюмінію.

Третьою вірогідною причиною, і можливо, що визначає в підвищеному гратовиникненні при розкрої алюмінію є утворення тугоплавких оксидів алюмінію при взаємодії його розплаву з розчиненим киснем повітря, використовуваного в даній технологічній схемі як плазмовинекаючий газ. Наявність подібного роду оксидів в розплаві сприяє підвищенню його в'язкості і скруті в повному видаленні з каналу різа.

Наявність оксидів алюмінію в розплаві вимагає експериментального підтвердження, що буде представлено у відповідному розділі роботи.

Аналіз експериментальних результатів (рисунок 3.15) свідчить про збільшення кількості грата при зниженні швидкості обробки. Це можна пояснити деяким збільшенням об'єму рідкої фази за рахунок розширення каналу різа на малих швидкостях і відповідним ослабленням газодинамічних потоків.

Кількісне співвідношення геометрії параметрів різання алюмінію залежно від швидкості обробки показане на рисунку 3.16.

Зниження швидкості обробки приводить до розширення каналу як на вході, так і на виході плазмової дуги, при цьому кут нахилу різання міняється трохи (з $9,1^\circ$ до $9,3^\circ$).

Таким чином, найбільш прийнятні значення швидкості розкрою алюмінію марки А5М знаходяться в діапазоні 1,2 – 1,4 м /хв як з позицій зменшення кількості грата, так і формування мінімальної ширини різа. Подальше підвищення швидкості обробки недоцільне, оскільки на певному рівні станеться не проріз матеріалу [87].

Максимальне виключення грата при розкрої алюмінієвих сплавів слід чекати при заміні плазмовинекаючого газу в досліджуваній схемі з повітря на інертний газ, що дозволить виключити утворення оксидів в розплаві.

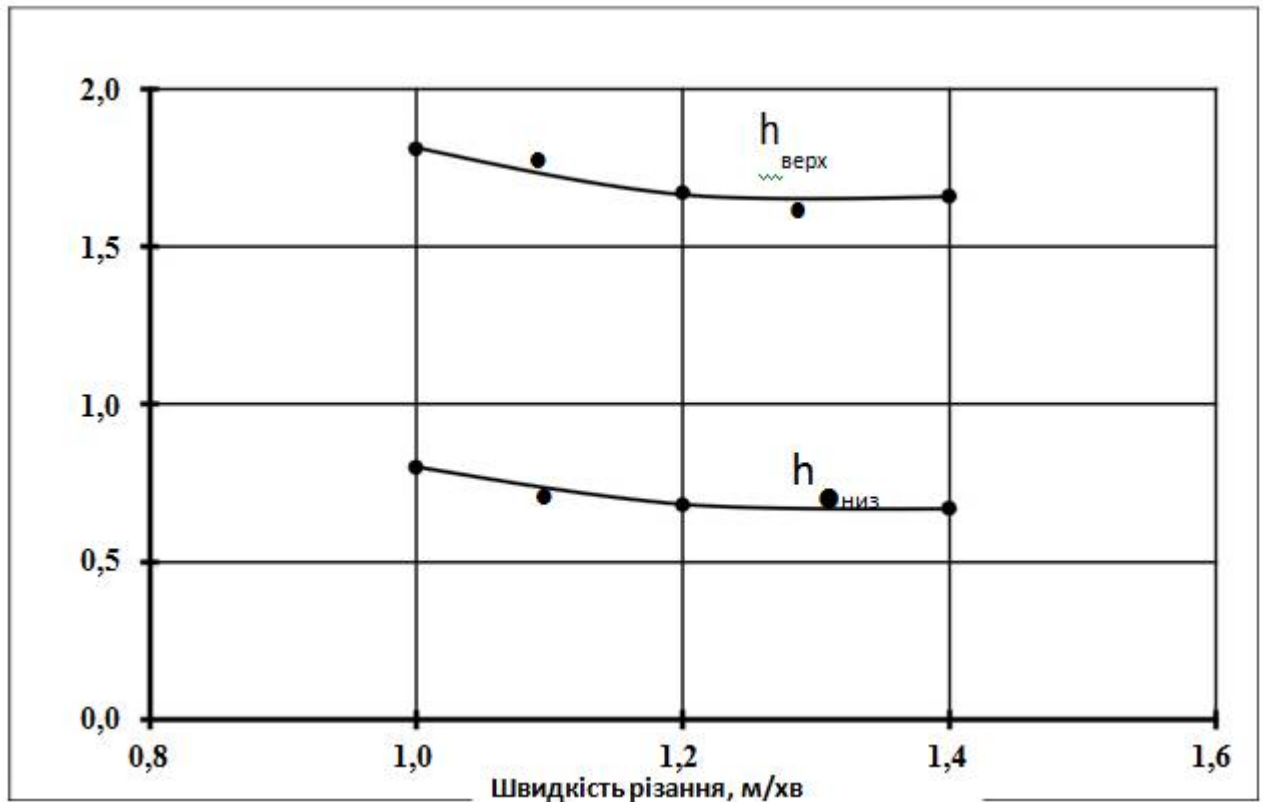


Рисунок 3.16 – Залежність ширини різа від швидкості обробки алюмінію A5M: $h_{\text{верх}}$ – ширина різа по верхніх кромках; $h_{\text{низ}}$ – ширина різа по нижніх кромках

Несприятливі умови виділення продуктів розплаву алюмінію з каналу різа визначають низьку якість його поверхні, що виражається рівнем шорсткості ($Ra = 12,1$ мкм) і відбивається характером мікрогеометрії, представленої на рисунку 3.17.

Якщо для обробки вуглецевих і неіржавіючих сталей, алюмінієвих сплавів відомі технологічні схеми, що рекомендуються, із струмовими характеристиками, складом газових середовищ, їх параметрами, відповідністю швидкості обробки передбачуваній товщині різа, то для розкрою міді і її сплавів немає конкретних даних за призначенням режимів в рамках певних технологічних схем. Існують лише загальні рекомендації по їх вибору з ряду технологічних схем, призначених для розкрою вуглецевих сталей (рис. 3.1, 3.3) [88].

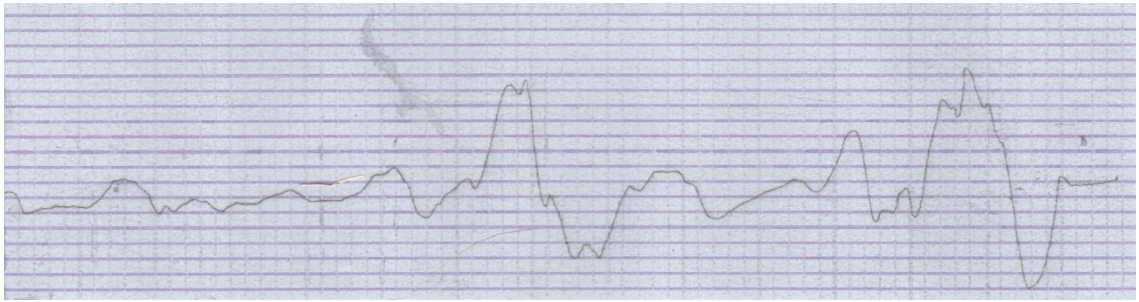


Рисунок 3.17 – Профілограмма поверхні різа алюмінію А5М при розкрії за технологічною схемою Ні – Focus для алюмінієвих сплавів:

($I = 35 \text{ А}$, $V = 1,4 \text{ м/мин}$); В.У. = 500; Г.У. = 50

Зважаючи на те, що вибрана для експериментів товщина різа складає 2 мм, відповідною технологічною схемою слід визнати схему Ні-focus із струмовим режимом $I = 35 \text{ А}$. Як плазмовиникаючого газу використовується кисень, а завихрюючого – суміш кисню і азоту. Діапазон швидкостей, що рекомендуються, відповідає $V = 1,3 - 1,7 \text{ м/хв}$.

Аналіз морфології поверхонь різа, представлених на рисунку 3.18, свідчить про хорошу якість розкрою без яких-небудь слідів осадження елементів розплаву. Це пояснюється низьким значенням динамічної і кінематичної в'язкості розплаву міді і достатніми газодинамічними потоками для його видалення з каналу різа.

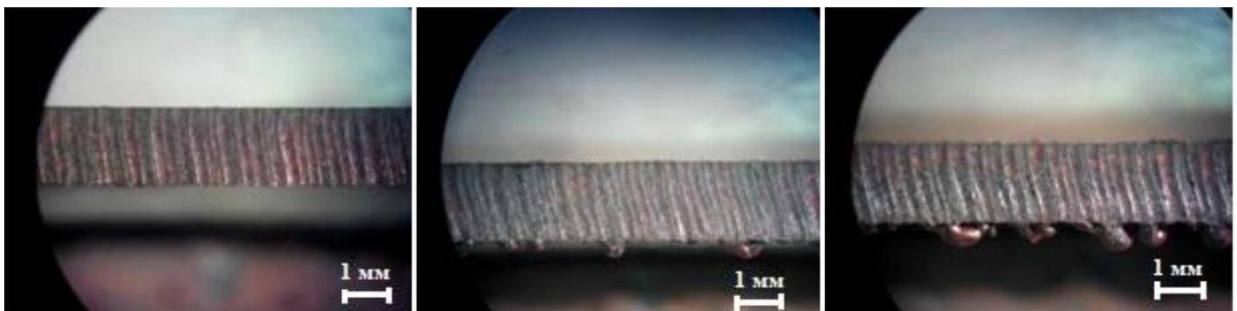


Рисунок 3.18 – Морфологія поверхні різа міді М1 при різних швидкостях обробки: а – $V = 1,3 \text{ м/хв}$; б – $V = 1,5 \text{ м/хв}$; в – $V = 1,7 \text{ м/хв}$.

Підвищення швидкості різання до $1,7 \text{ м/хв}$ приводить до утворення певної кількості грата на нижній кромці різа, який легко віддаляється.

Аналіз точності різання при розкрою міді показав на формування певної конусності, яка виражається різницею в ширині різа на верхніх і нижніх його кромках (рис. 3.19, 3.20).

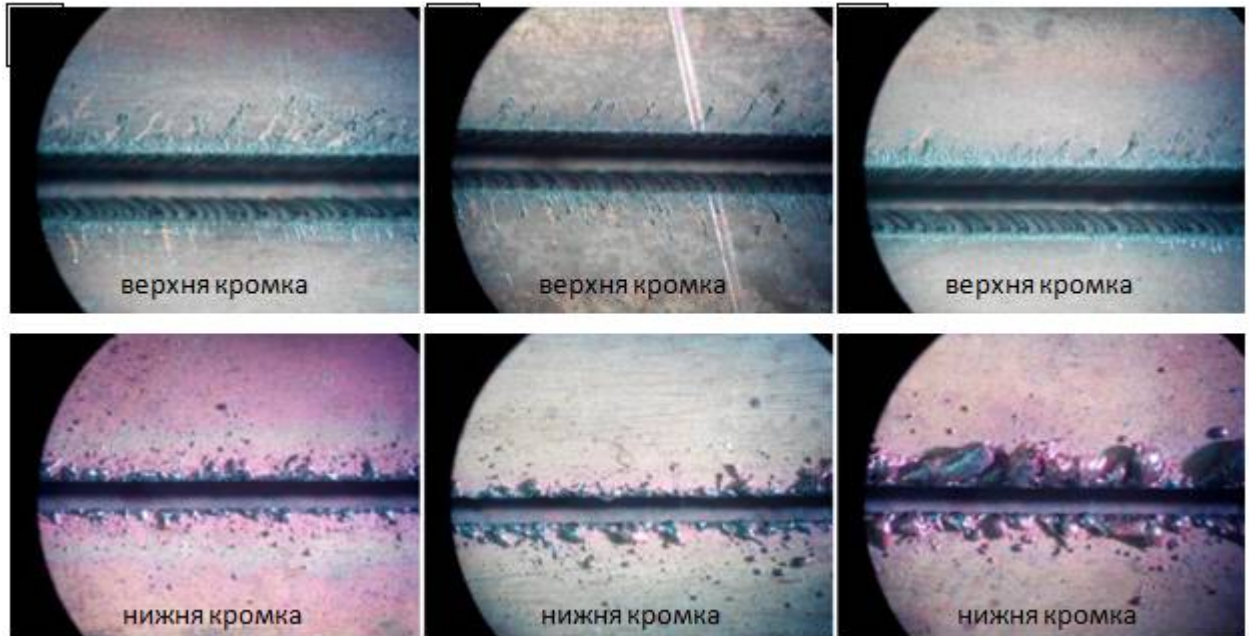


Рисунок 3.19 – Зовнішній вигляд різа по верхніх і нижніх кромках:

а – $V = 1,3$ м/хв; б – $V = 1,5$ м/хв; в – $V = 1,7$ м/хв.

Аналіз результатів експериментальних даних по розкрою міді марки М1 показав на хорошу якість різа без слідів налипання продуктів розплаву після обробки в дослідженому діапазоні швидкостей. Оптимальною швидкістю різа є $V = 1,3$ м /хв, що характеризується практичною відсутністю грата на нижній кромці різа. Значну конусність різа можна пояснити різною ефективністю теплопередачі від плазмової дуги оброблюваному матеріалу у верхній і нижній частині її стовпа при високій теплопровідності міді [88].

Кількісна оцінка якості поверхні різа представлена профілограммой на рис. 3.21, а топографія – на рис. 3.22.

Порівняння поверхні різа алюмінію А5М (рис. 3.15) і мідь М1 (рис. 3.18) вказує на відмінність їх морфології. Так, поверхня різа міді можна вважати класичного для термічних методів розділового різання, що є чергуванням слідів взаємодії плазмової дуги з оброблюваним матеріалом.

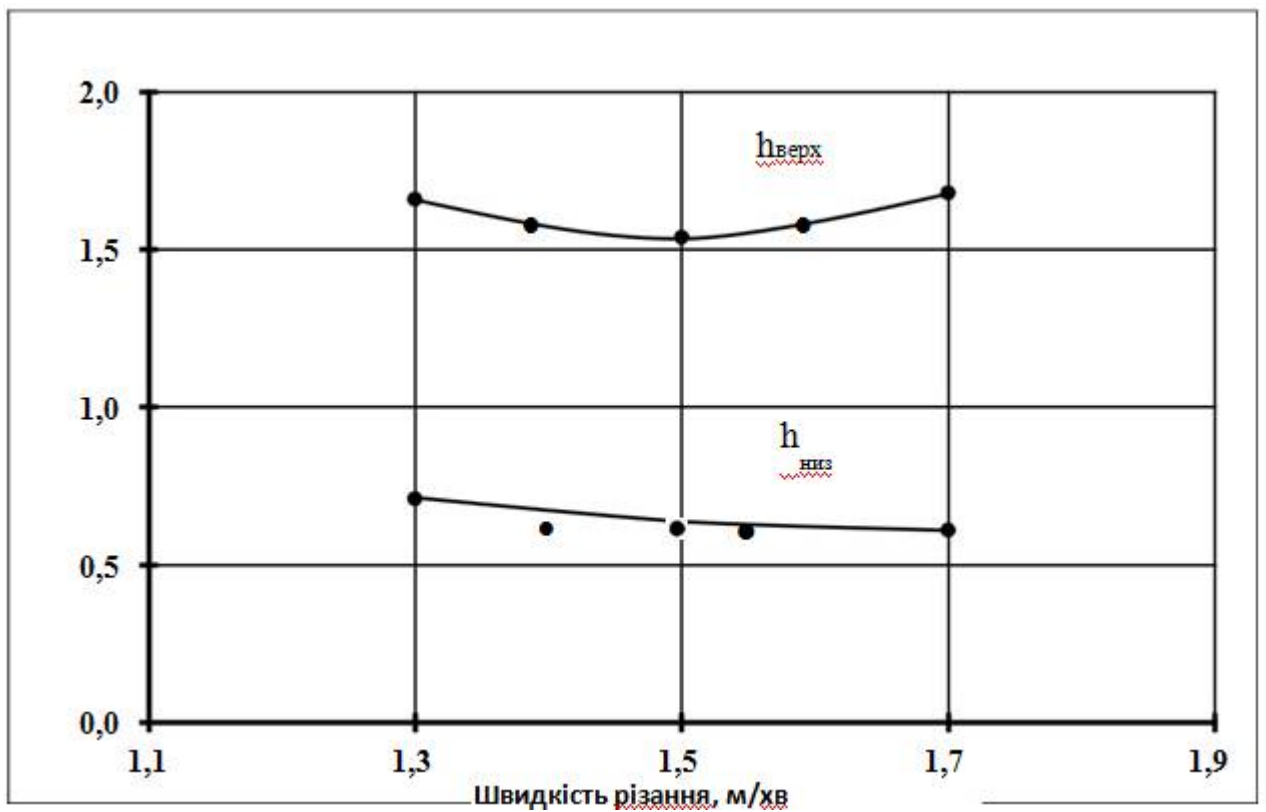


Рисунок 3.20 – Залежність ширини різання міді М1 від швидкості обробки:

$h_{\text{верх}}$ – ширина різання по верхнім кромкам; $h_{\text{низ}}$ – ширина різання по нижнім кромкам

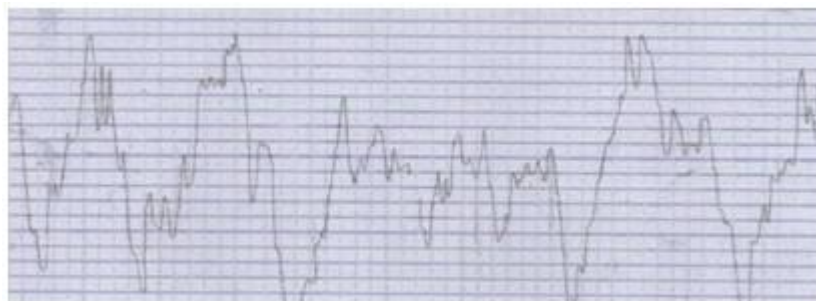


Рисунок 3.21 – Профілограма поверхні різання міді М1 при розкрію за технологічною схемою Ні – Focus для вуглецевих сталей:

($I = 35 \text{ A}$, $V = 1,3 \text{ м/хв}$); В.У. = 2000; Г.У. = 50

На поверхні різання відсутні сліди осадження продуктів розплаву і їх скупчення на нижніх кромках різання у вигляді ґрата. Це свідчить про дію в каналі різання газодинамічних потоків, достатніх для повного видалення з нього продуктів розплаву. Цьому сприяє низька кінематична в'язкість розплаву міді. На

поверхні різа алюмінію (рис. 3.15) лише у верхній його частині є видимими елементи характерного для плазмового розкрою рельєфу.

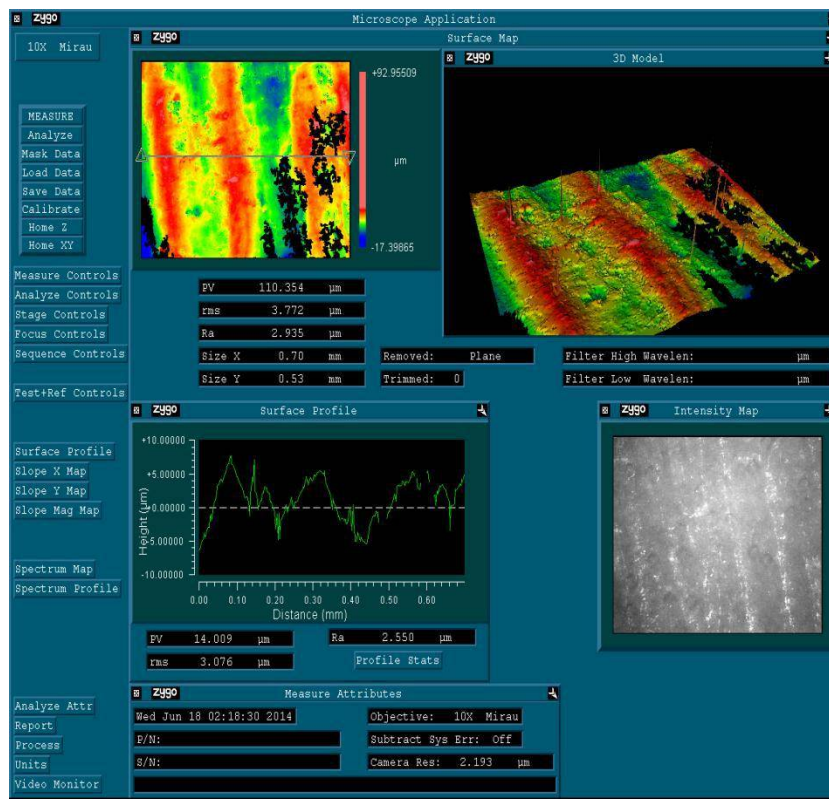


Рисунок 3.22 – Топографія поверхні різа міді М1 при розкрою за технологічною схемою Ні – Focus для вуглецевих сталей:

$$(I = 35 \text{ A}, V = 1,3 \text{ м/хв})$$

Остання поверхня різа плакуюча елементами розплаву, з виникненням на нижніх кромках відчутного ґрата. Пояснення механізму формування подібної морфології різа і можливі заходи щодо її поліпшення були розглянуті вище.

Візуальна відмінність в характері рельєфу поверхонь різа алюмінію і міді підтверджується результатами профілографування (рис. 3.17 і 3.21). Якщо профілограмма поверхні різа міді (рисунок 3.21) і її топограма (рисунок 3.22) відображають її рельєф у вигляді борозенок, що чергуються, з шорсткістю $Ra = 5,98 \text{ мкм}$, то профілограмма поверхні різа алюмінія (рис. 3.17) описує мікрогеометрію поверхні обложеного розплаву з шорсткістю $Ra = 12,1 \text{ мкм}$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОСТРУЙНОГО ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ

Аналіз технологічних схем тонкоструйного плазмового різання дозволяє виявити найбільш прийнятну для розкрою певного класу матеріалів і призначити параметр струмового режиму залежно від товщини різа. В рамках вибраної технологічної схеми необхідна оптимізація швидкісного режиму по критеріях точності, якості різа і продуктивності розкрою конкретної марки матеріалу. Результати вирішення цих питань при обробці мономатеріалів представлені в попередніх розділах роботи.

Проте, залишається відкритою проблема в обробці біметалічних матеріалів як з позицій встановлення технологічної схеми з певним значенням струмового режиму, вибору складів і параметрів плазмовинекаючого і завихрюючого газів, так і рішення питання про те, з якого боку біметалічного з'єднання виробляти розкрій. У зв'язку з цим методика експериментальних досліджень передбачає простий перебір можливих варіантів обробки біметалічних композицій у вигляді: M1+M2 або M2+M1. При цьому використовувані технологічні схеми плазмового розкрою в кожному варіанті відповідають обробці як одній (M1), так і іншій (M2) складовій біметалічної композиції.

4.1 Низковуглецева сталь Ст3 + неіржавіюча сталь 12Х18Н10Т

Досліджувана композиція є з'єднанням зваркою вибухом низковуглецевої сталі Ст3 завтовшки 3 мм і неіржавіючої сталі 12Х18Н10Т товщиною 2 мм. Сумарна товщина зварного пакету склала 5 мм.

Зважаючи на біметалічний характер композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» для її розкрою можливий вибір технологічної схеми для обробки як конструкційних вуглецевих (рис. 3.1 –3.3), так і легованих сталей (рис. 3.4). Так для розкрою пакету товщиною 5 мм можна рекомендувати наступні технологічні схеми обробки конструкційних сталей:

- Ні – Focus на струмових режимах 35 і 45 А (рис. 3.1);
- Ні – Focus^{plus} на струмовому режимі 50 А (рис. 3.2);
- Ні – FocusF на струмовому режимі 130 А (рис. 3.3).

З позначених схем для вивчення були вибрані дві: Ні – Focus^{plus} з $I = 50$ А з швидкістю обробки, що рекомендується, $V = 1,75$ м /хв і Ні – FocusF з $I = 130$ А на швидкості $V = 3,3$ м /хв.

Аналогічно при виборі як варіанти обробки з технологічних схем розкрою легованих сталей можливі наступні варіанти (рисунок 3.4):

- Ні – Focus на струмових режимах 45 А з рекомендованою швидкістю $V = 1,3$ м/хв;
- Ні – FocusF на струмових режимах 130 А с $V = 2,45$ м/хв.

Не дивлячись на привабливість технологічних схем Ні – FocusF із струмовим режимом $I = 130$ А, що забезпечують розкрій на максимальних швидкостях, від них слід відмовитися. Так експериментальні дослідження підтвердили незадовільну якість різа (рисунок 4.1) при використанні даної технологічної схеми, як для конструкційних, так і легованих сталей незалежно від того, з якого боку біметалу вироблявся розріз.

Погана якість різання характеризується значних грат на нижній кромці, видалити який можливо лише при подальшій механічній обробці. Даний факт можна пояснити тим, що на максимальному струмовому режимі формується значна (до 3,5 мм) ширина різа, а невелика товщина пакету не забезпечує формування оптимальної схеми взаємодії плазмової дуги з оброблюваним матеріалом з наявністю всіх характерних ділянок плазмового стовпа (рис. 1.9).

Використання «жорстких» струмових режимів розділового різання на малій товщині пакету приводить до формування плазмового стовпа з низьким положенням анодної плями в каналі різа. Останнє супроводиться відповідним зменшенням, аж до зникнення ділянки плазмового струменя, відповідального за видалення продуктів розплаву із зони різа.

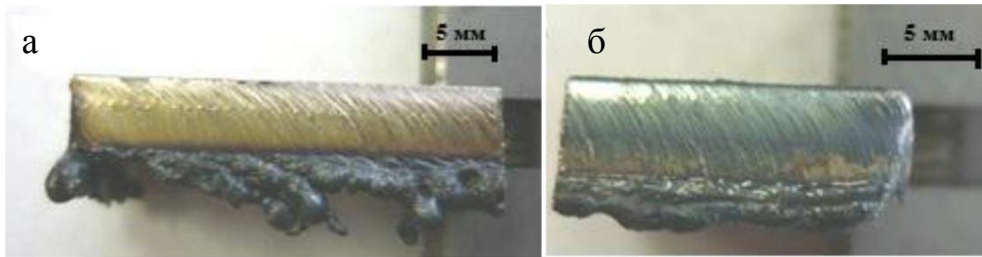


Рисунок 4.1 – Гратовинекання на нижній кромці різа композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при обробці за технологічною схемою Ні – FocusF для легованих сталей при розкрої: а – з боку сталі 12Х18Н10Т; б– з боку сталі Ст3

Низьке положення анодної плями приводить до інтенсивного розплаву і перегріву матеріалу в каналі, його стіканню на нижню кромку різа. Відсутність достатніх по інтенсивності газодинамічних потоків в широкому каналі різа не забезпечує ефективного видалення розплаву з кромки різа, що приводить до його зварювання з основним металом.

Таким чином, високопродуктивна технологічна схема Ні – FocusF може бути рекомендована для різання малої товщини з необхідністю подальшої механічної обробки для забезпечення необхідної точності і якості.

У зв'язку з цим для розкрою біметалічного з'єднання «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» використовувалися технологічні схеми Ні – Focus^{plus} із струмовим режимом $I = 50 \text{ А}$ і $V = 1,75 \text{ м/хв}$, рекомендована для обробки вуглецевих сталей і Ні – Focus з $I = 45 \text{ А}$ і $V = 1,3 \text{ м /хв}$ – для легованих сталей [94].

4.1.1 Обробка на режимах розкрою легованих сталей

Як наголошувалося вище, кожна з відмічених технологічних схем застосовувалася для розкрою біметалічної композиції як з боку низковуглецевої сталі Ст3, так і неіржавіючою - 12Х18Н10Т.

На рисунку 4.2 представлено фото поперечного перетину різа при розкрії на різних швидкостях біметалічної композиції з боку сталі 12X18H10T за технологічною схемою Ні – Focus для легованих сталей.

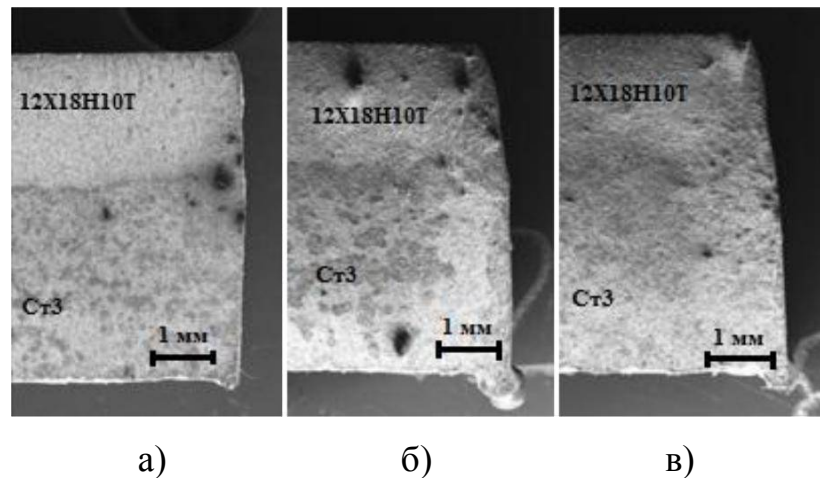


Рисунок 4.2 – Геометрія різа біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при розкрію з боку сталі 12X18H10T по технологічній схемі Ні – Focus з $I = 45$ А для легованих сталей: а - $V = 1,1$ м /хв; б - $V = 1,3$ м/хв; в - $V = 1,5$ м/хв.

Кількісні показники точності різання досліджуваної композиції на відмічених режимах представлені на рис. 4.3.

Аналіз отриманих результатів дозволяє передбачити можливі механізми формування точності різа даної біметалічної композиції при різних швидкостях обробки. Так незначне відхилення різання від перпендикулярності на ділянці сталі 12X18H10T ($\alpha_2 = +2,2^\circ$) на швидкості обробки $V = 1,1$ м /хв (рисунок 4.2, а) можна пояснити малим значенням коефіцієнта теплопровідності даного матеріалу з одного боку, а з інший – достатнім часом прогрівання матеріалу на всій ділянці з причини малої швидкості просування каналу різа [86, 91]. На нижній ділянці композиції, що представляє низьковуглецеву сталь (рис. 4.2, а), спостерігається формування зворотного конуса ($\alpha_1 = -2,53^\circ$) з розширенням зони різа донизу. Ймовірно, це пов'язано з малою швидкістю обробки і підвищеним стоком тепла від

неіржавіючої складової до низтковуглецевої унаслідок значної різниці в їх коефіцієнтах теплопровідності.

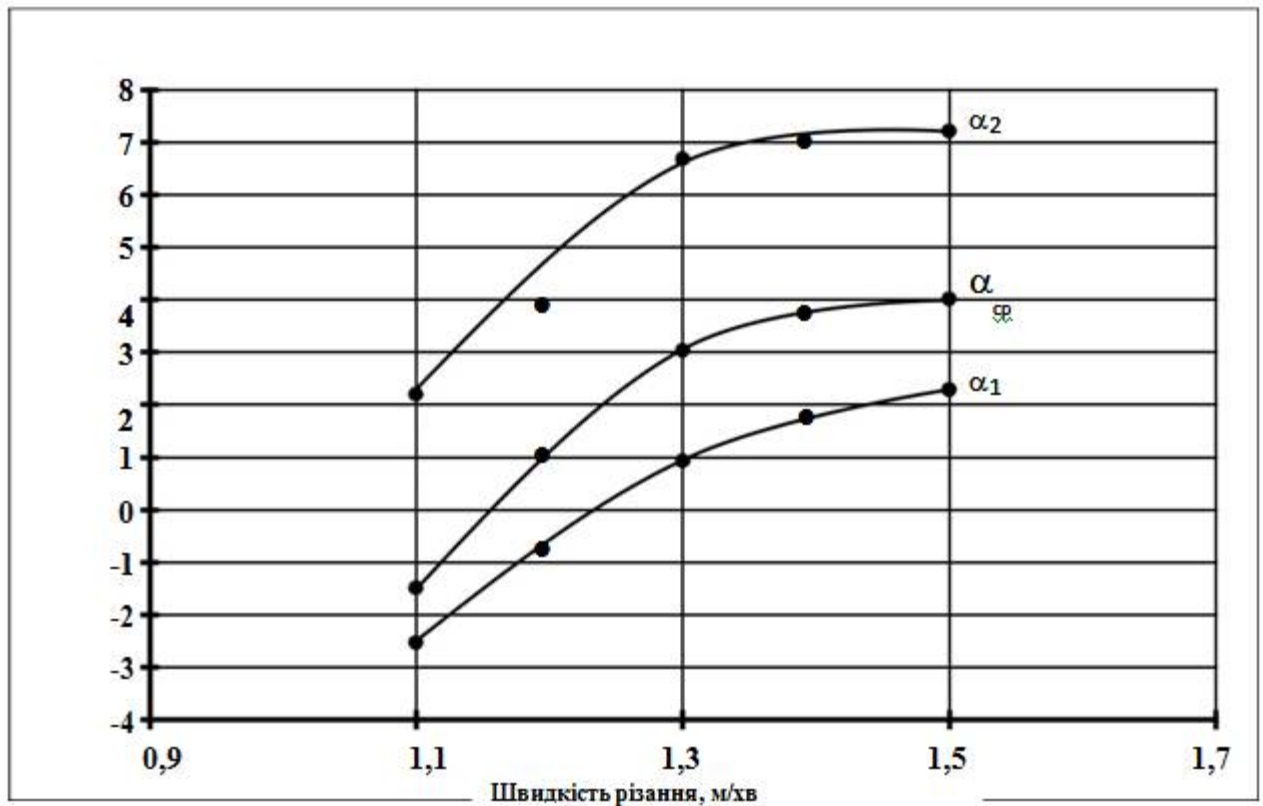


Рисунок 4.3 – Вплив швидкості різання композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точність різання при розкрої з боку сталі 12Х18Н10Т за технологічною схемою Ні – Focus з $I = 45$ А для легованих сталей: α_1 – відхилення від перпендикулярності різа складової сталь Ст3; α_2 – відхилення від перпендикулярності різа складової сталь 12Х18Н10Т; $\alpha_{ср}$ – середнє відхилення різа біметалічної композиції

Підвищення швидкості обробки до 1,3 м /хв. виключає чинник зайвого перегріву розплаву в зоні різа, формуючи традиційну геометрію різа із зменшенням ширини різа до низу (рис. 4.2, б) і забезпечуючи, з однієї сторони, підвищення точності різа на ділянці сталі Ст3 ($\alpha_1 = 0,93^\circ$), а з іншою, зниження її на ділянці неіржавіючої складової ($\alpha_2 = 6,68^\circ$).

Подальше збільшення швидкості обробки до 1,5 м /хв супроводиться подальшим погіршенням точності різа на обох ділянках композиції (рис. 4.2, в).

На рис. 4.3 представлена узагальнена характеристика точності різа композиції в цілому як середній кут його нахилу ($\alpha_{\text{ср}}$). Дана характеристика є умовною, але певною мірою може служити мірою точності різа шаруватих композицій.

Аналіз результатів розкрою досліджуваної композиції на режимах обробки легованих сталей при різанні з боку сталі 12Х18Н10Т показав, що найкращі результати по точності відповідають швидкісному режиму обробки $V = 1,2$ м /хв. При цьому на нижній ділянці композиції (сталь Ст3) спостерігається незначний негативний кут відхилення від перпендикулярності ($\alpha_1 \sim -1^\circ$), при підвищеному значенні кута $\alpha_2 \sim 4^\circ$ на ділянці неіржавіючої сталі. Зважаючи на те, що верхня ділянка по розмірах менше нижнього в 1,5 разу, середній кут відхилення різа можна умовно прийняти рівним $\alpha_{\text{ср}} \sim 1^\circ$. На досліджених швидкостях обробки при даній технологічній схемі спостерігається мінімальна кількість грата, з незначним його збільшенням при зростанні швидкості розкрою.

Оцінка топографії поверхні різа по характеристиці шорсткості представлена на рис. 4.4. У дослідженому діапазоні швидкостей обробки просліджуються незначні коливання шорсткості (від $Ra = 5,78$ мкм при мінімальній швидкості до $Ra = 8,74$ мкм – при максимальній). Вагання в значеннях шорсткості, ймовірно, пояснюються умовами видалення рідкої фази, що розрізняються, з каналу різа.

Типова профілограмма поверхні різа для досліджуваних режимів плазмового розкрою представлена на рис. 4.5, а її топографія – на рис. 4.6.

Використання досліджуваної технологічної схеми для розкрою композиції при обробці з боку низковуглецевої сталі дозволило виявити декілька інший характер геометрії різа (рисунок 4.7).

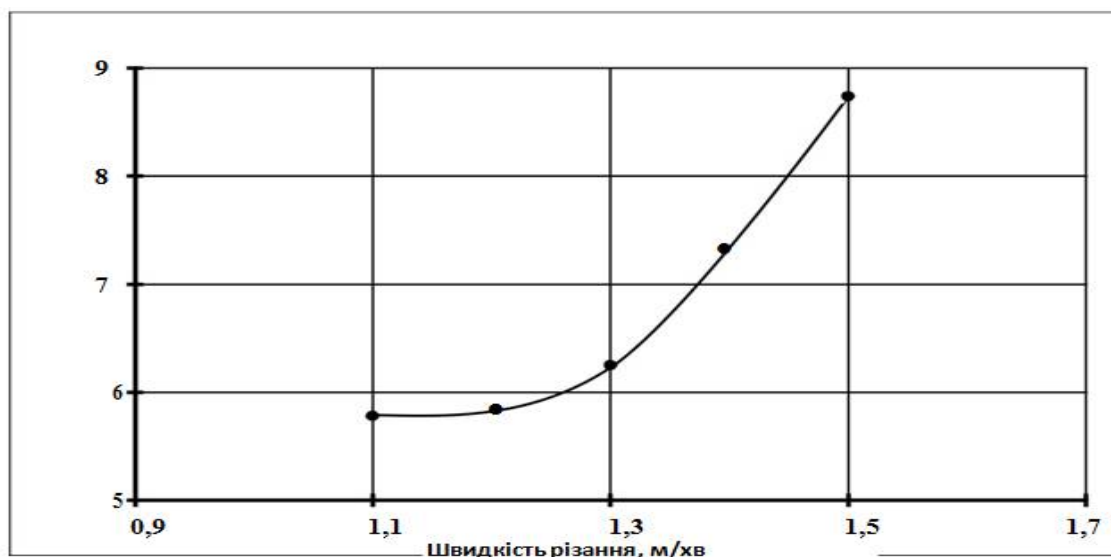


Рисунок 4.4 – Вплив швидкості обробки на шорсткість поверхні різання біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при розкрої з боку сталі 12Х18Н10Т за технологічною схемою Ні – Focus з $I = 45$ А для легованих сталей

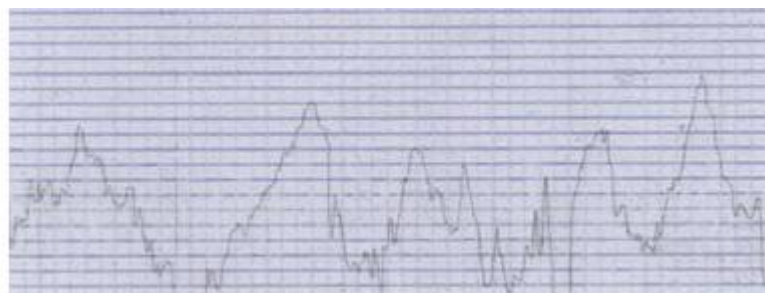


Рисунок 4.5 – Профілограмма поверхні різання біметалічною композицій «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологічна схема Ні – Focus ($I = 45$ А, $V = 1,3$ м /хв); різ з боку сталі 12Х18Н10Т; В.У. = 2000; Г.У. = 50

Вивчення геометрії різання дозволило виявити три характерні ділянки, що мають приблизно однакові розміри. Так перша ділянка у верхній частині пакету займає $\sim 2/3$ товщину низковуглецевої складової і змінює своє кутове положення від негативного значення ($\alpha_1 = -1,72^\circ$) для мінімальної швидкості

обробки ($V = 1,1$ м/хв) до позитивного ($\alpha_1 + 1,59^\circ$) – для максимальної швидкості ($V = 1,5$ м/хв).

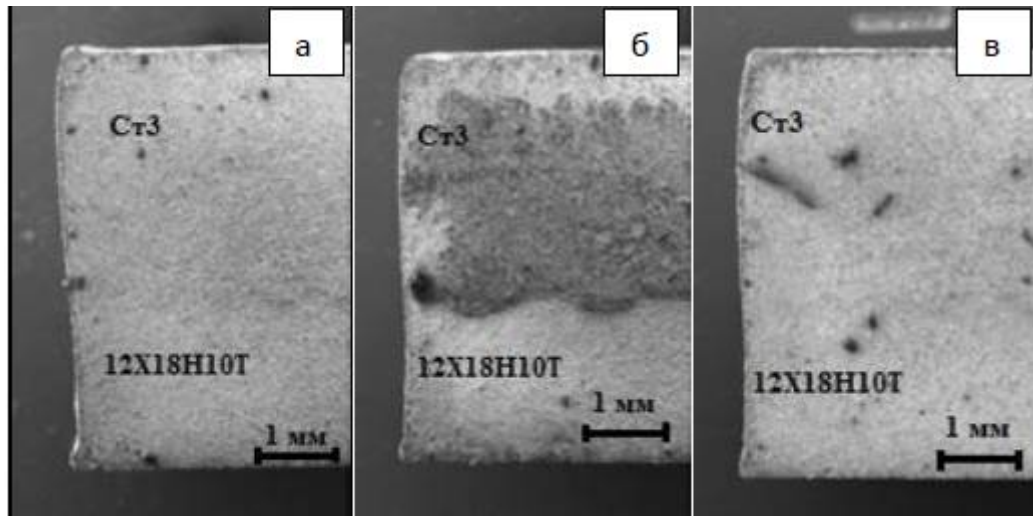


Рисунок 4.7 – Геометрія різа біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при розкрою з боку сталі Ст3 за технологічною схемою Ні – Focus з $I = 45$ А для легованих сталей: а – $V = 1,1$ м /хв; б - $V = 1,3$ м/хв; в - $V = 1,5$ м /хв.

Наступний за первою ділянкою другої знаходиться в перехідній зоні сталь Ст3 – сталь 12X18H10T і має негативний кут нахилу різа від $\alpha_2 = -4,99^\circ$ до $\alpha_2 = -3,98^\circ$ у дослідженому діапазоні швидкостей. Третя ділянка описує геометрію різа на більшій частині неіржавіючої складової. Характерним для даної ділянки є той факт, що геометрія різа на ній є практично ідеальною ($\alpha_3 = 0$) у всьому діапазоні досліджень. Вплив швидкості обробки на точність геометрії різа на відмічених ділянках в даній схемі досліджень показаний на рисунку 4.8. Тут також приведена усереднена характеристика (α_{cp}) точності різа.

Якщо зміна α_{cp} для попередньої схеми знаходиться в межах від $-1,49^\circ$ до $+4,02^\circ$, то для даної схеми α_{cp} вагається від $-3,72^\circ$ до $-1,46^\circ$, т.є. тобто різ завжди має розширення до низу. Ймовірно, це пов'язано з тим, що даний

режим обробки не є оптимальним для розкрою конструкційних вуглецевих сталей.

У даній схемі досліджень також спостерігається мінімальна кількість легко віддільного грата на нижній кромці різа.

Якість поверхні різа є задовільною і може бути проілюстроване результатами профілографіювання (рис. 4.9, 4.10).

Результати по дослідженню морфології поверхні різа на комплексі для оцінки топографії представлені на рис. 4.11.

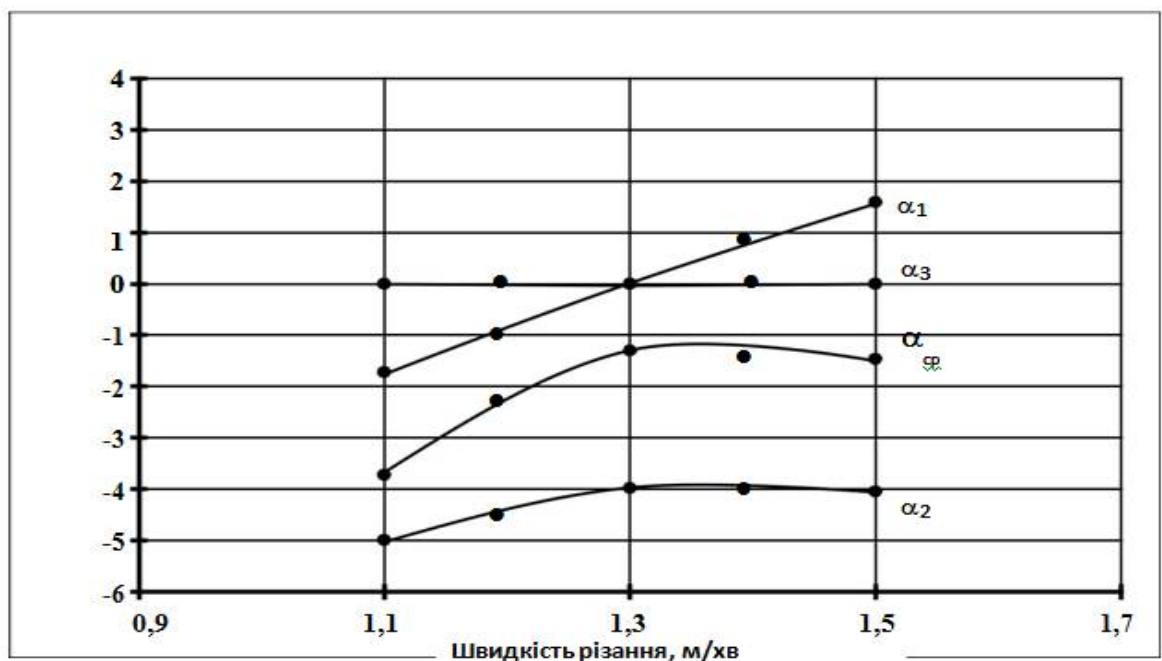


Рисунок 4.8 – Вплив швидкості різання композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точність різання при розкрою з боку сталі Ст3 по технологічній схемі Ні – Focus з $I = 45$ А для легованих сталей: α_1 – відхилення від перпендикулярності різання на першій ділянці; α_2 – відхилення від перпендикулярності різання на другій ділянці; α_3 – відхилення від перпендикулярності різання на третій ділянці; $\alpha_{ср}$ – середнє відхилення різання біметалічної композиції

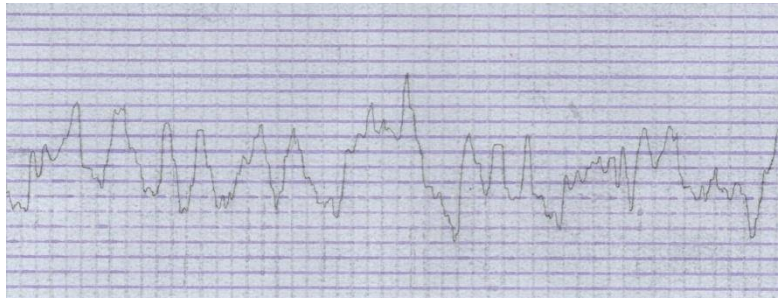


Рисунок 4.9 – Профілограма поверхні різа біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологічна схема Ні – Focus ($I = 45 \text{ А}$, $V = 1,3 \text{ м/хв}$); різ з боку сталі Ст3; В.У. = 2000; Г.У. = 50

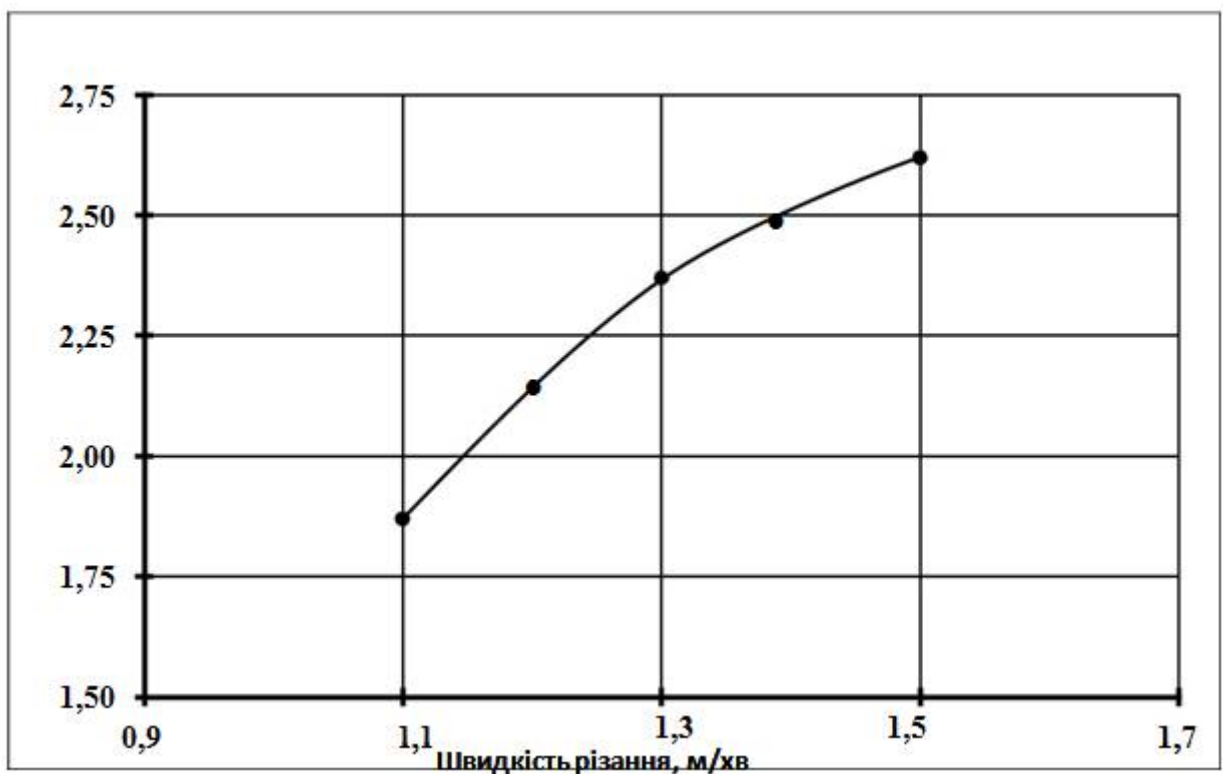


Рисунок 4.10 – Вплив швидкості обробки на шорсткість поверхні різа композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при розкрою з боку сталі Ст3 за схемою Ні – Focus з $I = 45 \text{ А}$ для легованих сталей

4.1.2 Обробка на режимах розкрою конструкційних вуглецевих сталей

Перш ніж приступити до аналізу і обговорення експериментальних результатів по оптимізації різа біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на режимах розкрою, рекомендованих для обробки

конструкційних вуглецевих сталей, слід звернути увагу на підвищену швидкість ($V = 1,75$ м /хв) різа при цій схемі в порівнянні з швидкістю ($V = 1,3$ м /хв) – для схеми обробки легованих сталей. При цьому струмовий режим для обох схем порівнянний, і дорівнював $I = 50$ А і 45 А, відповідно. Можливість обробки конструкційних вуглецевих сталей на підвищених швидкостях і характеризує технологічну схему Ні – Focusplus. Слід мати на увазі, що дана схема придатна лише для розкриваючи вуглецевих сталей, коли формування різа здійснюється одночасно по двох механізмах – розплавлення матеріалу за рахунок передачі йому енергії від стовпа плазмової дуги і інтенсивного окислення залоза в зоні різа з подальшим видаленням оксиду струменем кисню. Механізм кисневого різання вуглецевих сталей детально розглянутий в розділі 1.3 робіт. Для реалізації схеми Ні – Focus^{plus} для обробки даного класу сталей як плазмовекаючого газу використовується кисень, а завихрюючого– кислородо-азотна суміш при підвищеному тиску і витратах (в порівнянні з схемою Ні – Focus), що забезпечують достатні по динаміці газові потоки для видалення збільшених об'ємів розплавленого металу із зони різа (рис. 3.2) [94].

Дослідження технологічної схеми Ні – Focus^{plus} по розкрою біметалічної композиції проводилося за прийнятою в дослідженнях схемою: різ здійснювався як з боку неіржавіючої, так і вуглецевою складових.

Зовнішній вигляд поперечного перетину різа для різних швидкостей обробки досліджуваної біметалічної композиції показаний на рис. 4.12.

Різ виконувався з використанням технологічної схеми Ні – Focus^{plus} з боку неіржавіючої складової.

На рисунку 4.13 представлена залежність відхилення різа від перпендикулярності від швидкості обробки з оцінкою точності, як на окремих ділянках біметалічного з'єднання, так і усереднено по всьому різі.

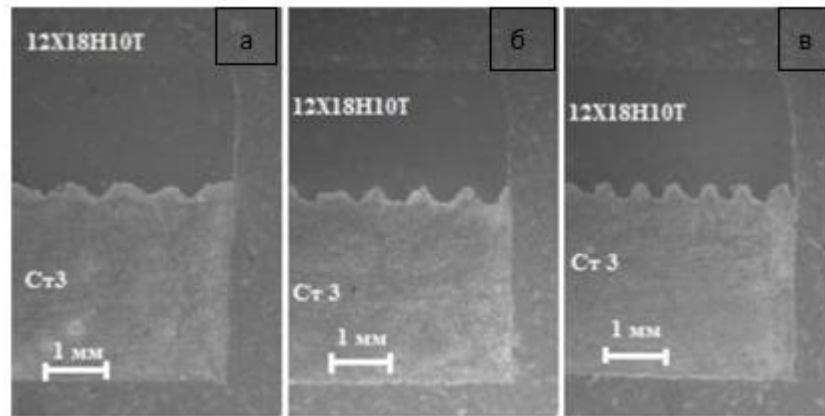


Рисунок 4.12 – Геометрія різа біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при розкрою з боку сталі 12X18H10T за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} з $I = 50$ А для конструкційних вуглецевих сталей: а – $V = 1,5$ м /хв; б - $V = 1,75$ м /хв; у - $V = 2,0$ м/хв

Дослідження точності формоутворення різа показує, що в області низьких швидкостей різа формується зворотний конус з розширенням різа до низу, що пов'язане із зайвим перегрівом матеріалу на низьких швидкостях і наявністю окислювальних реакцій на ділянці вуглецевої сталі. Підвищення швидкості обробки до середніх значень ($V = 1,75$ м/хв) виключає зайвий розплав в нижній частині біметалу, що забезпечує підвищення точності різа. Подальше збільшення швидкості аж до 2,0 м/хв приводить до значному відхиленню різа від перпендикулярності у верхній частині зразка на ділянці нержавіючої сталі.

Аналіз морфології поверхні різа свідчить про погану її мікрогеометрію (рисунок 4.14) із слідами стоків розплаву нержавіючої сталі на нижній ділянці вуглецевої сталі.

Реалізація схеми Ні – Focus^{plus} для розкрою біметалічної композиції що з боку становить «сталь Ст3» у встановленому діапазоні швидкостей дозволило виявити особливості в забезпеченні точності різа (рис. 4.15, 4.16).

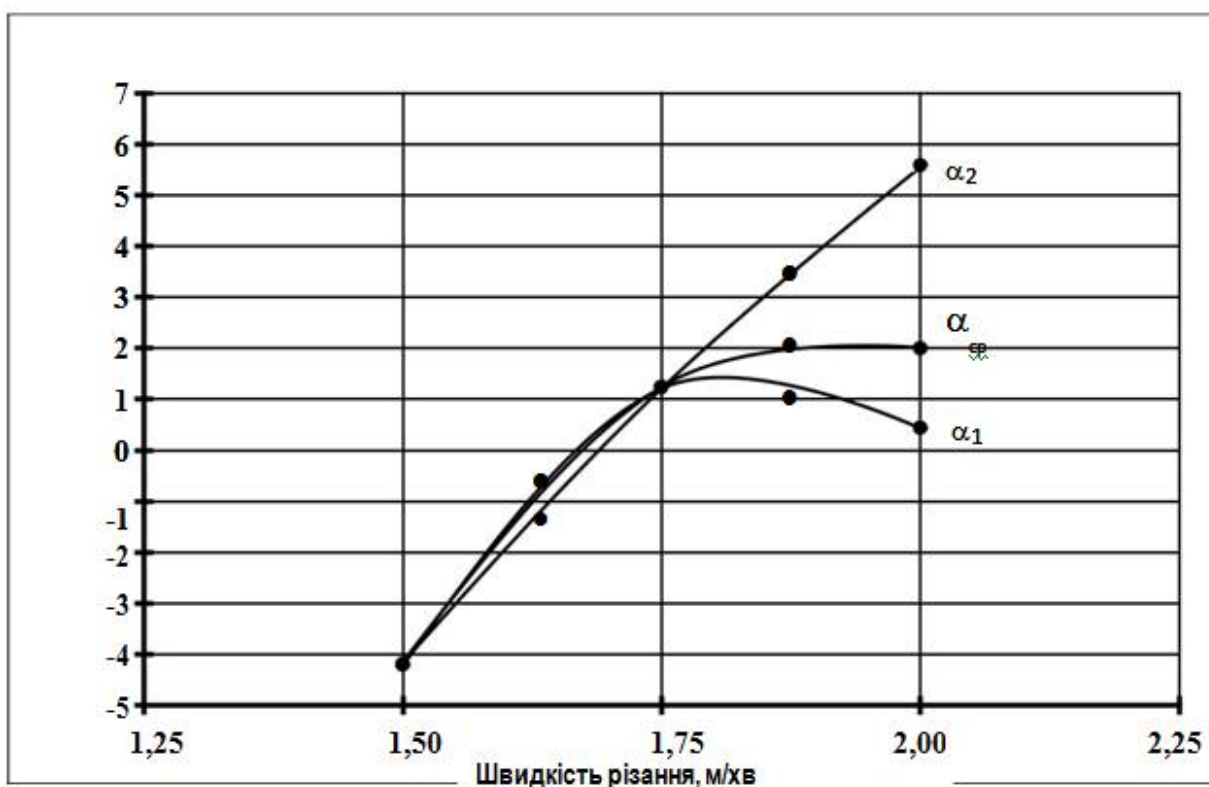


Рисунок 4.13 – Вплив швидкості різання композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точність різання при розкрою з боку сталі 12Х18Н10Т за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} з $I = 50$ А для вуглецевих сталей: α_1 – відхилення від перпендикулярності різання на ділянці «сталь Ст3»; α_2 – відхилення від перпендикулярності різання на ділянці «сталь 12Х18Н10Т»; α_{cp} – середнє відхилення різання від перпендикулярності біметалу

Підвищення швидкості обробки погіршує показник точності різання як на ділянці окремих складових біметала, так і композиції в цілому. Якщо на швидкості $V = 1,5$ м/хв точність різання максимальна, то підвищення швидкості різання до 2 м/мін приводить до різкого її погіршення. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що при підвищенні швидкості обробки відбувається зсув анодної плями вгору по каналу різання і в нижній його частині потужність факела (рисунок 1.7) значно нижча, ніж на ділянках стовпа і анодної плями. Це приводить до інтенсивнішого розплавлення у верхній частині композиції і меншому на

ділянці неіржавіючої сталі. Інтенсивніше розплавлення на ділянці «сталь Ст3» також забезпечується дією механізму кисневого різання.

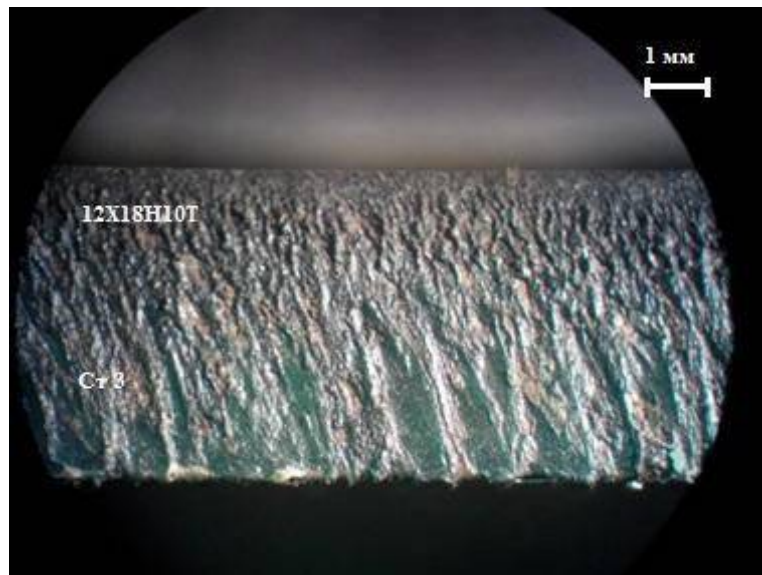


Рисунок 4.14 – Морфологія поверхні різа композиції «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при розкрою з боку сталі 12X18H10T за технологічною схемою Ні

Ні – Focus^{plus} для вуглецевих сталей

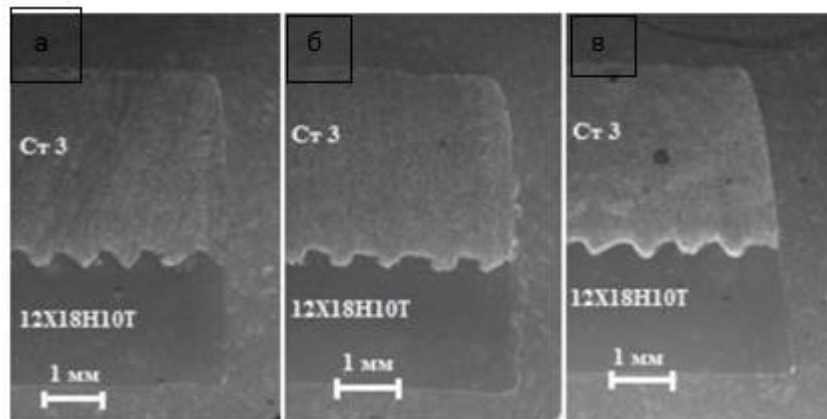


Рисунок 4.15 – Геометрія різа біметалічної композиції «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при розкрою з боку сталі Ст3 за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} для вуглецевих сталей: а – $V = 1,5$ м/хв; б – $V = 1,75$ м/хв; в – $V = 2,0$ м/хв.

Слід зазначити, що розкрій біметалічної композиції за досліджуваною схемою при різанні з будь-якого боку не супроводиться утворенням грата на нижній кромці різа.

Дослідження якості поверхні різа також показало на низьке значення шорсткості і хорошу топографію (рис. 4.17, 4.18).

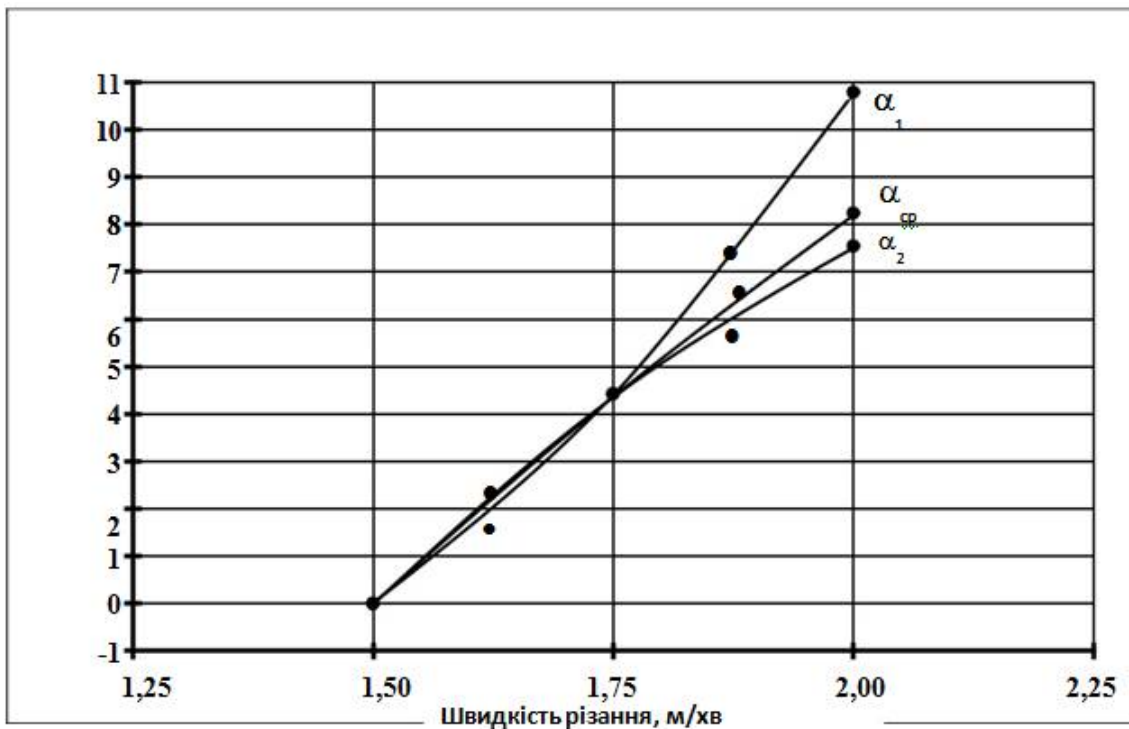


Рисунок 4.16 – Вплив швидкості різання композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точність різа при розкрою з боку сталі Ст3 за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} з $I = 50$ А для вуглецевих сталей: α_1 – відхилення різа від перпендикулярності на ділянці «сталь Ст3»; α_2 – відхилення різа від перпендикулярності на ділянці «сталь 12Х18Н10Т»; $\alpha_{ср}$ – середнє відхилення різа від перпендикулярності біметала

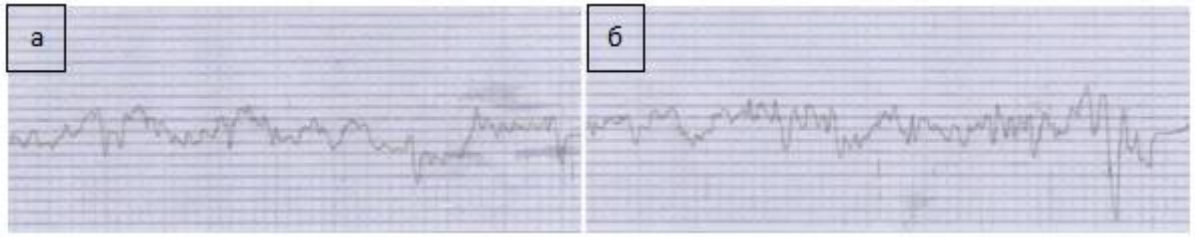


Рисунок 4.17 – Профілограмма поверхні різа композиції «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологічна схема Ні – Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,75 \text{ м/хв}$); різ з боку сталі Ст3; В.У. = 2000; Г.У. = 50: а – на ділянці сталі Ст3; б – на ділянці сталі 12Х18Н10Т

4.2 Низьковуглецева сталь Ст3 + алюміній А5М

Дана біметалічна композиція як об'єкт для термічного різання істотно відрізняється від дослідженої раніше. Останню слід розглядати як з'єднання хоча і різних по хімічному складу металевих матеріалів, але що відносяться до одного класу сталей. Низьковуглецева сталь Ст3 і неіржавіюча сталь 12Х18Н10Т мають близькі значення температур плавлення (1539°C и $\sim 1500^\circ \text{C}$), а значення теплопровідності (37 и $18 \text{ ккал/м-год-град}$ при 500°C) (таблиці 2.3, 2.6) є порівнянними величинами. У теж час біметалічна композиція «сталь + алюмінієм» є зварне з'єднання чорного і кольорового металів [13] із значною різницею в реакції на теплову дію. Низька температура плавлення алюмінію (660°C) і його висока теплопровідність ($197 \text{ ккал/м-год-град}$) (таблиця 2.9) визначатимуть особливості формування каналу різа досліджуваної біметалічної композиції.

При виборі технологічної схеми для її розкрою, як і в дослідженні попередньої композиції необхідно розглядати можливі варіанти, прийнятні для різання конструкційних вуглецевих сталей і алюмінієвих сплавів при товщині пакету, рівному 6 мм . Виходячи з цих міркувань слід розглядати наступні технологічні схеми:

- для розкрою вуглецевих сталей – схема Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,5 \text{ м/хв}$) (рис. 3.2);

- для розкрою алюмінієвих сплавів – схема Ні – Focus ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,3 \text{ м/хв}$) (рис. 3.5).

У технологічній схемі Ні – Focus^{plus} як плазмовинекаючого (ріжучого) газу використовується кисень, а враховуючи можливість реалізації у формуванні різа вуглецевих сталей механізму кисневого різання, призначено підвищене (до 10 бар) значення його тиску. Для видалення продуктів розплаву використовується завихрюючий газ – азот.

Розкрій алюмінієвих сплавів за технологічною схемою Ні – Focus здійснювався з використанням як ріжучий газ – повітря, а завихрюючий – азото-воднева суміші.

4.2.1 Обробка на режимах розкрою конструкційних вуглецевих сталей

У даній серії експериментів для розкрою біметалічної композиції «сталь + алюміній» була використана схема Ні – Focus^{plus}, призначена для обробки конструкційних вуглецевих сталей. Розкрій виконувався як з одного, так і з другого боку біметала.

На рис. 4.19 представлена геометрія різа при розкрої композиції з боку сталевій складовій.

Аналіз геометрії різа досліджуваної композиції дозволив виявити певні відмінності в його формуванні у верхній (сталевій) і нижній (алюмінієвою) частині. Так формування каналу різа на сталевій ділянці композиції відбувається в оптимальних режимних умовах, що відбивається у високій точності різа – відхилення від перпендикулярності (α_1) не перевищує $1,5^\circ$, а шорсткість поверхні різа складає $Ra = 2,5 \text{ мкм}$. На всьому протязі нижньої ділянки біметала спостерігається розширення каналу різа (до $0,1 - 0,2 \text{ мм}$ на сторону), причому на поверхні різа алюмінієвої ділянки спостерігається наплавлення стали. Розширення каналу різа в нижній половині пакету можна пояснити низькою температурою плавлення алюмінію.

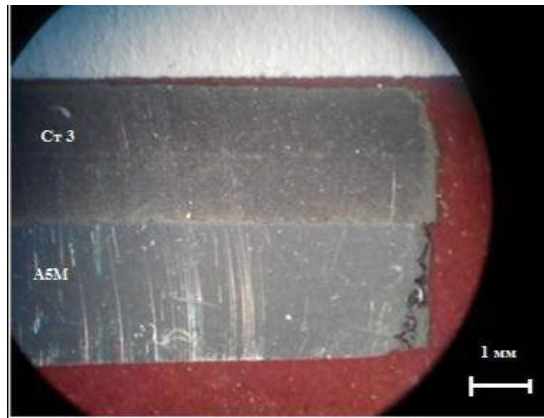


Рисунок 4.19 – Геометрія різа композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» при розкрою за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ А}$, $V = 1,5 \text{ м/хв}$); різ з боку сталі Ст3

При відносно однакових температурно-тимчасових умовах нагріву у всьому каналі різа положення кордону розплаву сталеві складові визначатиметься ізотермою $1539 \text{ }^\circ\text{C}$, а алюмінію – $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Це пояснює різну глибину проплавлення металів, а, відповідно, і ширину різа на верхній і нижній ділянках біметала. Різниця в ширині приводить до створення піднутрення на ділянці алюмінієвої складові, що формує певну нішу для скупчення частини розплаву сталі (рис. 4.20). Подібне спотворення геометрії каналу погіршує газодинамічні потоки, необхідні для повного видалення продуктів розплаву із зони різа. Це приводить до осадження сталевих шламу на стінках каналу в нижній частині різа. Низька температура плавлення алюмінію приводить до оплавлення нижньої кромки різа при стіканні по каналу високотемпературних продуктів сталевих розплаву.

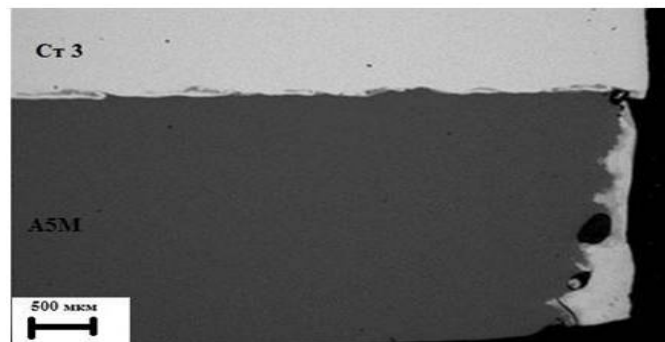


Рисунок 4.20 – Формування каналу різа на ділянці алюмінієвої складові біметала

Зміну швидкості різання в інтервалі 1,3 – 1,7 м/хв не привело до істотної зміни геометрії каналу різа ні по точності, ні шорсткості поверхні на обох ділянках біметала.

На рис. 4.21 показаний зовнішній вигляд поверхні різа досліджуваної композиції, характерний для всього діапазону швидкостей обробки. Для сталеві складові біметала характерна висока точність (відхилення різа від перпендикулярності складає $1 - 2^\circ$) і мале значення шорсткості ($R_a = 2,0 - 2,5$ мкм). У зоні алюмінієвої складові поверхня різа набагато гіршої якості з кратерами, шорсткість якої традиційними методами кількісно оцінити не представляється можливим. У теж час слід зазначити, що в цілому при даній технологічній схемі розкрою з боку вуглецевої сталі має місце висока точність різа по всій товщині композиції.

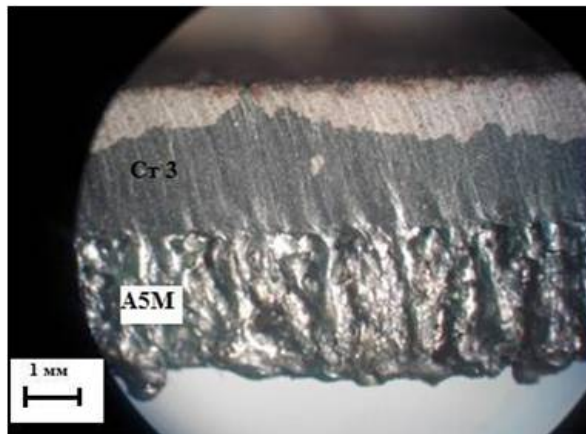


Рисунок 4.21 – Зовнішній вигляд поверхні різа композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» при розкрої за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50$ А, $V = 1,5$ м/хв); різ з боку сталі Ст3

В умовах даної обробки спостерігається невелика кількість грата на нижній кромці різа не залежно від зміни швидкості різа в дослідженому діапазоні. Інший характер формування поверхні різа композиції спостерігається при розкрої з сторони алюмінієвою складовій. Зовнішній вигляд поверхні різа показаний на рис. 4.22.

Аналіз морфології поверхні різа біметала (рис. 4.22) на верхній ділянці (алюміній) показує на характерний для плазмового розкрою металу рельєф у вигляді слідів дії плазмової дуги. На нижній ділянці (сталь) подібного рельєфу не спостерігається. Аналіз морфології поверхні різа біметала (рис. 4.22) на верхній ділянці (алюміній) показує на характерний для плазмового розкрою металу рельєф у вигляді слідів дії плазмової дуги. На нижній ділянці (сталь) подібного рельєфу не спостерігається.

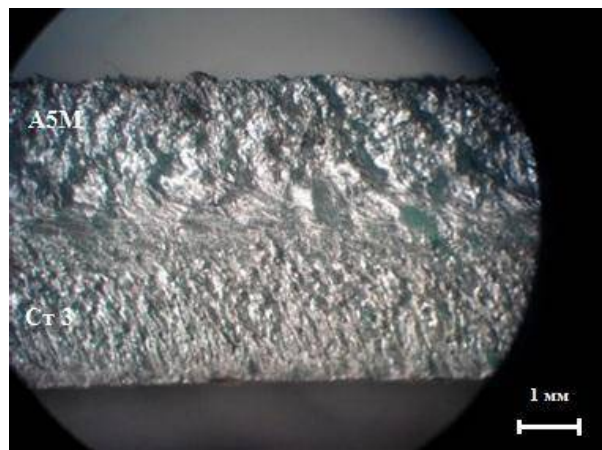


Рисунок 4.22 – Зовнішній вигляд поверхні різа композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» при розкрої за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,7 \text{ м/хв}$); різ з боку алюмінію А5М

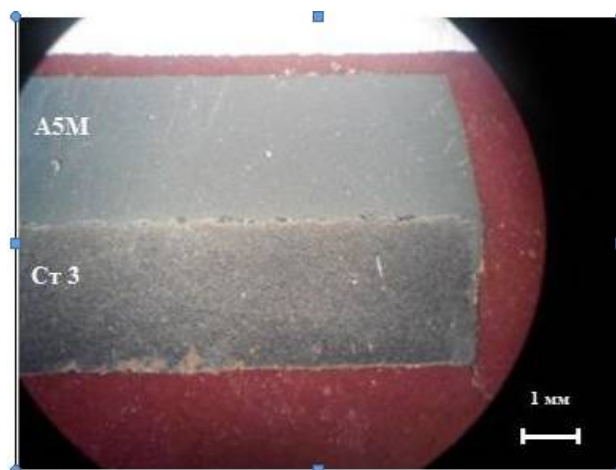


Рисунок 4.23 – Геометрія різа композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» при розкрої за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,7 \text{ м/хв}$); різ з боку алюмінію А5М

Наявність розплаву алюмінію на ділянці сталі ілюструє рисунок 4.23. Досліджувана схема розкрою характеризується відсутністю грата на нижній кромці різа. Проте зниження швидкості обробки в дослідженому діапазоні приводить до утворення значних дефектів у вигляді виривів в нижній частині різа (рисунок 4.24).

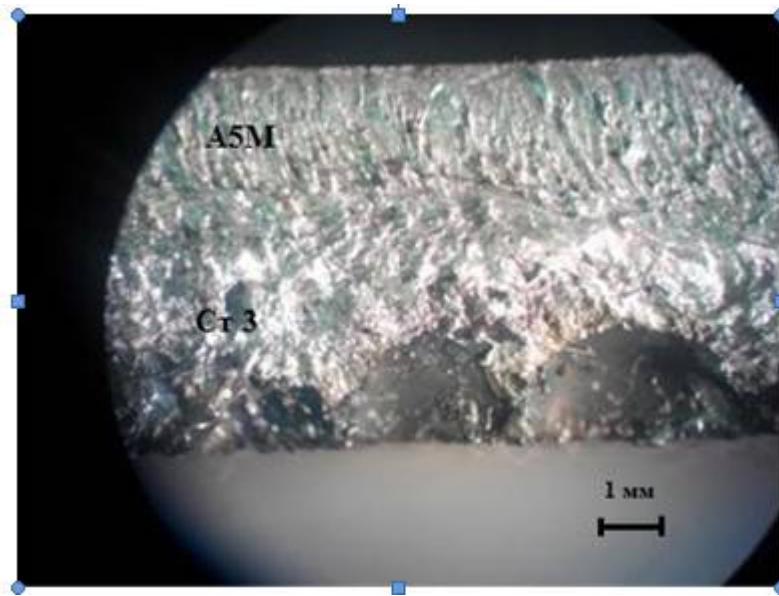


Рисунок 4.24 – Утворення дефектів на поверхні різа композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» при розкрої за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} (I = 50 А, V = 1,3 м/хв); різ з боку алюмінію А5М

Це може бути пояснено тим, що неповне видалення в'язкого розплаву алюмінію викликає нестабільність плазмового стовпа в каналі різа за рахунок подвійного дуговинекання через елементи розплаву алюмінію на ділянці сталевій складовій.

Якщо розкрій композиції з боку сталі забезпечує високу точність різання, то при розкрої з боку алюмінію відхилення різа від перпендикулярності мінімально лише на ділянці сталі Ст3. На ділянці алюмінію А5М відхилення різа від перпендикулярності доходить до 12 ° при обробці на максимальній швидкості, що узгоджується з результатами досліджень по розкрою алюмінію, представлених в розділі 3.2.2. справжньої

роботи. Низька точність різа пояснюється високим коефіцієнтом теплопровідності даного матеріалу. Відносне підвищення точності різа (до 7 °) на ділянці алюмінієвої складової досягається на мінімальній швидкості обробки (рис. 4.25). Проте при цьому, як було відмічено вищим, спостерігається утворення виривів на ділянці сталі Ст3.

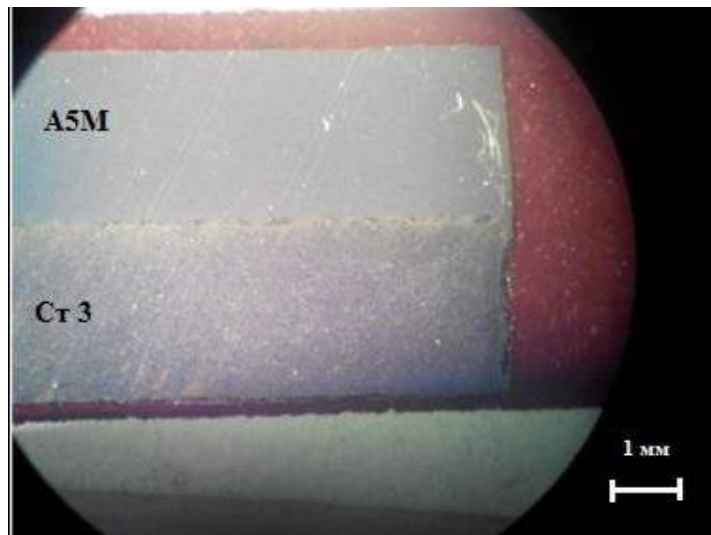


Рисунок 4.25 – Геометрія різа композиції «сталі Ст3 + алюмінію А5М» при розкрії за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,3 \text{ м/хв}$);
різ з боку алюмінію А5М

4.2.2 Обробка на режимах розкрою алюмінієвих сплавів

Перехід до дослідження технологічної схеми Ні – Focus на режимах обробки алюмінієвих сплавів при незмінності струмового режиму і порівнянності швидкостей розкрою передбачає зниження газодинамічних потоків в каналі різа унаслідок зменшення тиску плазмовиникаючого газу в 2 рази в порівнянні з попередньою схемою.

Ідентичність технологічних схем Ні – Focus і Ні – Focus^{plus} з енергетичних позицій дозволяють передбачати схожість в характері формування каналу різа. Дійсно, в каналі різа на ділянці алюмінію (при розкрію з боку сталі Ст3) має місце підсереднення, заповнене розплавом сталі (рис. 4.26).

Використання в технологічній схемі Ні – Focus для розкрою алюмінієвих сплавів зниженого тиску плазмовинекаючого газу зумовлює зниження інтенсивності газодинамічних потоків і, як наслідок, збільшення грата на нижній кромці різа в порівнянні з схемою Ні – Focus^{plus} на режимах розкрою вуглецевих сталей. Розкрій біметала з боку сталі Ст3, як і в попередній схемі, забезпечує на верхній ділянці композиції хорошу точність різа (відхилення від перпендикулярності не перевищує 1,5 – 2,0 °). Геометрія і шорсткість на ділянці алюмінієвої складової визначається морфологією обложеного розплаву стали після його застигання.

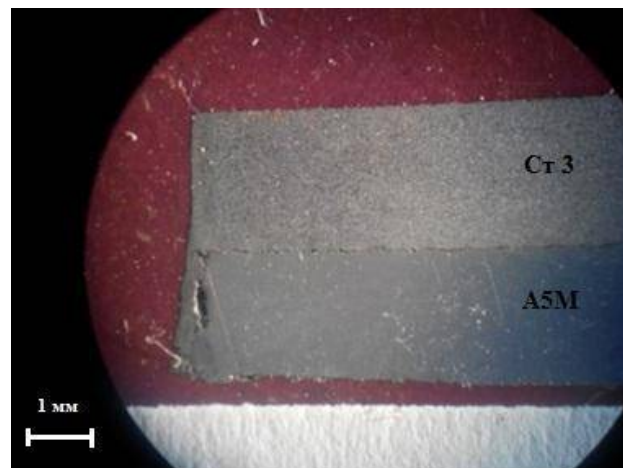


Рисунок 4.26 – Геометрія різа композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» при розкрої за технологічною схемою Ні – Focus ($I = 50$ А, $V = 1,1$ м/хв); різ з боку сталі Ст3

Зміна схеми обробки на розкрій з боку алюмінію за технологічною схемою Ні – Focus на режимах обробки алюмінієвих сплавів привело до не прорізу на всю товщину біметала на швидкості 1,5 м/хв. Це пояснюється тим, що в даній схемі дослідження ділянка сталі Ст3 знаходиться в зоні дії факела плазмової дуги (рис. 1.7), що володіє найменшою енергоефективністю.

В цілому, характер формування різа, його точність і мікрогеометрія виявився подібним результатам розкрою досліджуваної композиції за технологічною схемою Ні – Focus^{plus}.

4.3 Низьковуглецева сталь Ст3 + мідь М1

Ще одним представником зварного з'єднання різнорідних металів, досліджуваних в дисертаційній роботі, є біметалічна композиція «вуглецева сталь Ст3 + мідь М1». Як і в разі з'єднання вуглецевої сталі з алюмінієм, в даній біметалічній композиції матеріали володіють теплофізичними властивостями, що різко розрізняються. Так в сталі Ст3 температура плавлення $T_{пл} = 1539 \text{ } ^\circ\text{C}$, а теплопровідність = 37 ккал/м·год·град при $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ (таблиця 2.3), а в міді $T_{пл} = 1083 \text{ } ^\circ\text{C}$, = 309 ккал/м·год·град при $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ (таблиця 2.12). Істотна різниця в теплофізичних властивостях матеріалів в композиції передбачає їх різну поведінку при термічному різанні біметала.

Слідуючи прийнятим в роботі рекомендаціям по вибору технологічної схеми тонкоструйного плазмового різання матеріалів, встановленими при дослідженні попередніх композицій, і зважаючи на результати обробки модельних матеріалів (розділи 3.1.1, 3.1.3), можливими технологічними варіантами для розкрою пакету товщиною 5 мм можуть бути визнані схеми Ні – Focus і Ні – Focus^{plus} з наступними режимними параметрами:

- Ні – Focus – $I = 45 \text{ А}$, $V = 0,9 \text{ м/хв}$ (рисунок 3.1);
- Ні – Focus^{plus} – $I = 50 \text{ А}$, $V = 1,75 \text{ м/хв}$ (рисунок 3.2).

Враховуючи факт, що в досліджуваній біметалічній композиції при загальній товщині пакету 5 мм ділянку вуглецевої сталі Ст3 складає 3 мм, і зважаючи на результати досліджень по розкрою модельного матеріалу – мідь М1 (розділ 3.2.2), представляється перспективним вивченням можливості використання високопродуктивної схеми Ні – Focus^{plus} для розкрою даного зварного з'єднання.

Як і передбачалося, експериментальні дослідження підтвердили, що істотна різниця в теплофізичних властивостях складових біметала визначила специфіку у формоутворенні каналу різа. Так на рис. 4.27 представлена геометрія поперечного перетину різа біметалічної композиції при розкрої з

боку сталі Ст3 за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} на режимах, призначених для обробки вуглецевих сталей.

В цілому геометрія різа досліджуваної композиції на ділянці сталі Ст3 підкоряється загальним закономірностям формування каналу різа при розкрої вуглецевих сталей при використанні технологій тонкострунного плазмового різання. Це відноситься до показників точності, шорсткості різа і гратовинекнення. На рис. 4.28 показана залежність відхилення різа від перпендикулярності від швидкості обробки.



Рисунок 4.27 – Геометрія різа композиції «сталь Ст3 + мідь МІ» при расах-крої за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,75 \text{ м/хв}$); різ з боку сталі Ст3

Отримані результати в цілому узгоджуються з даними по точності різання модельного матеріалу – сталі Ст3 (рис. 3.7). Слід зазначити утворення напливу розміром 0,15 - 0,17 мм на мідній ділянці композиції (рис. 4.27). Причину утворення подібного дефекту на поверхні різа можна пояснити тим, що певна частина розплаву матеріалу верхньої ділянки (сталі Ст3)), потрапляючи на поверхню різа міді, унаслідок високої теплопровідності

останньою, різко остигає до температур нижче $T_{пл}$, осідаючи у вигляді наплава. Зовнішній вигляд поверхні різа композиції представлений на рис. 4.29.

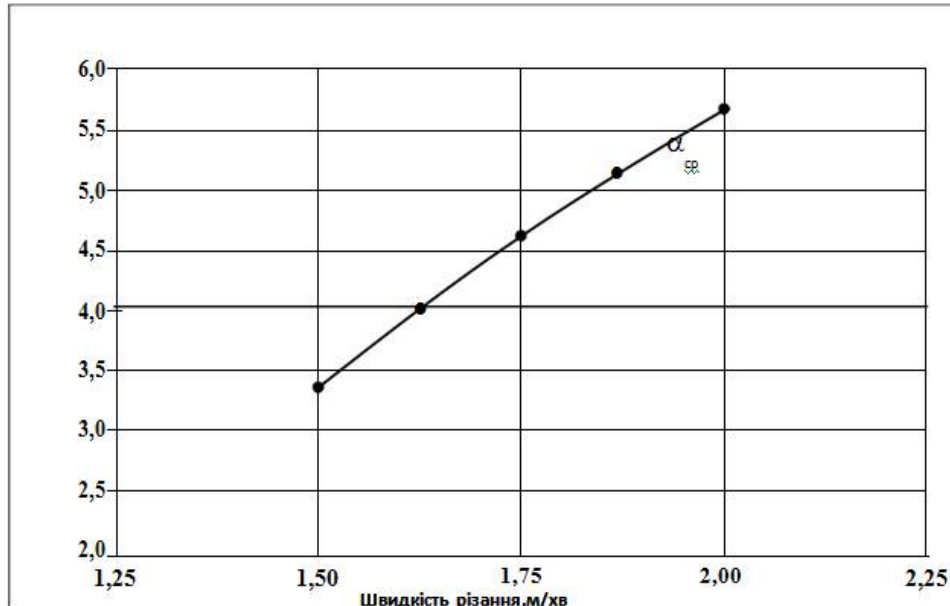


Рисунок 4.28 – Вплив швидкості різання композиції «сталь Ст3 + мідь М1» на точність різання при розкрій з боку сталі Ст3 за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} з $I = 50$ А для вуглецевих сталей

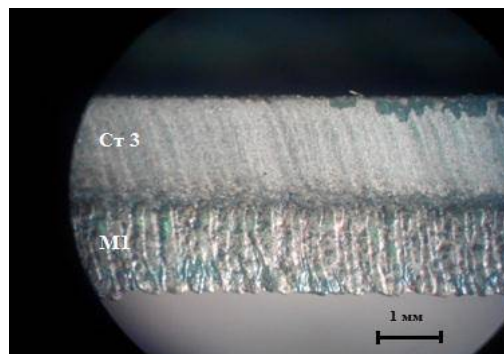


Рисунок 4.29 – Зовнішній вигляд поверхні різання композиції «сталь Ст3 + мідь М1» із слідами розплаву сталі на ділянці міді при розкрій з боку сталі Ст3

Змінення швидкістю розкрою в дослідженому діапазоні (1,5 – 2,0 м/хв) не приводить до помітної зміни геометрії і розмірів напливу розплаву сталі на ділянці міді. Змінюється лише характер стоків від грубіших слідів на максимальних швидкостях до дрібних – на мінімальних (рис. 4.30).

Підвищення швидкості різання також приводить до збільшення кута нахилу стоків, що пояснюється зміною напрямку гідродинамічних потоків в каналі різа.

Аналіз мікрогеометрії поверхні різа на ділянках біметала показав, що шорсткість на ділянці сталі – $Ra = 1,5-2,5$ мкм, мідь - $Ra = 3-6$ мкм, що є характерним для плазмового розкрою окремих складових даної композиції. Також слід зазначити відсутність грата на нижній кромці різа, чому сприяють низькі значення кінематичної в'язкості оброблюваних металів.

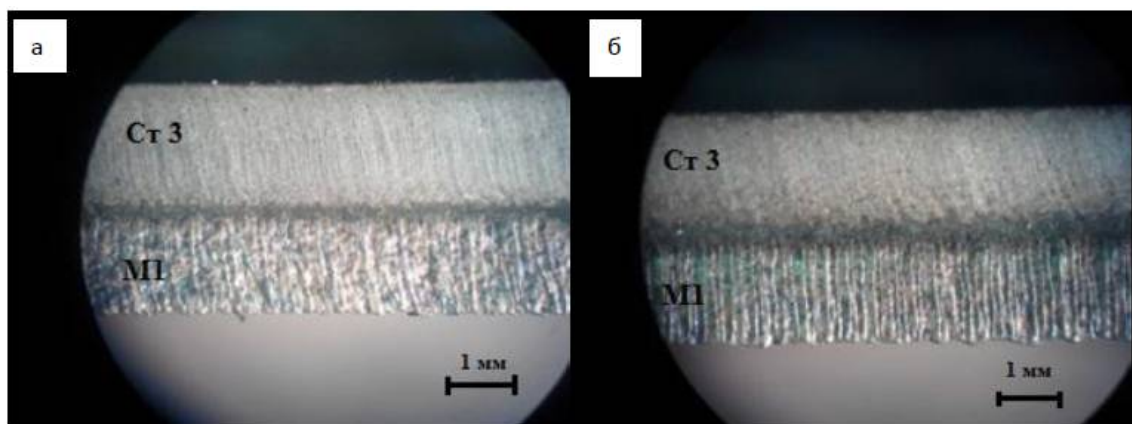


Рисунок 4.30 – Зміна характеру стоків розплаву стали на ділянці міді на швидкостях: а – $V = 2,0$ м/хв; б - $V = 1,5$ м/хв.

Зміна верхньої сторони розкрою біметалічної композиції із сталевую на мідну приводить до істотної зміни, як геометрія різа, так і стани його поверхні. Слід зазначити, що спроба розкрою на максимальній ($2,0$ м/хв) швидкості супроводилася не прорізом пакету на всю товщину. Подібна картина спостерігалася при розкрої композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» з боку алюмінію при максимальній швидкості ($V = 1,7$ м/хв). У обох випадках розкрій починався такою, що з боку становить біметала з максимальною теплопровідністю, що і визначило інтенсивний характер відтоку тепла від плазмової дуги на верхній ділянці композиції, що викликало перерозподіл потужності дуги по товщині різа. У такому разі сталося зниження верхнього кордону швидкості розкрою, що гарантує крізний проріз матеріалу.

Вивчення геометрії різа (рис. 4.31) показало, що на верхній (мідному) ділянці спостерігається формування вузького каналу різа із значним відхиленням його від перпендикулярності. Це повністю відповідає характеру розкрою модельного матеріалу – мідь (розділ 3.2.2), при якому спостерігається значна різниця ширини різа по верхніх і нижніх кромках (рис. 3.19, 3.20), обумовлюється відхилення різа від перпендикулярності від $4,55^\circ$ до $5,7^\circ$ у дослідженому діапазоні швидкостей [88].

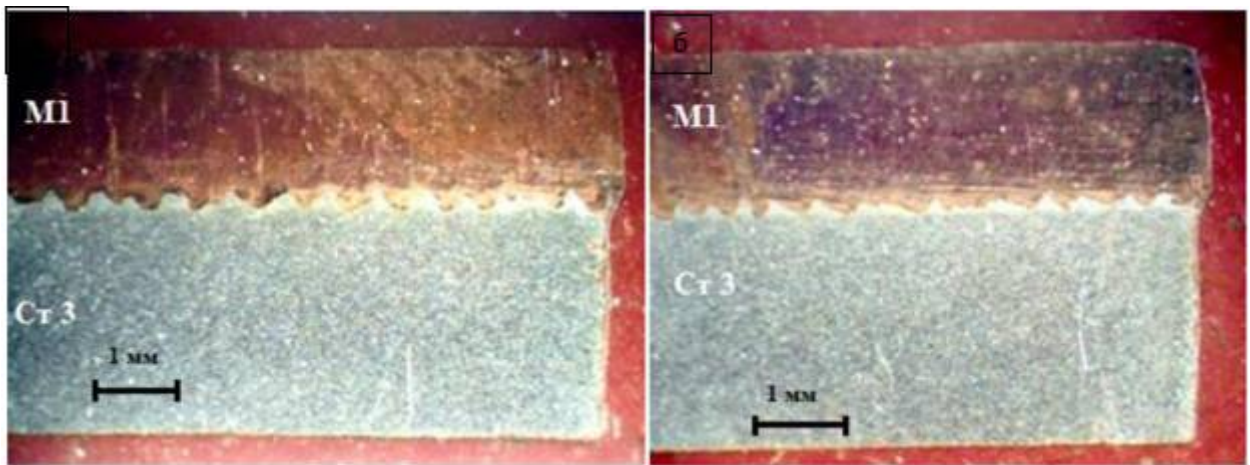


Рисунок 4.31 – Геометрія різа композиції «сталь Ст3 + мідь М1» при розкрої за технологічною схемою Ні – Focus^{plus} ($I = 50$ А); різ з боку міді М1:

а – $V = 1,75$ м /хв; б $V = 1,5$ м /хв.

На нижній (сталевому) ділянці різа біметала спостерігається розширення каналу різа на $\sim 0,25$ мм на сторону, при цьому відхилення різа від перпендикулярності практично відсутнє. Дійсно, при одних і тих же технологічних параметрах розкрою для вуглецевих сталей характерне формування каналу різа більшої ширини в порівнянні з міддю. При цьому показники точності для сталі істотно вищі. Останнє можна пояснити таким поєднанням технологічних параметрів процесу (в першу чергу, щільність потужності дуги) і теплофізичних властивостей вуглецевих сталей (теплопровідність, температура плавлення) при якому досягається більш

менш рівномірна теплонапружність процесу нагріву по всій довжині каналу різа.

Вивчення стану поверхні різа дозволяє визначити особливості формування каналу різа при розкрої композиції з боку міді (рисунок 4.32). Якщо на верхній ділянці (мідь) чітко є видимими сліди взаємодії плазмової дуги з оброблюваним металом [88], то на ділянці сталі топографія поверхні інша. Остання є чергуванням слідів у вигляді хвиль з набагато більшим кроком, чим на верхній ділянці. Ймовірно, формування подібного рельєфу пов'язане з тим, що на нижній ділянці безпосередньої взаємодії плазмової дуги з оброблюваним матеріалом не відбувається, а процес теплопередачі здійснюється через потоки розплаву мідь, що стікає з верхньої ділянки. У такому разі теплове джерело на ділянці сталі є рідкою ванною мідного розплаву. Цим можна пояснити подібний рельєф в нижній частині біметала. Варіювання швидкістю різа в цілому не міняє картини формування рельєфу.

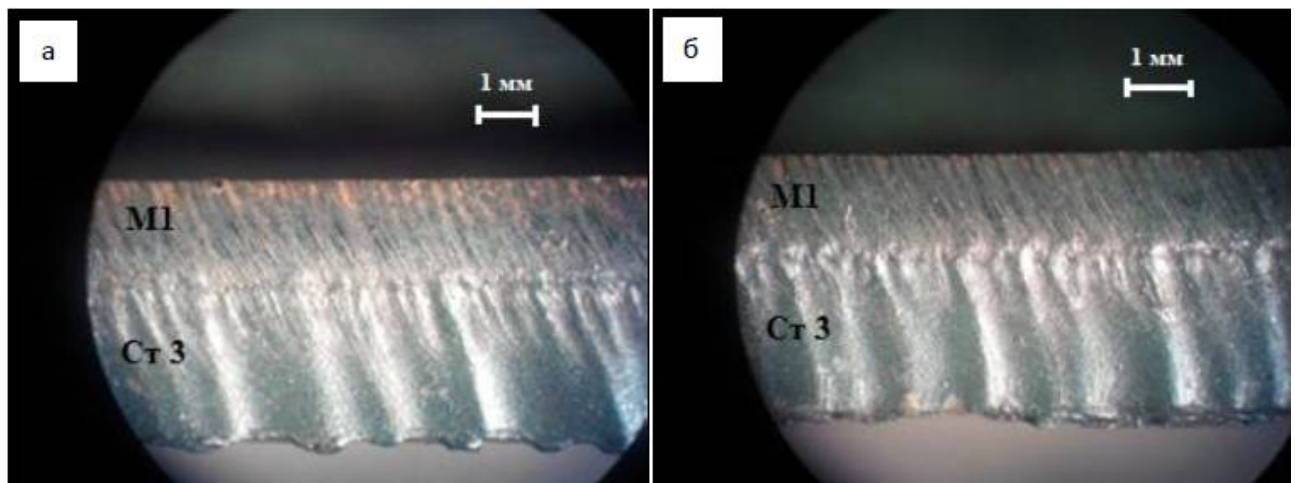


Рисунок 4.32 – Особливості формування рельєфу поверхні різа композиції «сталь Ст3 + мідь М1» при розкрої з боку міді на швидкостях: а – $V = 1,75 \text{ м /хв}$; б - $V = 1,5 \text{ м /хв}$

Утворення хвилеподібного рельєфу на поверхні різа приводить до погіршення мікрогеометричного його стану і наявності певної доли грата на нижніх кромках різа.

4.4 Технологічні рекомендації по розкрою біметалічних композицій з використанням тонкоструйного плазмового різання

Проведені технологічні експерименти, направлені на вибір технологічних схем, призначення режимних параметрів розкрою листових металевих матеріалів, а в разі обробки біметалічних композицій і встановлення лобової сторони різа засновані на оптимізації процесу по критеріях точності і якості обробки. Металографічні і рентгенофазове дослідження дозволили виявити особливості формування каналу різа при тонкоструйному плазмовому розкрої досліджуваних біметалічних композицій. Сукупність отриманих результатів дозволяє сформулювати узагальнені технологічні рекомендації по розкрою біметалічних композицій з використанням тонкоструйного плазмового різання:

1. Набор прийнятних технологічних схем по розкрою конкретний біметалічній композиції з існуючої композиції повинен визначатися класами матеріалів, представлених в композиції.

2. Призначення режимних параметрів (вигляд плазмовинекаючого і завихрюючого газів, їх тиск і витрата, струмовий режим, орієнтовний діапазон швидкостей обробки) слід здійснювати виходячи з товщини пакету біметалічної композиції.

3. За наявності у виборі декількох технологічних схем, що є характерним для обробки в діапазоні малої і середньої товщини різа, перевагу слід віддати схемі з найменшим значенням струмового режиму, що забезпечує формування найменшої ширини різа, а отже, що реалізовує найкращі умови для видалення продуктів розплаву, забезпечуючи сприятливу морфологію поверхні різа і мінімізуючи гратовинекнення на його кромках.

4. Якщо в біметалічній композиції має місце переважання одне з матеріалів по товщині, то вибір технологічної схеми має бути орієнтований на цей матеріал і розкрій композиції необхідно проводити з його боку.

5. При порівнянності товщини матеріалів, складових біметалічну композицію, технологічна схема розкрою повинна відповідати матеріалу з

найменшою кінематичною в'язкістю розплаву і найменшою схильністю до утворення тугоплавких хімічних сполук елементів розплаву з газовим середовищем в каналі різа.

6. При виборі лобової сторони розкрою біметалічної композиції необхідно мати на увазі, те, що матеріал з підвищеною в'язкістю розплаву повинен знаходитися в нижній частині пакету.

7. Для біметалічних композицій матеріалів, що володіють істотною різницею в температурах плавлення характерне розширення каналу різа, якщо матеріал з мінімальною температурою плавлення знаходиться в нижній частині пакету.

8. Вибір як лобова сторона матеріалу з високою теплопровідністю приведе до формування різа із значним відхиленням від перпендикулярності на його ділянці. Зміна лобової сторони дозволить підвищити точність різання на ділянці матеріалу з високою теплопровідністю, але можливе осадження на нім елементів розплаву з верхньої ділянки.

9. При призначенні режимних параметрів розкрою біметалічної композиції з матеріалом з високою теплопровідністю у верхній частині пакету швидкість розкрою слід призначати ближче до нижнього кордону рекомендованого діапазону. Інакше виникає небезпека не прорізу пакету на всю товщину.

10. Для виключення утворення дефектів на поверхні різа і гратовинекнення на його нижніх кромках при розкрої біметалічних композицій, до складу яких входять матеріали, схильні до утворення нітриду і оксидів в процесі різання, слід вибирати технологічні схеми з інертними газами як плазмовинекаючі і завихряючі.

11. Для ефективного видалення продуктів розплаву з каналу різа для обробки композицій, складовими якої є матеріали з підвищеною кінематичною в'язкістю, слід рекомендувати технологічні схеми з максимальними значеннями тиску і витрат плазмовинекаючих і завихряючих газів.

12. Поліпшення газодинамічних потоків в каналі різа можливо при подальшому вдосконаленні як конструкції елементів плазмотрона, так і при створенні нових технологічних схем (введення додаткового обдування).

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

5.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності

Устаткування, призначене для плазмового різання металу, володіє рядом особливостей, через що під час роботи на даному устаткуванні правила техніки безпеки декілька відрізняються від загальноприйнятих. Розглянемо, що необхідно зробити для того, щоб робота на верстатах плазмового різання металу була безпечною.

Як відомо, процес різання металу на даному вигляді устаткування здійснюється за рахунок створення електричної дуги. Для того, щоб створити таку дугу на верстат подається напруга в 10 кВт. Дана напруга є небезпечною для людини, тому необхідно зробити всі заходи до того, щоб фахівець працює на верстаті не отримав пошкодження електричним струмом. Тобто устаткування повинне, як мінімум мати заземлення, і наявність заземлення необхідно перевіряти кожного разу перед

Під час роботи на даному устаткуванні виникають такі небезпечні чинники, як розплавлені краплі металу, яскрава електрична дуга, утворення небезпечних для здоров'я газів і пилу. Від всіх цих чинників фахівець, що працює на верстаті, має бути захищений, і ось тут необхідно враховувати, що захисними засобами обладнався не лише верстат. Робітник також повинен володіти необхідними захисними засобами і уміти ними користуватися. Зокрема, робітник допускається до роботи лише за наявності нього вогнетривкого одягу, засобів тих, що захищають очі від поразки сітківки ультрафіолетовим випромінюванням.

Згідно з правилами по охороні праці, верстати плазмового різання металу встановлюються в спеціально обладнаному приміщенні. У даному приміщенні має бути присутньою вентиляція і абсолютно не допускається зберігання легкозаймистих речовин. Окрім цього, буде розумно змонтувати в цьому приміщенні електрощит, через який в разі екстреної необхідності стане можливим відключити подачу електроенергії на устаткування.

При роботі на верстатах плазмового різання забороняється проводити обробку оцинкованих матеріалів і матеріалів, на яких є лакофарбне покриття, оскільки ці матеріали при нагріві виділяють небезпечні гази, вдихання яких може привести до пошкодження легенів людину.

5.2 Вимоги перед початком робіт

5.2.1 Надіти спецодяг, застебнути і заправити так, щоб не було звисаючих частин. Волосся прибрати під щільно облягаючий головний убір.

5.2.2 Перевірити справність засобів індивідуального захисту і запобіжних засобів.

5.2.3 Оглянути і привести в порядок робоче місце.

5.2.4 Перевірити справність устаткування, електропроводки, наявність і справність заземлення.

5.2.5 Перевірити наявність води і вільне її проходження через водоохолоджувані елементи (плазмотрон).

5.2.6 Перевірити справність приладів, регулюючих роботу установки.

5.2.7 Перевірити стан електричних дротів і контактів.

5.2.8 Забезпечити вільне пересування рухомих частин різальної машини від зачіпання шлангів і кабелю, що сполучають машину з джерелом живлення.

5.2.9 Перевірити справність шлангів, різаків, манометрів, робочі поверхні направляючих і провідних елементів різальних машин.

5.2.10 Включити воду і переконатися в її вступі і сливі з різака.

5.2.11 Відкрити вентилі повітря і відрегулювати його витрату, включити вентиляцію.

5.2.12 Встановити заданий техпроцесом струм різання.

5.2.13 Включити рубильником щит електроживлення, при цьому вимикачі на пульті управління, а також на різальних машинах повинні знаходитися в положенні «вимкнено».

5.2.14 Встановити у вихідне положення установку.

5.2.15 Встановити регулювальником швидкості на механізацію пересування різача необхідну швидкість руху залежно від товщини і матеріалу по техпроцесу.

5.2.15 Встановити регулювальником швидкості на механізацію пересування різача необхідну швидкість руху залежно від товщини і матеріалу по техпроцесу.

5.2.16 Включити автоматичний вмикач ланцюгів управління, натисненням тумблера запалити чергову дугу.

5.2.17 Включити хід різача на механізмі переміщення. Коли чергова дуга торкнеться металу, що розрізає, збудитися робоча дуга, необхідно відключити чергову дугу (автоматично або шляхом перемикання тумблера).

5.2.18 Про всі відмічені недоліки, несправностях в устаткуванні і про виниклі небезпеки повідомити.

5.2.19 До роботи можна приступати лише після усунення всіх несправностей.

5.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

5.3.1 Відкриті струмоведучі частини установок мають бути або електрично ізольовані від струмоведучі частин, або заземлені, або покриті електричним ізоляційним матеріалом.

5.3.2 Пристрої для автоматичної і напівавтоматичної обробки повинні мати блокування, що виключає шунтування нормально розімкнених контактів в ланцюзі живлення котушки пускача або контактора за відсутності зварювальної дуги.

5.3.3 Управління автоматичною і напівавтоматичною обробкою повинне вироблятися дистанційно. Подача напруги холостого ходу на установку до появи чергової дуги повинна вироблятися кнопкою «Пуск» контактора без самоблокування. Блокування кнопки «Пуск» повинне здійснюватися автоматично після збудження чергової дуги.

5.3.4 Робота установки відбувається в наступній послідовності:

— при подачі напруги холостого ходу джерела живлення між електродом і соплом плазмотрона за допомогою збудника дуги генеруються імпульси струму, що періодично повторюються, які створюють видимий факел допоміжної дуги;

— основна ріжуча дуга збуджується автоматично при зіткненні факела допоміжної дуги з кромкою або поверхнею виробу;

— після досягнення струмом ріжучої дуги встановленого значення процес різання протікає стабільно;

— закінчення процесу різання відбувається при виключенні силового ланцюга джерела живлення або автоматично при видаленні установки від виробу і обриву дуги;

— при обриві дуги або виключенні установки напруга з вихідних клем джерела живлення автоматично знімається.

5.3.5 Не слід дивитися на дугу, що утворюється при різанні, незахищеними очима. Необхідно користуватися захисною маскою зі світлофільтром.

5.3.6 Забороняється під час роботи на установці залишати відкритим шафа електроживлення і пульт управління.

5.3.7 Забороняється залишати без нагляду установку з підключеними стислим повітрям, водою і включеною напругою.

5.3.8 Під час роботи забороняється тримати шланги під пахвою, на плечах або затискати ногами. Забороняється допускати зіткнення шлангів з струмоведучими дротами.

5.3.9 При перегріві різача робота має бути зупинена до повного його охолодження.

5.3.10 Не допускати попадання на шланги іскор, вогню або важких предметів, а також дії високих температур.

5.3.11 Забороняється приєднання до шлангів вилок, трійників і тому подібне для живлення декількох різаків.

5.3.12 Необхідно стежити за стійким запаленням дуги. Нестійке запалення дуги свідчить про повне вигорання катодної цирконієвої вставки в мідному водо-охолоджуваному електроді. В разі невчасного припинення роботи на відпрацьованому електроді може статися його крізне прогорання. Це може викликати обгорання водопровідної трубки, електродної гайки, сопла і привести до аварійного руйнування плазмотрона.

5.3.13 Якщо при дотриманні режиму роботи апарату і плазмотрона змінний електрод і сопловий наконечник руйнуються, необхідно перевірити тиск і витрату води, що охолоджує, і повітря, герметичність плазмотрона по воді і повітрю, забезпечити щільне притиснення змінних деталей.

5.3.14 Операторові плазмових установок забороняється проводити ремонт апаратури, різаків і так далі В разі несправності негайно припинити роботу і повідомити майстра.

5.3.15 Забороняється виробляти різання заготовок на вазі, оскільки падіння заготівки може привести до травми і вивести з буд різак.

5.3.16 Не допускати на робоче місце сторонніх осіб.

5.3.17 Для забезпечення безперебійної і тривалої роботи джерела живлення необхідно виробляти щоденні і періодичні огляди, щоб усунути дрібні несправності.

5.3.18 При щоденному обслуговуванні необхідно перевіряти справність дротів, що підводять; справність контактних затисків і роз'ємів на панелі із затисками; заземлення джерела живлення; заземлення виробу, що розрізає, або столу для різання.

5.3.19 При періодичному обслуговуванні (один раз в місяць) необхідно перевіряти захисні огорожування (тимчасові або стаціонарні); безпечне розташування струмоведучих частин; ізоляцію струмоведучих частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна); ізоляцію робочого місця; мала напруга; захисне відключення; заземлення корпусів установок, труб, в яких прокладені дроти; справність дверних блокувань; заземлення стелажу і аркуша, що розрізає; попереджувальну сигналізацію, блокування, знаки безпеки.

5.3.20 Справність захисних засобів слід перевіряти перед кожним вживанням. Захисні засоби, в яких витік термін чергового випробування, застосовувати забороняється.

5.3.21 Перед початком роботи на робоче місце необхідно укласти ізолюючі килимки або підставки.

5.3.22 Про всі випадки обриву електропроводів, несправності заземлюючих пристроїв і інші пошкодження електроустаткування негайно повідомити.

5.3.23 Для запобігання виникненню пожеж необхідно дотримувати наступні вимоги:

— не захарашувати доступи і проходи до протипожежного інвентаря, вогнегасників, гідрантів;

— зберігати горючі і легкозаймисті речовини в спеціально відведених місцях з дотриманням заходів пожежної безпеки;

— палити лише в спеціально відведених місцях, забезпечених протипожежним інвентарем і урнами;

— використаний обтиральний матеріал зберігати в металевому ящику з кришкою, що щільно закривається;

— не проходите з відкритим вогнем до шлангів;

— не чистити і не стирати робочий одяг бензином і іншими легкозаймистими рідинами.

5.3.24 Робоча зона має бути забезпечена протипожежними плакатами і написами.

5.4 Вимоги безпеки після виконання роботи

5.4.1 Після закінчення роботи привести в порядок робоче місце, інструмент і пристосування очистити від грязі і прибрати у відведене для зберігання місце.

5.4.2 Вимкнути електричне живлення установки, а також освітлення і вентиляцію.

5.4.3 Спецодяг і взуття очистити і прибрати в шафу.

5.4.4 Вимити особу і руки теплою водою з милом.

5.4.5 При здачі зміни повідомити керівника робіт про несправності установки, які були виявлені під час роботи.

5.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.5.1 При виникненні ситуацій, які можуть привести до аварій і нещасних випадків (наприклад, при пробіі ізоляції в ланцюзі, течі шлангів, несправному водо-охолодженні або припиненні подачі води), необхідно припинити роботу, відключити подачу електроенергії, вивести з небезпечної зони людей і повідомити про виниклу ситуацію керівникові робіт.

5.5.2 При виникненні аварії негайно прийняти заходи по наданню потерпілим першої допомоги, викликати машину швидкої допомоги.

5.5.3 При виявленні пожежі негайно повідомити в пожежну охорону по телефону 01, сповістити керівництво і до прибуття пожежників приступити до ліквідації вогнища пожежі наявними засобами залежно від матеріалу, що спалахнув.

5.5.4 При нещасному випадку надати пострадавшему першу долікарську допомогу, повідомити про випадок керівництву. По можливості зберегти обстановку, якщо це не приведе до аварії або травмування інших людей. При необхідності викликати бригаду швидкої допомоги по телефону 103 або допомогти доставити потерпілого в медустанову.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі викладені результати досліджень процесів тонкоструйного плазмового різання, що розширюють її технологічні можливості в розкрої біметалічних композицій, отриманих зварюванням вибухом різнорідних матеріалів.

1. На підставі аналітичного огляду існуючих технологій різання матеріалів найбільш перспективною для розкрою біметалічних композицій представляється сучасна модифікація плазмово-дугового різання – тонкоструйне плазмове різання, що забезпечує точність і якість різа металевих матеріалів в діапазоні товщини до 80 мм на рівні лазерних технологій при високих показниках продуктивності і економічності процесу.

2. Вибір прийнятної технологічної схеми і оптимізація режимних параметрів розкрою модельних матеріалів, складових біметалічні композиції, дозволили досягти наступних показників точності і якості різа при розкрої:

- низьковуглецева сталь Ст3: відхилення різа від перпендикулярності складає $\alpha = 3,5^\circ - 4,0^\circ$, шорсткість поверхні різа $Ra = 1,5 - 2,0$ мкм, мінімальна кількість легко відділяемого грата на кромках різа;

- неіржавіюча сталь 12X18H10T: відхилення різа від перпендикулярності на рівні показників різа низьковуглецевої сталі; шорсткість поверхні різа $Ra = 2,5 - 5,8$ мкм, наявність зони осадження розплаву і незначна кількість грата;

- алюміній А5М: відхилення різа від перпендикулярності складає $\alpha = 9,1^\circ - 9,3^\circ$, шорсткість поверхні різа $Ra = \sim 12$ мкм, наявність слідів розплаву на поверхні різа і значна кількість грата на нижній його кромці;

- мідь М1: істотне відхилення різа від перпендикулярності $\alpha = 12,7^\circ - 15,5^\circ$, шорсткість поверхні різа $Ra = 3,0 - 6,0$ мкм, за відсутності слідів розплаву на поверхні різа і грата.

3. Експериментально встановлено, що з можливих технологічних схем розкрою композиції «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» найпривабливішою є

схема Focus^{plus} із струмовим режимом $I = 50$ А для вуглецевих сталей при обробці пакету з боку сталі Ст3. Це забезпечує досягнення максимальної точності різання ($\alpha \rightarrow 0$), як на окремих ділянках біметала, так і для пакету в цілому, висока якість поверхні різання ($Ra = 1,5 - 2,0$ мкм), повна відсутність грата на нижніх кромках різання при високій швидкості розкрою ($V = 1,5$ м/хв).

4. Найкращі показники точності і якості розкрою біметалічної композиції «сталь Ст3 + алюміній А5М» досягнуті при обробці пакету з боку сталі Ст3 за технологією Focus^{plus} з режимами для вуглецевих сталей ($I = 50$ А, $V = 1,5$ м/хв). Висока точність різання (відхилення від перпендикулярності $\alpha \sim 1,5^\circ$) і низька шорсткість ($Ra = \sim 2,5$ мкм) спостерігається на верхній (сталевому) ділянці біметала. На нижній (алюмінієвому) ділянці має місце розширення каналу різання до $0,1 - 0,2$ мм на сторону з осадженням розплаву стали.

5. Використання технологічної схеми Hi-Focus^{plus} на режимах розкрою вуглецевих сталей ($I = 50$ А, $V = 1,75$ м/хв) забезпечує прийнятну якість різання композиції «сталь Ст3 + мідь М1» при розкрої пакету з будь-якого боку. Так при розкрої з боку сталі Ст3 мінімальне відхилення різання від перпендикулярності ($\alpha = 3,3^\circ$) в дослідженому діапазоні швидкостей спостерігається при $V = 1,5$ м/хв. При цьому в каналі різання на ділянці міді формується наплив розміром $0,15 - 0,17$ мм. Шорсткість на ділянці сталі складає $Ra = 1,5 - 2,0$ мкм, мідь - $Ra = 3,0 - 6,0$ мкм. Наголошується повна відсутність грата на нижніх кромках різання навіть при максимальних ($2,0$ м/хв) швидкостях обробки. Зміна лобової сторони розкрою з стали на мідь привело до не прорізу біметалічного пакету на максимальній ($2,0$ м/хв) швидкості.

6. Експериментально підтверджено, що досліджувані композиції металевих матеріалів, отримані зварюванням вибухом, мають хвилеподібний характер зварного з'єднання з проявом в різній мірі ламінарного, вихрового і турбулентного перебігу матеріалів. Теоретично розраховані і експериментально визначені параметри хвиль, довжини яких знаходяться в

діапазоні від 500 до 800 мкм, а їх амплітудні значення – від 110 до 250 мкм. Не дивлячись на хвилеподібний характер зварного шва і складна будова матеріалу біметалічну композицію в умовах тонкоструйного плазмового різання можна розглядати як плоске без щільне, вакуумний щільне з'єднання двох металів, що розрізняються між собою по механічних і теплофізичних властивостях.

7. Засобами металографічного аналізу підтверджена правомірність рішень по вибору технологічних схем обробки, призначенню режимних параметрів і встановленню лобової сторони розкрою досліджуваних біметалічних композицій, прийнятих по оцінками геометричної точності, якості різа і гратовиникнення.

Металографічні дослідження виявили у всіх розплавах дефекти в вигляді пор, тріщин, окремих фрагментів матеріалів з'єднання.

8. Виявлена наявність зон термічного впливу на ділянках низьковуглецевої сталі, обумовлене високошвидкісним локальним характером теплової дії при тонкоструйному плазмовому різанні. Розмір зони термічного впливу складає 250 – 300 мкм при розкрої композицій з боку сталі Ст3 і 150 – 180 мкм при розкрої із зворотного боку пакету. Структура зони термічного впливу є крупноїгольчатий мартенсит, характерний при гартуванні низьковуглецевих сталей. Встановлений характер розподілу мікротвердості в межах зони термічного впливу з максимальним значенням 3500 – 4200 МПа в поверхні різа.

9. Розроблені технологічні рекомендації по тонкоструйному плазмовому розкрою як окремих матеріалів, так і біметалічних композицій з позицій вибору технологічних схем, призначення режимних параметрів і встановленню лобової сторони розкрою пакету.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1982. - 400 с.
2. Суханов Д.А. Повышение конструктивной прочности сталей формированием тонкодисперсной слоистой структуры: дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Суханов. – Новосибирск, 2002. – 198 с.
3. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А. Дерибас; отв. ред. С.С. Григорян. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
4. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом / И.Д. Захаренко; АН БССР, Витеб. отд-ние Ин-та физики твердого тела и полупроводников. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
5. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 197с.
6. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межв. сб. науч. тр. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – 128 с.
7. Волнообразование при высокоскоростном симметричном соударении металлических пластин / В.В. Пай [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т.42, №5. – С. 132-137.
8. Хант Дж. Н. Образование волн при сварке взрывом / Дж.Н. Хант // Механика – 1969. - №1. – С. 140-150.
9. Кондратюк С.Е. Металознавство та обробка металів. – К.: ВІКТОРІЯ, 2000. – 372 с.
10. Процессы обработки металлов взрывом: учеб. пособие для вузов // А.В. Крупин [и др.]. – М.: Металлургия, 1996. – 335 с.
11. Сологуб М.А. Технологія конструкційних матеріалів. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.

12. Шморгун В.Г. Расчетное определение оптимальных параметров сварки взрывом / В.Г. Шморгун // *Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр.* – Волгоград: ВолгГТУ, 1997. – С. 26 - 28.
13. Злобин Б.С. Сварка взрывом стали с алюминием / Б.С. Злобин // *Физика горения и взрыва.* – 2002. – Т.38, №3. – С. 137 - 140.
14. Оценка параметров соударения при сварке взрывом / В.Г. Шморгун, А.П. Соннов, Ю.П. Трыков, И.А. Ковалев // *Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр.* – Волгоград: ВолгГТУ, 1997. – С. 20-25.
15. Конон Ю.А. Сварка взрывом / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский; под ред. В.М. Кудинова. – М.: Машиностроение, 1987. – 214 с.
16. Айнбиндер С.Б. Холодная сварка металлов / С.Б. Айнбиндер. – Рига: АН ЛатвССР, 1957. – 163 с.
17. Исследование влияния опоры в процессе сварки взрывом / Б.Д. Цемахович [и др.] // *Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами: Матер. 5-го Междун. симпоз. Готвальдов, 1982.* - С. 45 - 49.
18. Кондратюк С.Е. *Металознавство та обробка металів.* – К.: ВІКТОРІЯ, 2000. – 372 с.
19. Захаренко И.Д. Определяющие процессы при сварке взрывом. – *Физика горения и взрыва, 1979.* - № 3.
20. Абрахамсон Г.Р. Остаточные периодические деформации поверхности под действием перемещающейся струи. – *Труды Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Е. Прикладная механика, 1961, Т.28, № 4.* С. 45 - 55.
21. Фролов В.В. *Теорія зварювальних процесів.* М.: Вища школа, 2007. - 539 с.
24. Тауфер Г.Ш. Лазерная гибридная сварка. *Международ. конф. «Сварка и соединение 2000».* Израиль, 18-20 июля 2000. - С. 52 -61.
25. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. *Лазерная сварка металлов.* М.: Высшая школа, 1988. - 207 с.

26. Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М. Лазерные технологии машиностроения: Учеб. пособие (Новосиб. гос. ун-т). Новосибирск, 2004. - 142с.
27. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981. - 689 с.
28. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. М.: Высшая школа, 1988. - 127 с.
29. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М., Наука, 1979.
30. Технологические лазеры. В 2 т. М.: Машиностроение, 1991. Т 1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Под ред. Г.А. Абильситова. - 432 с.
31. Малов А.Н., Малов Н.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Печурин В.А., Филев В.Ф. Резка толстых металлических пластин излучением СО₂-лазера с самофильтрующим резонатором // Тр. 4-ой Междунар. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации». С-Петербург, 23 - 28 сент. 2003. - С. 39 - 47.
32. Афонин Ю.В., Ермолаев Г.В., Малов А.Н., Малов Н.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Печурин В.А., Филев В.Ф. Экспериментальное исследование газолазерной резки малоуглеродистой стали // Тр. 4-ой Междунар. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации». С-Петербург, 23 - 28 сент. 2003.
33. Steel William M. Laser material processing. Springer – Verlag, 1991.
34. Powell J., Mensis I.A. Industrions Laser 3rd International Cjference in Lasers in Manufacturing (LTM). P, 1986. P. 276 - 277.
36. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов.- М.: Машиностроение, 1989. - 304 с.
37. Терегулов Н.Г., Соколов Б.К., Вартанов Г., Малышев Б.С., Нега-нов М.И., Ерофеев Е.Ю.. Лазерные технологии на машиностроительном за-воде. Уфа. 1993. - 263 с.

38. Коваленко В.С., Романенко В.В. Технологические характеристики резки металлических материалов лазерным излучением. Технология и организация производства. 1980. - 263 с.
39. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 336 с.
40. Гузов С.Г. Исследование влияния чистоты кислорода на производительность и качество разделительной кислородной резки / С.Г. Гузов // Кислородная резка. ВНИИАВТОГЕНМАШ, 1954. - № 4. – С.34 – 39.
41. Сухинин Г.К. Резка металлов большой толщины. – М.: Машиностроение, 1983.
42. Никифоров Н.И., Антонов И.А., Нешумова С.П. Газопламенная обработка металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1993.
43. Шустик А.Г. и др. – Справочник по газовой резке, сварке и пайке, 1989.
44. Спектер О.Ш., Сухинин Г.К. Кислородная резка высокопрочных сталей. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1980.
45. Головченко В.С., Доброленский В.П., Мисюров И.П. Тепловая резка металлов в судостроении. – Л.: Судостроение, 1975.
46. Антонов И.А. Газопламенная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1976.
48. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Пламенная и газотермическая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1993. Сварка. Резка. Контроль: Справочник / Под общей ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. Т1/ Н.П. Алешин, Г.Г.Чернышов, Э.А. Гладков и др., 624 с.
49. ГОСТ 14792-80 Детали и заготовки, вырезаемые кислородной и плазменно-дуговой резкой. Точность, качество поверхности реза
50. Быховский Д.Г. Плазменная резка. – М.: Машиностроение, 1972. – 348 с.

51. Медведев А.Я. Установки плазменной резки pvertex PC 40, 60, 100 / А.Я. Медведев // Сварочное производство. – 1994. - № 4. – С. 39 – 41.
52. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка перспективный способ термической резки / К.В. Васильев // Сварочное производство. – 2002. - № 9. – С. 26 – 28.
53. Severance W. How plazma Arc Cutting cases / W. Severance, D. Adeerson // Schweisstechnik. – 1972. - № 12. – S. 555 – 558.
54. Васильев К.В. Воздушно-плазменная резка. М.: Машиностроение, 1976. – 482 с.
55. Васильев К.В. Промышленное применение высокоэффективного процесса супервоздушно-плазменной резки / К.В. Васильев, В.И. Кожевников, Л.О. Кохлянян // Сварочное производство, 1982. - № 6. – С. 13 – 14.
56. Васильев К.В. Современные задачи и перспективы развития плазменно-дуговой резки / К.В. Васильев // Тр. Междунар. конф. ЭЛТЕХ 2001, С. Петербург. – 2001. – С. 27 – 29.
57. // Физическая природа низкотемпературной плазмы: [сайт]. URL: // www.stroitelstvo-new.ru/plasma/dugovogo-razryada.shtml
58. Рахимьянов Х.М. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости реза / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11 – 13 нояб. 2013 г. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 349 – 353.
59. Рахимьянов Х.М. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов, Ю.В. Никитин // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, материаловедение. – 2013. № 3 (60). – С. 25-30
60. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке / А.А. Локтионов // Обработка металлов:

технология, оборудование, инструменты, материаловедение. – 2013. - № 4 (61). – С. 86 – 91.

61. Рахимьянов Х.М. Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Ползуновский альманах. – 2012. - № 1. – С. 158 – 159.

62. Рахимьянов Х.М. Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Инновации в машиностроении: тр. 2 Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 416 – 419.

63. Локтионов А.А. Тонкоструйная плазменная резка как эффективная технология в заготовительном производстве / А.А. Локтионов, В.В. Захаров // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 2 – 4 дек. 2011 г.: в 6 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч.

2– С. 29 – 30.

64. Рахимьянов Х.М. Особенности формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Инновации в машиностроении: труды 1 Междунар. науч.-практ. конф. г. Бийск, 7 – 9 окт. 2010. – С. 90 – 91. Рахимьянов Х.М. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всерос. науч.-практ. конф., посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова Ивана Ивановича: сб. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 151 – 153.

66. Рахимьянов Х.М. Моделирование процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // Научный вестник НГТУ, 2009. - № 4 (37). – С. 123 – 134.

67. Рахимьянов Х.М. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // *Обработка металлов*. 2009. - № 4 (45). – С. 31 –37.

68. Рахимьянов Х.М. Повышение точности реза при тонкоструйной плазменной обработке / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // *Механики XXI века: сб. докладов VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Братск, 18 – 20 марта 2008 г.* – Братск: Изд-во ГОУ ВПО БРГУ, 2008. – С. 200 – 202.

69. Рахимьянов Х.М. Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // *Высокие, критичные электро – и нанотехнологии: труды Всероссийской научно-технической конференции – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011.* – С. 37 – 41.

70. Локтионов А.А. Износ расходных элементов плазматрона при термической резке листового материала / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов II Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. (Иркутск, 25- 27 апреля 2012 г.) / под ред. Профессора С.А. Зайдеса.* – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 61 – 65.

71. Рахимьянов Х.М. Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени их износа на точность формообразования / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // *Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10 Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2012 г.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 68 – 71.

72. Kirkpatrick, Ian. "High definition plasma-an alternative to laser technology." *Aircraft engineering and Aerospace technology* 70.3 (1998): 215 - 217.

73. Солоненко О.П. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, В.В. Марусин, Х.М. Рахимьянов [и др.]; ред.: М.Ф. Жуков, В.М. Фомин; Сиб. отд-ние Рос. акад. наук, Ин-т теорет. и прикладной

механики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с.: ил., табл. – (Низкотемпературная плазма. Т. 18).

74. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Л: Машиностроение, 1987. - 192 с.

75. Instruction manual of the plasma cutting machine HiFocus 130 + PGE-NM for the CNC-controlled cutting with Plasma Torch PerCut 160/170 (HiFocus^{plus} – technology). – www.kjellberg.de

76. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К.: Либідь, 2002. — 328 с.

77. www.hypertherm.com

78. ГОСТ 380 – 2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки

79. ГОСТ 5582 – 75 Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия

80. ГОСТ 21631 – 76 Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия

81. ГОСТ 495 – 92 Листы и полосы медные. Технические условия ISO 9013: 2002. Різання теплове. Класифікація різання, отриманих тепловим способом. Геометричні характеристики виробів і допуски на характеристики.

82. ГОСТ 9450 – 76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников

83. Рахимьянов Х.М Моделирование тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Лунин // Инновации в машиностроении: тр. 2 Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 161 – 165.

85. Рахимьянов А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей / А.Х. Рахимьянов // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014. - № 2 (63). – С. 46 – 55.

86. Рахимьянов А.Х. Влияние режимов тонкоструйной плазменной резки на качество обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т / А.Х. Рахимьянов, Х.М. Рахимьянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 78 –83.

87. Рахимьянов А.Х. Технологические особенности плазменного раскря алюминиевых сплавов / А.Х. Рахимьянов, Б.А. Красильников // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 71 – 77.

88. Рахимьянов А.Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов / А.Х. Рахимьянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 66 –68.

89. Рахимьянов Х.М. Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов при тонкоструйной плазменной резке листовых материалов / Х.М. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, А.А. Локтионов, С.В. Лунин // Высокие, критические электро – и нанотехнологии [Электронный ресурс]: Всерос. науч.-техн. конф.: программа конф.: сб. трудов конф. – Тула: ТулГУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD – ROM). – Загл. с этикетки контейнера.

90. Рахимьянов К.Х. Исследование обрабатываемости стали Ст3 методом тонкоструйной плазменной резки / К.Х. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф // Ползуновский альманах. – 2012. - № 1. – С. 121 – 124.

91. Рахимьянов Х.М. Исследование обрабатываемости стали 12Х18Н10Т методом тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, К.Х. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф, В.В. Захаров // Инновации в машиностроении: тр. 4 Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск 2 – 4 окт. 2013 г. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 38 – 44.

92. Чиеу Куанг Фи. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: Автореф. дис...канд. техн. наук 05.08.04, Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2008. - 20 с.

93. Урвачев В.П., Кочетков В.В., Горина Н.Б. Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди. - Челябинск: Металлургия, 1991. - 166 с.

94. Рахимьянов А.Х. Технологические особенности раскрытия биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке / А.Х. Рахимьянов, Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014 - № 3 (64). – С. 51 – 67.

95. Батаев И.А. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: Автореф. дис...канд. техн. наук 05.16.09, Новосибирск, НГТУ, 2010. – 19 с.

The increase of structural strength of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates / E.A. Prikhodko, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esikov // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 37 – 40.

97. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion / E.A. Prikhodko, I. A. Bataev, A.A. Bataev, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esicov // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 535 – 537. – P. 231 – 234.

98. Захаренко И.Д., Мали В.И. Вязкость металлов при сварке взрывом. – В. кн.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972. – С. 575 – 578.

99. Захаренко И.Д., Соболенко Т.М. Тепловые эффекты в зоне соединения при сварке взрывом. – Физика горения и взрыва. – 1971, т.7, № 3. - С. 433 – 435.

100. Ложкин В.С. Структура и механические свойства многослойного композита, сформированного сваркой взрывом тонколистовых сталей 12Х18Н10Т и Н18К9М5Т / В.С. Ложкин, Е.А. Ложкина, В.И. Мали, М.А. Есиков // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014. - № 3 (64). – С. 28 – 36.

101. Гордополов Ю.А., Дремин А.Н., Михайлов А.Н. Экспериментальное определение зависимости длины волны от угла соударения в процессе сварки металлов взрывом. – Физика горения и взрыва, 1976, т.12, № 4. – С.601 – 605.

102. Babul W. Warunki uzyskania polaczenia metali metoda wybuchowa // J. Dabrowskiego. 1970. - № 5. P. 213.

103. Wittman R.H. The influence of collision parameters on the strength and microstructure of the explosion welded aluminum alloy. – In: Explosive work-ing of metals (2-й Международный симпозиум по использованию энергии взрыва. Марианские Лазни. Окт. 1973) Praha, 1974. - P. 153 – 158.

104. Wylie H.K., Williams P.E., Crossland B. Further experimental investigation of explosive welding. – In: Proc. 3d Intern. Conf. of the Center for High Energy Forming. Denver, Colorado, 1971. - P. 1.3.1 – 1.3.43.