

**Міністерство освіти та науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Л.Ф. Головка, В.В. Романенко, М.С. Блощин,
О.Д. Кагляк, С. С. Салій, О.А. Савченко,
І.В. Свічкарь**

**ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ З
ВИКОРИСТАННЯМ
ЛИВАРНОГО ПРОЦЕСУ І ЛАЗЕРНОЇ
ОБРОБКИ**

Монографія

Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022**

УДК 621.375.826

Рекомендовано Вченою радою КПІ імені Ігоря Сікорського»
(протокол № 8 від 12 грудня 2022 р.)

Авторський колектив:

Л.Ф. Головка, д-р. техн. наук, професор; В.В. Романенко, канд. техн. наук, доц.,
М.С. Блощин, канд. техн. наук; О.Д. Кагль, канд. техн. наук, доц.;
С.С. Салій, аспір.; О.А. Савченко, магістр, І.В. Свічка, магістр

Рецензенти:

М.В. Кіндрачук, чл.-корр. НАН України, докт. тех. наук, проф.
Національного авіаційного університету

В.І. Осипенко, докт. тех. наук, проф.
Черкаський державний технологічний Університет

Відповідальний редактор:

І.В. Кривцун, акад. НАН України, докт. тех. наук, проф.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України

Головка Л. Ф.

Виготовлення біметалів з використанням ливарного процесу і лазерної обробки /
Л.Ф. Головка, В.В. Романенко, М.С. Блощин, О.Д. Кагль, С.С. Салій, О.А.
Савченко, І.В. Свічка - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. –
220с.

ISBN

Монографія присвячена розробці, дослідженню та аналізу можливостей використання у промисловості нових високоефективних процесів виготовлення різноманітних функціональних біметалевих матеріалів й виробів з них, що дозволяють значно підвищити їх якість і продуктивність виробництва при одночасному зменшенні його собівартості. Викладено результати теоретичних і експериментальних досліджень лазерно-ливарного, механо-ливарного і ряду комбінованих, що базуються на комплексному застосуванні електро-дугового зварювання і ливарних процесів, виготовлення біметалів. Наведено результати вивчення структур, фазового складу, розподілу елементів в шарах, прилеглих до зони сплавлення, з використанням методів металографічного й дюрOMETричного аналізів, світлової та растрової електронної мікроскопії, рентгеноструктурного та рентгеноспектрального аналізів. Висвітлюються результати визначення міцності зчеплення складових біметалів та інших експлуатаційних характеристик отриманих біметалів. Надаються результати розробки оригінальних технологічних систем й конструкцій обладнання, що гарантовано забезпечують задану якість робочого шару й міцність його зчеплення з основою, герметичність отриманих з'єднань, можливість значного розширення номенклатури біметалів, зменшення загальної ваги виробів й собівартість їх виготовлення.

Монографія призначена для науковців і фахівців з фізико-технічної обробки матеріалів та матеріалознавства, викладачів, аспірантів і студентів технічних вищих закладів.

УДК 621.375.826

©Л.Ф. Головка, В.В. Романенко, М.С. Блощин, О.Д. Кагль, С.С. Салій, О.А. Савченко, І.В. Свічка
©КПІ ім. Ігоря Сікорського
(НН ІМЗ ім. Є.О. Патона), 2022

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, одиниць і термінів.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1 ОТРИМАННЯ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВИДИ БІМЕТАЛІВ	10
1.1 Аналіз існуючих методів виготовлення біметалів.....	10
1.2 Області застосування біметалічних матеріалів.....	11
1.3 Основні вимоги до властивостей біметалічних сплавів і їх складових у залежності від умов експлуатації.....	16
1.4 Застосування біметалів в різних галузях промисловості.....	19
1.5 Способи виготовлення біметалів, що застосовуються у промислових умовах.....	29
1.6 Мета й завдання дослідження.....	54
Розділ 2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ.....	59
2.1 Розробка процесу виробництва біметалів лазерно-ливарним методом.....	59
2.1.1 Теплофізичні процеси, що відбуваються в металевих сплавах при лазерному опроміненні та їх моделювання.....	62
2.1.2 Напірний стовп в'язкої рідини в прямокутному каналі.....	75
2.1.3 Постановка та вирішення задачі утворення стаціонарної зони розплаву на поверхні основи для виробництва біметалу.....	77
2.1.4 Вирішення задачі дослідження витікання розплаву з фурми.....	90

2.1.5	Розрахунок температурного поля металевої пластини основи при імпульсному накладенні теплового навантаження, яке моделює вплив лазерної енергії.....	94
2.2	Обладнання для лазерно-ливарного виготовлення біметалів.....	105
2.3	Автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів.....	111
2.4	Експериментальні дослідження можливості отримання біметалів традиційним лазерно-ливарним методом.....	115
Розділ 3	РОЗРОБКА МЕХАНО-ЛИВАРНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ З ЛАЗЕРНОЮ ПІДГОТОВКОЮ ПОВЕРХНІ ОСНОВИ	121
3.1	Механо - ливарний спосіб виготовлення біметалів.....	121
3.2	Особливості фазових переходів при взаємодії розплаву з твердим матеріалом функціональної складової біметалу.....	122
3.3	Мікроструктура і властивості біметалів, отриманих механо-ливарним способом.....	130
3.4	Можливості розширення меж використання механо – ливарного процесу виготовлення біметалів попередньою підготовкою поверхні основи.....	146
Розділ 4	ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ ПРИ З'ЄДНАННІ ЙОГО ПЛАСТИН ПОТУЖНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕНЕРГІЇ.....	159
4.1	Теоретичний аналіз реалізації способу виготовлення біметалів при з'єднанні їх пластин потужним джерелом енергії.....	159

4.2	Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням технологічних отворів.....	161
4.3	Варіанти реалізації способу виготовлення біметалів незначної товщини при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії.....	164
4.4	Приклади отримання біметалічних матеріалів при використанні потужних джерел енергії.....	167
4.5	Високоєфективний спосіб отримання алюмо-сталевих біметалів з застосуванням концентрованих потужних джерел енергії для з'єднанні їх пластин.....	169
4.6	Виготовлення гнутих біметалів та біметалічних виробів кутового типу.....	173
4.7	Виготовлення полегшених біметалів при використанні потужних джерел енергії.....	177
4.8	Розробка комплексного підходу до виготовлення біметалів з використанням ливарного процесу та закріплення утримуючих елементів при використанні потужних джерел енергії.....	183
Розділ 5	ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ ЗГІДНО ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБОК У ВИРОБНИЦТВО.....	187
5.1	Складові для ефективності розробки проектів виготовлення біметалів.....	187
5.2	Реалізація проекту виготовлення біметалів на ринку «Startup».....	188
5.3	Рекомендації по впровадженню технології виготовлення біметалів з використанням лазерного випромінювання та інших потужних джерел енергії...	193

Загальні висновки.....	195
Список використаних джерел.....	199

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

Ст. – сталь

ЕШН – електрошлакове наплавлення

SWIP – біметалеві броне-листи фірми StillWork (власна торгова марка)

α - коефіцієнт температуропровідності

ІЧ - інфрачервоний

УФ – ультрафіолетовий

1D – однокоординатна обробка

ВСТУП

Тенденції розвитку сучасної техніки, економічні та технологічні аспекти її виготовлення, обумовлюють необхідність розширення використання матеріалів, що володіють спеціальними властивостями. Деталі металургійного, гірничовидобувного, нафтогазовидобувного і переробної промисловості, машин хімічної, легкої і харчової промисловості в процесі експлуатації піддаються різним видам зношування. Серед них окремо слід виділити деталі пар тертя, які в процесі експлуатації піддаються зношуванню при відсутності або обмеженої мастила, при наявності в зоні контакту частинок абразивних матеріалів. Певна частина деталей обладнання працює в умовах ударно-абразивного зношування, коли руйнування їх поверхневого шару протікає під дією імпульсних механічних контактних навантажень в умовах одночасного впливу абразивних частинок. Значна частина деталей машин і механізмів в процесі роботи піддається газо-абразивному і гідро-абразивному зношуванню, коли на їх поверхні впливають високошвидкісні (більше 40 м/с) потоки різних, в тому числі хімічно активних газів або рідин, що знаходяться при температурах до 500 °С при наявності дисперсних абразивних частинок.

Ресурс роботи більшості деталей, що працюють в умовах різного виду тертя, при підвищених температурах, циклічних знакозмінних навантаженнях, дії абразивних або корозійних середовищ в основному визначається фізико-механічними властивостями їх поверхневих шарів, товщина яких не перевищує 4 - 5 мм, шорсткістю поверхні, наявністю концентраторів напруг.

У зв'язку з цим широке застосування в різних областях техніки знаходять біметали. Їх використання веде не тільки до істотної економії дорогих матеріалів, а й досягти якісно нових властивостей виробів. Коли

критеріям придатності виробу відповідає шар робочої поверхні, а інша частина є базовою частиною і не піддається прямій взаємодії з факторами робочого середовища.

При розробці і використанні технологій отримання біметалевих композицій, слід відзначити, що в практиці розробки таких технологій істотна роль поки належить інтуїтивним експериментальним підходам, при наявності дуже обмежених кількісних оцінок. Крім того сучасні методи виробництва біметалевих матеріалів мають певні недоліки, що стосуються продуктивності процесів, якості поверхні, структури та напруженого стану наплавлених шарів, номенклатури складових біметалів і інші.

Розробка універсального, економічно доцільного способу виготовлення біметалевих матеріалів для виготовлення деталей машин, що забезпечують істотне збільшення ресурсу їх роботи при різних умовах експлуатації, є актуальним завданням, рішення якого буде сприяти розвитку промисловості України.

РОЗДІЛ 1. ОТРИМАННЯ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВИДИ БІМЕТАЛІВ

1.1 Аналіз існуючих методів виготовлення біметалів

У сучасній техніці переважна більшість металевих конструкцій різного призначення при експлуатації відчують одночасний вплив механічних навантажень і зовнішнього агресивного середовища. Для особливо відповідальних металомістких конструкцій, де потрібне забезпечення високого рівня міцності і опору різним видам абразивного зношування і корозійного руйнування стає неможливим підібрати сталь або сплав, які б поєднували в собі всі необхідні якості, не вдаючись до не виправданого як з матеріальної, так і економічної точки зору, збільшення товщини стінок несучих конструкцій.

У зазначених випадках стає доцільним використання композитних матеріалів, до числа яких відносяться конструкційні плаковані матеріали - біметали. У двошарових плакованих сталях (біметалах) основний шар відповідає за несучу здатність конструкції, тобто він повинен володіти високими властивостями міцності, здатністю чинити опір дії статичних або змінних навантажень, але від нього не вимагається високої корозійної стійкості або зносостійкості. Тому розрахунок міцності конструкцій з плакованої сталі ведеться виходячи тільки з товщини основного шару. Для використання в архаїчних умовах метал основного шару повинен зберігати достатню ударну в'язкість при низьких температурах. Плакувальний шар несе чисто захисні функції, в зв'язку з чим він повинен бути виконаним з корозійностійкого і / або зносостійкого матеріалу. Найбільш часто в якості матеріалу плакувального шару застосовують нержавіючі сталі типу Х13, Х18Н10Т або ще більш корозійностійкі, леговані додатково молібденом, азотом – для підвищення стійкості проти пітингової корозії, титаном, ніобієм

- для запобігання схильності до міжкристалітної корозії. У деяких випадках матеріалом плакувального шару є сплави на основі міді, нікелю або титану. До теперішнього часу вимог до матеріалу функціонального шару по міцності властивостями не пред'являється, і його товщина визначається тільки виходячи з величини корозійного або абразивного зносу за розрахунковий період експлуатації конструкції, але не враховується при розрахунках конструктивної міцності конструкції з двошарової сталі.

Таким чином, основними перевагами біметалічних сталей перед однорідними є:

- поєднання в собі комплексу службових характеристик, які не досяжні при застосуванні гомогенних сталей;
- зниження маси конструкції через можливість зменшення її товщини, тобто економія металу;
- збільшення надійності і довговічності конструкцій;
- значне зниження або повне виключення ремонтних робіт при експлуатації конструкцій.

1.2 Області застосування біметалічних матеріалів

Найбільш поширене застосування в різних галузях промисловості двошарові сталі знаходять як корозійностійкі матеріали в складі несучих корпусних конструкцій, що стикаються з агресивним робочим середовищем. Залежно від ступеня агресивності корозійного середовища використовуються двошарові сталі, плакувальний шар в яких виготовлений з різних за стійкістю сталей або сплавів.

Найбільшого поширення в якості корозійностійкого функціонального шару знайшла аустенітна нержавіюча сталь типу 08X18H10T. Такі двошарові сталі застосовують для виготовлення просторових конструкцій атомних електростанцій, в хімічній, нафтопереробній та целюлозно-паперовій промисловості. Там, де можлива присутність в корозійному

середовищі хлоридів, застосовують для плакування сталі, що містять молібден, типу 10X17H13M2T. До цих сталей також ставиться вимога по відсутності схильності до міжкристалічної корозії, для чого в їх складі обов'язково присутній титан. Для менш агресивних середовищ використовують двошарову сталь з плакувальним шаром із хромистої нержавіючої сталі 08X13.

Для виготовлення конструкцій атомних електростанцій застосовується товстолистовий прокат двошарової сталі з основним шаром зі сталі марки 22К, плакованим нержавіючою аустенітною сталлю марки 08X18H10T [1]. Для виробів, що працюють у контакті з прісною водою і паром, застосовується плакування хромистою нержавіючою сталлю 08X13 і 08X17.

Широко використовуються двошарові стали в хімічній промисловості для виготовлення хімічних реакторів, автоклавів, резервуарів для зберігання хімічних сполук, теплообмінників. Для автоклавів великої місткості, в яких температура сягає 500 °С, а тиск доходить до 20 МПа, застосовується листова плакована сталь, основний шар якої виготовляється з теплостійкої сталі типу 10X2М, а плакувальний - зі сталі 08X18H10T [2-3].

Хімічні апарати, що піддаються дії таких органічних кислот, як оцтова, щавлева, молочна та деяких інших застосовують плаковані сталі, які містять молібден і титан для запобігання пітингової і щілинної корозії, типу 10X17H13M2T і 08X17H15M3T або монель НМЖМц28-2,5-1,5. Для хімічних резервуарів, призначених для роботи з хлористими сполуками або розплавами солей чи лугів, як плакувальний шар використовуються сплави на нікелевій основі ХН78Т або Н70МФВ [3].

У целюлозно-паперовій промисловості варильні котли, ємності для відходів, змішувачі паперової маси виготовляють з плакованих сталей типу 09Г2С + 08X18H10Т або 20К + 10X17H13M2Т [4, 5]. Для апаратів з відбілювання целюлози, де до складу відбілюючих речовин входять сполуки

хлору, в яких нержавіючі сталі піддаються корозії, для створення плакуючого шару застосовують сплави титану. Також сплави титану знаходять застосування при використанні біметалів в суднобудуванні [6].

У нафтохімічному виробництві для переробки сірчистої нафти застосовують двошарові сталі з основним шаром із низьколегованих сталей марок 20К, 09Г2С, 16ГС і плакованим шаром зі сталі марки 08Х13[7]. Плакування сталь 12ХМ + 08Х18Н10Т в листах товщиною до 150 мм використовується для виготовлення реакторів риформінгу і гідроочищення, що працюють під тиском до 6 МПа при температурі 540 °С [8]. За кордоном двошарові сталі з плакованим шаром з нержавіючих сталей застосовують для виготовлення зварних труб для транспортування природного газу з високим вмістом сірководню і резервуарів газосховищ [3, 9]. Для промислових нафтогазопроводів рекомендовано використовувати біметалічні труби [10, 11].

Прикладом застосування двошарових сталей в легкій і харчовій промисловості може служити обладнання молочних заводів (резервуари для бродіння, перегінні кубові установки, барабанні сушарки). Для виробництва кормових дріжджів застосовують двошарові листи з плакованим шаром з міді [12].

Нижче наведені особливості експлуатації функціонального шару біметалу в різних галузях промисловості.



Рис. 1.1 - Види корозійностійких сплавів сталі для використання в якості функціонального шару біметалу

Сталі мартенситно–феритного і мартенситного класу

Високоміцні корозійностійкі сталі із вмістом хрому – 13%. 08X13, 12X13, 20X13. Вони використовуються для виготовлення деталей, що піддаються дії слабо агресивних середовищ, до яких відносять атмосферні умови (крім морських), водні розчини солей органічних кислот при кімнатній температурі, розчини азотної кислоти низьких концентрацій. Такі сталі мають високий запас пластичності і піддаються різним видам зварювання. Добре деформуються в холодному і гарячому стані [13]. Сталі марок 30X13, 40X13. використовують для виготовлення важко навантажених деталей пар тертя торцевих ущільнювачів хімічних агрегатів і деталей поршневих компресорів, що працюють у водних розчинах солей, азотної та деяких органічних кислот при температурах до 30 °С. Їх використовують також для виготовлення ріжучого інструменту, вимірювального інструменту, пружин і підшипників. Такі сталі обмежено піддаються холодній деформації.

Для виготовлення важко навантажених деталей використовують сталі 20X17H2Б, 14X17H2, 95X18, таких як ножі, фільтри і вали шнекових машин, а також підшипників і валів мішалок в хімічних апаратах, які піддаються сильному зношуванню і дії помірно агресивних середовищ, азотної і органічних кислот при різних концентраціях і температурах. Особливістю цих сталей є те, що вони не піддаються зварюванню. Навпаки добре зварюються та деформуються в гарячому стані сталі 09X15H8, 07X16H6, 08X17H5, які працюють в середовищах азотної, фосфорної і оцтової кислот і в атмосфері сірчаноокислих середовищ і сірчаної кислоти [14].

Сталі аустенітного класу

Для виготовлення деталей обладнання, що працює в середовищах малої агресивності – органічні кислоти низьких концентрацій при кімнатній температурі використовується сталь марки 10X14Г14Н4Т [13, 14]. У зварних конструкціях, які працюють в середовищах середньої агресивності – продукти згорання палива, розбавлені розчини азотної, фосфорної та органічних кислот, розчини лугів і солей використовують сталі 12X18Н10Т, 12X18Н9Т, 08X18Н10Т. Для підвищення зносостійкості таких сталей використовують азотування і поверхнєве наклепування. Такі сталі добре зварюються всіма видами ручного і автоматичного зварювання і легко піддаються гарячій і холодній деформації. У зварних конструкціях, що працюють в умовах киплячої фосфорної, мурашиної і оцтової кислот і інших середовищах підвищеної агресивності використовують сталь 10X17Н13М2Т [13, 14].

Аустенітно–феритні сталі

Для виготовлення зварної хімічної апаратури, а також каталізаторів полімеризації у виробництві синтетичних канчуків, кормових дріжджів та вакцин використовується сталь марки 08X22Н6Т. А також для апаратури, що працює у 65% азотній кислоті. При випарюванні і нейтралізації аміачної селітри. Апаратура, яка працює в окислювальних середовищах – 60%–ва азотна кислота при температурах до 80 °С, 25% фосфорній, в оцтовій і щавлевій кислотах при температурах до 300 °С добре підходить сталь 08X18Г8Н2Т. В середовищах, що не викликають міжкристалітної корозії, деталі вакуум–випарних апаратів і сушильно–розпилювальних установок, застосовують сталь 12X21Н5Т. Важко навантажені деталі, що піддаються сильному зношуванню в середовищах помірної агресивності та в якості зносостійких наплавok використовують 10X32Н8 [13, 14].

Сплави на залізо–нікелевій основі

Деталі зварної апаратури, що працюють в середовищах, що містять іони хлору, а також в сірчаній і оцтовій кислотах при температурі до 80 °С застосовують 06Н28МДТ. Сплав піддається зварювання аргано–дуговому зваркою. Для виготовлення деталей, які працюють при високих температурах у сірчаній кислоті, фосфорній та соляній всіх концентрацій і при всіх температурах, включаючи температуру кипіння та має добру зварюваність підходить ХН70МФ. В зварних конструкціях, які працюють при підвищених температурах в сірчаноокислих середовищах, концентрованій оцтовій кислоті, сухому хлорі, хлоридах заліза і інших високо агресивних середовищах використовують ХН65МВ. В розчинах кремній–фтористої кислоти при 80 °С, азотній і фосфорній кислотах працює ХН60МБ [13, 14].

1.3 Основні вимоги до властивостей біметалічних сплавів і їх складових у залежності від умов експлуатації

Двошарові сталі повинні володіти комплексом властивостей основного і функціонального шару.

Основний шар. Головна вимога до основного шару полягає в тому, щоб він володів заданим рівнем міцності, необхідним для забезпечення працездатності виробу при впливі на нього механічних навантажень. Підвищення міцності основного шару можна досягти шляхом заміни вуглецевих сталей на низьколеговані з підвищеною міцністю. Для дотримання розумного компромісу між характеристиками міцності і пластичних властивостей двошарові сталі піддають термічній обробці по режимах сталі основного шару, але з урахуванням хімічного складу сталі як основного, так і плакувального шару.

Наприклад, для двошарових сталей з плакуючим шаром з аустенітних корозійностійких сталей і основним шаром із Ст3 або 20К застосовують нормалізацію при температурі 920-940 °С. Для композиції Ст3 + 08Х13 після нормалізації додатково проводять відпуск при температурі 680-760°С. При застосуванні в якості основного шару низьколегованих сталей 16ГС або 09Г2С плакована сталь піддається загартуванню від 900-940°С з наступним відпуском при температурі 680-720 °С [15].

Основні вимоги до властивостей сталі основи:

- високий опір крихким руйнуванням, в тому числі в умовах різко змінних температур і навантажень;
- опірність шаруватим руйнуванням в вузлах зварних конструкцій, в тому числі при високому рівні напруг, що розтягують, діючих в напрямку товщини листів;
- високий опір впливу знакозмінних навантажень, що викликають появу в металоконструкціях циклічних напружень, здатних привести до втомних руйнувань;
- високий опір корозійно-механічних пошкоджень;
- хорошу зварюваність.

Функціональний шар. До сталей функціонального шару пред'являються вимоги обумовлені призначення двошарової сталі. Найбільш часто вимоги до плакованої стали зводяться до забезпечення корозійної стійкості для протидії агресивним середовищам або забезпечення зносостійкості. В роботі [16] узагальнені вимоги до плакованих сталей, розділяючи їх на технологічні, експлуатаційні та техніко-економічні сформульовані наступним чином:

- матеріали, що утворюють двошарову сталь, повинні утворювати між собою якісне з'єднання;
- плакувальний матеріал повинен бути технологічним при виготовленні з нього виробів різкою, штампуванням, зварюванням і т.д.;

- корозійна стійкість або інші необхідні властивості плакувального шару повинна забезпечувати надійну і тривалу експлуатацію при впливі зовнішнього середовища;

- міцність, пластичність і в'язкість плакованого матеріалу повинна протистояти впливу зовнішніх і залишкових зварювальних напружень в конструкції протягом усього періоду експлуатації;

- якість з'єднання шарів повинно бути такою, щоб не відбулося розшарування плакованого матеріалу.

Застосування біметалів, що відповідають перерахованим вище вимогам, стає доцільним, якщо при цьому досягаються наступні цілі:

- економічна доцільність їх отримання при обраних співвідношеннях товщин шарів і технологічних процесах їх виготовлення;

- отримання нового комплексу службових властивостей, які не забезпечується сталями або сплавами, взятими окремо;

- отримання нових технологічних властивостей не забезпечується одношаровими сталями.

Сортамент виробленого двошарового корозійно-стійкого листового прокату відрізняється великою різноманітністю. Відповідно до ГОСТ 10885-85 листи можуть проводитися з наступними габаритними розмірами: 3200-9400 мм довжиною; 1200-2800 мм шириною і 8-60 мм товщиною. Однак по окремим технічним умовам випускають листовий прокат як менших, так і більших товщин в інтервалі від 4 до 110 мм.

Інше завдання, яке можуть успішно вирішувати двошарові сталі, полягає в підвищенні зносостійкості різних виробів, експлуатація яких пов'язана з механічною взаємодією при контакті з твердим середовищем. Такі плаковані сталі застосовують для виготовлення різних ножів, лемехів-плоскорізів та інших ґрунтообробних знарядь. Для основного шару в таких сталях використовують низьковуглецеві сталі, а для плакувального шару -

високовуглецеві леговані інструментальні сталі 6ХС, 85ХВ, Х12 і інші. Після гартування ці сталі набувають високу твердість [17, 18].

У разі, коли виріб піддається одночасному впливу корозійного середовища і ерозійному зносу при контакті з твердими тілами, через низьку корозійну стійкість інструментальних сталей доцільно використовувати для плакуючого шару аустенітні нержавіючі сталі. За рахунок високого опору корозії при впливі зовнішнього середовища і миттєвого заліковування пасивуючої плівки після взаємодії з твердим тілом, такі сталі краще використовувати для захисту від корозійно-ерозійного зносу різних конструкцій. Найбільш вдалим прикладом такого застосування двошарових корозійностійких біметалів, плакованих сталлю типу 12Х18Н10, є їх використання в льодовому поясі корпусів атомного криголама і льодостійкої морської стаціонарної платформи, установленю на арктичному шельфі [19, 20].

1.4 Застосування біметалів в різних галузях промисловості

На теперішній момент у нашій країні та в інших розвинених країнах біметал, як прогресивний вид матеріалу знайшов застосування в найрізноманітніших галузях промисловості. Застосування біметалів в нових галузях промисловості поступово та безперервно збільшується. У великих кількостях біметал випускається у Франції, Англії, Німеччині та Сполучених Штатах Америки. Впровадження біметалів в хімічному машинобудуванні є одним з основних шляхів економії дефіциту металів та сплавів. Успішна розробка технології зварювання забезпечує високі механічні властивості і високу корозійну стійкість з'єднань, в зв'язку з чим біметал можна використати майже у всіх випадках, де використовується корозійностійка сталь.

Відповідно до різних видів застосування в даний момент біметали виробляються у вигляді листа, стрічки, смуги, пластин, дротів, тросів, фасонних профілей та труб (рисунок 1.2).

По застосуванню усі відомі біметали можуть бути умовно поділені на корозійностійкі, антифрикційні, зносостійкі, інструментальні, контактні, термобіметали.



Рис. 1.2 - Біметалічна стрічка.

Корозійностійкі біметали.

До цієї категорії відносять листові біметали, біметалічні труби, біметалічні профілі та прутки. Переважна більшість виготовленого корозійностійкого біметалу припадає на біметали, які за основу мають вуглецеву або низьколеговану сталь, а в якості плакуючого шару – корозійностійкі сталі різного складу, мідні і нікелеві сплави, мідь, нікель, титан, срібло, алюміній та інші метали і сплави.

Вибір одного або іншого складу біметалу, залежить від умов його експлуатації, оскільки плакуючий шар біметалу повинен бути стійким до агресивної дії середовища, а основний - повинен забезпечувати необхідну конструкційну міцність і жорсткість виробу. При цьому вартість біметалу, повинна бути менше вартості однорідного корозійностійкого матеріалу. Остання вимога іноді може не дотримуватись в тому випадку, якщо біметал має умови експлуатації, які не можуть бути задоволені однорідним матеріалом.

Наприклад, мідь, нікель і срібло є матеріалами стійкими в певних хімічних середовищах. При необхідності виготовлення з цих металів деталей хімічної апаратури, що працюють при підвищених тисках і температурі, конструкційна міцність їх являється недостатньою. Лише у випадку використання біметалу з основою із сталі і плакуванням із міді, нікелю та срібла вдається досягти потрібної міцності апарату і корозійної стійкості. Таким чином, лише при застосуванні біметалу досягаються необхідні конструкційні властивості матеріалу.

У якості основного шару біметалу найбільше розповсюдження отримала звичайна вуглецева сталь з вмістом вуглецю не більше 0,25%. За останній час в зв'язку з підвищенням температур і тиску в хімічній апаратурі та прагненні зменшити її вагу великого розповсюдження (в Україні та закордоном) для основного шару отримала низьковуглецева сталь з підвищеною міцністю.

У якості основи біметалу було успішно випробувані сталі: Ст. 2-4 (ГОСТ 380-60), 10 (ГОСТ 1050-60), 15к, 20к, 16ГС (ГОСТ 5520-62), Ст. 3с, Ст. 4с (ГОСТ 5521-50), 09Г2, 10ХСНД (ГОСТ 5058-57), 12МХ (ГОСТ 10500-63) та СХЛ-45 (ГОСТ 3698-56).

В якості плакуючого шару розповсюджені корозійностійкі сталі та метали, котрі застосовуються для аналогічних середовищ у вигляді однорідного металу. До них відносять: хромонікелеві сталі з добавками титану чи ніобію, хромові сталі, хромонікельмолібденові сталі з титаном чи міддю і титаном (ГОСТ 5632-61); мідні сплави; нікелеві сплави (монель, інконель, хастелой); чисті метали (мідь, нікель, титан, алюміній, срібло та інше).

На заході, як основний шар застосовується вуглецеві і низьколеговані сталі, леговані молібденом або хромом і молібденом. В якості плакуючого шару використовується корозійностійкі хромисті, хромонікелеві і хромонікельмолібденові сталі [21, 22].

Основною характеристикою корозійностійкого біметалу є його стійкість у різних агресивних середовищах. Для сучасного хімічного машинобудування основними агресивними середовищами є соляна, азотна, сірчана і фосфорна кислоти, які можуть застосовуватись у різних концентраціях. Перераховані середовища є основними при виробництві мінеральних добрив і різних синтетичних матеріалів. В хімічних апаратах переробляються чи виникають, як напівпродукт і інші середовища. Проте по ступеням агресивності вони поступаються перерахованим і цьому при загальній оцінці корозійної стійкості плакуючих шарів біметалів можна обмежитись їх оцінкою в чотирьох кислотах різних концентрацій і при різних температурах.

Антикорозійні властивості біметалу є такими ж, як у однорідного металу плакуючого шару. Більше того, стійкість до корозійного розтріскування і корозійної втоми плакуючого шару нерідко вище, аніж у однорідного металу такого ж складу.

Корозійностійкі біметали широко використовуються у різних великогабаритних конструкціях, в тому числі на суднах, внаслідок чого питання щодо ваги конструкції є важливим (рисунок 1.3).

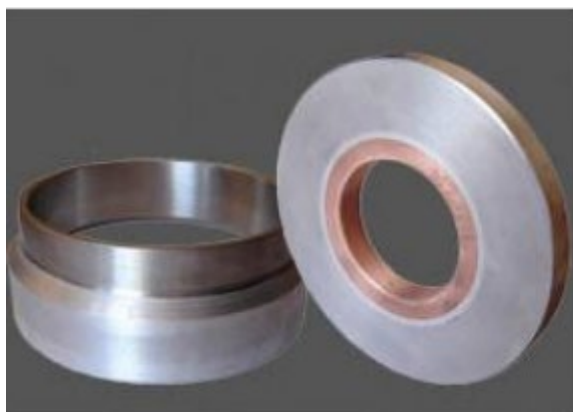


Рис. 1.3 - Труба з корозійностійкого біметалу.

Все більшого поширення в якості корозійностійкого листового матеріалу отримують біметал сталь + титан та сталь + алюміній (рисунок

1.4). Це обумовлено тим, що титан стійкий до взаємодії корозії в азотній кислоті, у вологому хлорі, у солоній морській воді, і багатьох інших агресивних середовищах.



Рис. 1.4 - Лист з корозійностійкого біметалу

Антифрикційні біметали.

Широке застосування поршневих двигунів внутрішнього згоряння поставило задачу, щодо створення для підшипників замість нерентабельної свинцевої бронзи недорогих і недефіцитних матеріалів. Численні дослідницькі роботи в напрямку пошуку недорогих матеріалів для підшипників, показали, що існує принципове протиріччя. Оскільки в першу чергу сплаву необхідно забезпечити хороші антифрикційні властивості і достатню конструкційну міцність. На розробку нових підшипникових сплавів, які будуть відповідати усім умовам роботи поршневих двигунів, було приділено багато уваги. Цю задачу змогли вирішити лише використовуючи біметалічні вкладиші підшипників, верхній шар яких складається з м'якого антифрикційного сплаву на алюмінієвій основі, а нижній представляє собою низьковуглецеву сталь, яка надає вкладишу достатню механічну міцність. Плакуючий антифрикційний матеріал повинен мати хорошу припрацьованість до тертя в умовах обмеженого змащування, властивість «поглинати» тверді частинки, високу зносостійкість, високу теплопровідність, високий опір до стиснення і повзучості, при температурі роботи підшипника, достатньо високу втомну міцність при робочих температурах підшипника, високу стійкість проти

корозії у мастилі при робочих температурах. Для оцінки досліджуваних сплавів по цим критеріям були розроблені спеціальні лабораторні методи [23, 24].

Було встановлено, що алюмінієві сплави мають ряд переваг у порівнянні з існуючими матеріалами – вони дешевші, витримують високе навантаження, мають високу втомну міцність та хорошу теплопровідність. По втомній міцності та по несучій здатності пластичні алюмінієві сплави значно перевершують бабіти, які мають найбільш високі механічні властивості. Експерименти показують, що сплави на алюмінієвій основі мають значно менший коефіцієнт тертя, особливо при швидкості ковзання до 10 м/сек.

Тим не менш, алюмінієві антифрикційні сплави мають певні області застосування і не можуть бути універсальними замінниками усіх інших антифрикційних сплавів. Вимогам до матеріалів підшипників для дизелів відповідають сплави алюмінію з нікелем, сурмою, оловом і кремнієм (рисунок 1.5.).



Рис. 1.5 - Вкладиш підшипника виготовлений з антифрикційного біметалу

З багатьох запропонованих сплавів на алюмінієвій основі набули практичного застосування в підшипниках двигунів внутрішнього згоряння наступні сплави: АСМ, KS-411В, Алкоа 750, ХА-750, ХВ-80, кремнієвий сплав та інші.

Інструментальні, зносостійкі біметали

Біметалічні двошарові та трьох шарові листи і смуги широко застосовуються, як ріжучий інструмент – для машинних ножів, шкіряно і папіро-ріжучих машин, метчиків і інших інструментів (рисунок 1.6). Такі ножі поєднують у собі високі ріжучі властивості за рахунок високолегованої загартованої інструментальної сталі і високу в'язкість за рахунок основи з вуглецевої сталі, що дуже важливо для машинних ножів, які зазнають в процесі роботи динамічного навантаження.

В результаті широкого використання біметалу для ріжучого інструменту, відчувається значна економія високолегованих сталей, що мають дефіцитні легуючі елементи, такі як хром, ванадій, вольфрам та інші.

У біметалічному інструменті основа виготовляється з низьковуглецевої сталі, а ріжуча частина – з легованої сталі і твердих сплавів. За основу у таких біметалах беруться вуглецеві сталі 10, 15, 35 та 50 (ГОСТ 1050-60), а у якості ріжучого шару - високовуглецеві сталі 9Х5Ф, 9Х5ВФ, 85ХФ, Х6Ф1, 6ХС, В1.



Рис. 1.6 - Біметалічний ріжучий інструмент

Виготовлення ножів з суцільної інструментальної легованої сталі марок ХВГ, ШХ15, 6ХС, Р9 та інших з високою твердістю є складним і

дорогим процесом. Це також пов'язано з великими витратами легованих сталей, з яких виготовляється не лише ріжуча частина, але й основа ножа. Це є не бажаним з технічної сторони, тому що це призводить до недостатньої динамічної міцності інструменту. Крім того, при термічній обробці відбувається деяке викривлення ножів. Таку деформацію при суцільному ножі практично неможливо усунути шляхом правки [25].

Для деяких видів ножів застосовуються біметали з двома місцевими плакуючими смугами з розрізом такої смуги уздовж. Листи двошарової інструментальної сталі з суцільним плакуванням випускаються шириною 200-600 мм, довжиною не менше ніж 650 мм. У цьому біметалі основний шар виготовляють з вуглецевої сталі 30 чи 3, а плакуючий – з інструментальних сталей 9Х5Ф, 85ХФ, 9Х5ВФ.

Відомі й інші типи біметалів для ножів, які використовують у промисловості. Одна з зарубіжних фірм виробляє низку різних видів біметалу для ріжучого інструменту (рисунок 1.7).

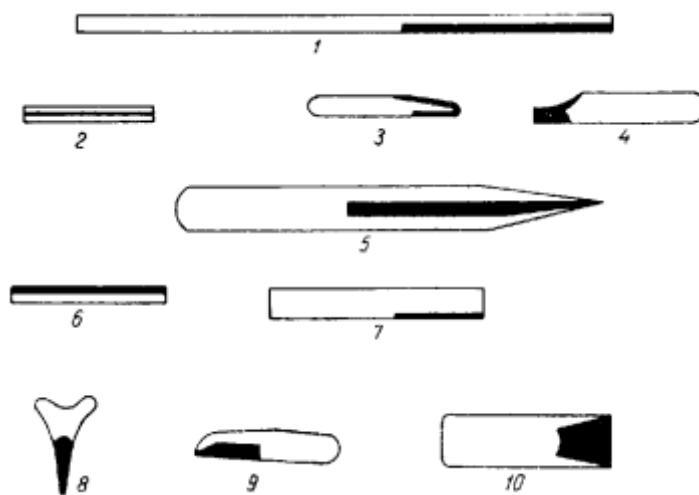


Рис. 1.7 - Види біметалічних профілей для використання, як ріжучий інструмент та для інших цілей: 1 – залізяка для рубанка скошена; 2 – ніж для шкіри; 3 і 4 – ножі для газонокосарки; 5 – обдирний ніж; 6 – зубчаста смуга і жниварка; 7 – ніж для різки паперу і шпону; 8 – спіраль для різки тканин; 9 – ніж для газонокосарки; 10 – коса.

Провідникові та контактні біметали

В електропромисловості і електроніці широко застосовуються біметали у вигляді дроту, смуг, стрічок та труб. Їх застосовують, як провідникові біметали. В цих біметалах використовуються різноманітні поєднання металів і сплавів, до того ж частіше за все більше електропровідний метал розташовується на поверхні, а основний - менш електропровідний чи сталь.

Біметали, які застосовують, як провідники, крім економії, дають ще ряд переваг у порівнянні з монометалами. Важливими перевагами є: більш висока в порівнянні з основним металом електропровідність, підвищена міцність, менша вага, покращений корозійний захист металів, які легко окислюються і низька вартість.

Великого розповсюдження в якості провідникових біметалів отримали біметали з плакуючим шаром із міді, це пояснюється високою електропровідністю міді (рисунок 1.8) [26].

Раніше для ліній зв'язку великої протяжності зазвичай використовували мідні дроти діаметром 3-4 мм. Межа міцності таких дротів не перевищує 441 МН/м^2 , тому вони виявились не придатними для ліній зв'язку в сніжних регіонах, так як вони не витримували навантаження від снігу та льоду. Застосування біметалічних сталево-мідних дротів замість мідних дозволило значно підвищити їх максимальне навантаження, бо їх міцність становить не менш 636 МН/м^2 .



Рис. 1.8 - Біметалічний провідник.

Окрім дроту сталь + мідь, знаходять застосування в електротехніці біметалічні дроти сталь та алюміній, сталь та нікель/мідь і алюміній [27].

Вміст алюмінію в біметалі по площі перетину складає 25%, що цілком достатньо для істотного підвищення електропровідності і захисту дроту від корозії в атмосферних умовах.

На сьогоднішній день у промисловості випускається біметалічна холоднокатана стальна стрічка з двостороннім покриттям чистим нікелем, яка широко застосовується для електродів радіоламп замість чистого нікелю. Розмір стрічки: товщина 0,10; 0,15; 0,20; 0,30 мм, ширина 80 – 100 мм; товщина плакуючого шару 8 – 12% і алюмінієвого 7 – 10%.

Усі види стрічок для електровакуумної промисловості постачається заводами в м'якому стану після відпалювання, а деталі з них отримуються методом штампування.

Для електротехнічної промисловості випускаються біметали алюміній + мідь у вигляді листів і стрічок товщиною 1 – 20 мм, шириною до 900 мм, довжиною до 4000 мм. З цих біметалів виготовляють деталі рубильників, шини і інші вироби (рисунок 1.9).

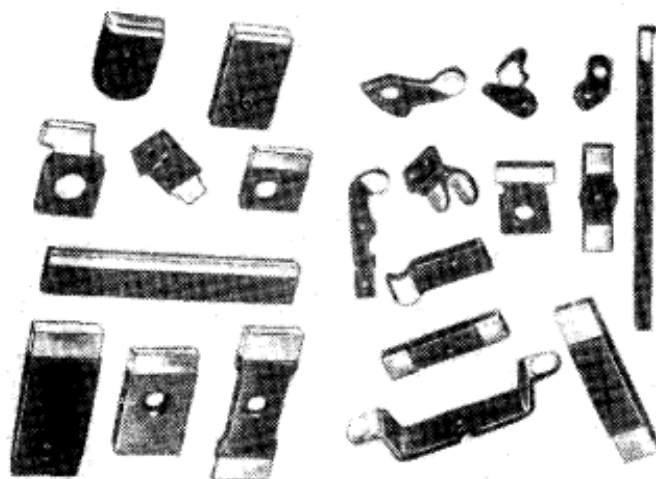


Рис. 1.9 - Типові вироби з біметалічних смуг з місцевим плакуванням.

В електротехніці широко застосовують контактні біметали, що представляють собою біметал з місцевим плакуванням. При цьому

плакуючий шар зазвичай виготовляється з металу з хорошою електропровідністю – срібла чи його сплавів. Також застосовуються мідь, нікель, кадмій, паладій, і інші метали з включеннями срібла для отримання потрібних характеристик по опору та стійкості проти обгоряння. Платина, паладій, золото та його сплави застосовуються в контактах низького тиску. В таких біметалах плакуючий шар розміщений різними способами – по площині, з торців, по кромці у кожному випадку з одною чи з обох сторін [25].

З прокатних заготовок за допомогою різки, згибання і штампування, виготовляють контакти різноманітних конструкцій (рисунок 1.9).

1.5 Способи виготовлення біметалів, що застосовуються у промислових умовах

До теперішнього часу розроблено досить багато різних методів виготовлення біметалічних матеріалів, з яких основними можна вважати методи пакетної прокатки, способи отримання біметалів литтям, методи зварювання, способи наплавленням (рисунок 1.10).

Спосіб обробки тиском пакету, що складається з двох різних сталей у вигляді пластин або слябів, до теперішнього часу є одним з найпоширеніших технологічних процесів виготовлення двошарових плакованих сталей. В основному цей процес застосовують для виготовлення листового прокату двошарових і тришарових сталей в широкому діапазоні товщини від 1 до 10 мм, смуг і стрічок, але його також можна використовувати для отримання біметалічних прутків, дроту або профілю.



Рис. 1.10 - Способи виготовлення біметалів у промисловості.

Для отримання великогабаритних листів зазвичай застосовують одинарні пакети. Коли необхідно отримати двошарові листи невеликої товщини, то часто збирають подвійні (рисунк 1.11), що дозволяє одночасно отримати відповідно два листи біметалу. При дотриманні технології досягається висока міцність зчеплення шарів, а також забезпечуються мінімальні відхилення по товщині як основного, так і плакувального шарів.

Велике значення для отримання високоякісного листового прокату плакованих сталей мають підготовка контактуючих поверхонь заготовок основного і плакувального шарів перед складанням пакету і технологія його збирання.

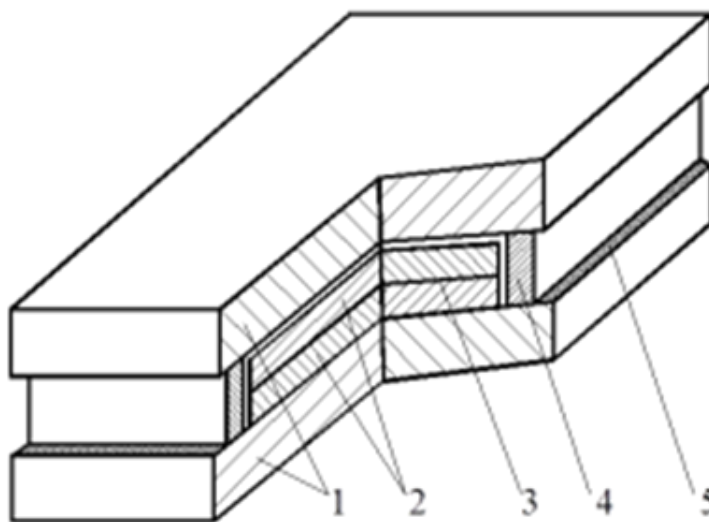


Рис. 1.11 - Конструкції пакетів для з'єднання прокатуванням:

1 - заготовки для основного шару; 2 - заготовки для плакувального шару; 3 - розділюючий шар; 4 - планки з вуглецевої сталі; 5 - технологічні зварні шви.

До операцій підготовки поверхонь відносяться:

- забезпечення мінімально можливої паралельності листових заготовок або слябів, яка бажано, щоб не перевищувала 2 мм / погонний метр;
- абразивна зачистка, а іноді і стругання контактуючих поверхонь заготовки основного шару до шорсткості не нижче Ra 12,5;
- ретельне знежирення поверхонь за допомогою серветок з м'якої тканини, змочених ацетоном або етиловим спиртом.

При нагріванні пакета перед гарячою прокаткою може статися окислення контактуючих поверхонь, що негативно позначається на міцності зчеплення шарів біметалу. З метою виключення окислення може бути використано нанесення на контактну поверхню корозійностійкої сталі тонкого шару іншого металу, що має більшу, ніж хром, який міститься в обраній сталі. [28]. Крім того, прокладка між основним і плакувальним шаром повинна перешкоджати перерозподілу легуючих елементів між шарами. До таких металів відносяться мідь і нікель. Однак мідь через низьку температури плавлення (1083°C) непридатна для покриття нержавіючих сталей, які при прокатці нагріваються до більш високих температур. Шар

нікелю товщиною в кілька десятків мікрметрів наносять на нержавіючу сталь гальванічним способом або напиленням розплавленого нікелю. Останній спосіб більш економічний. Збірка пакета здійснюється шляхом зварювання заготовок по периметру. В даний час часто після герметизації пакету для запобігання окислення поверхонь простір між заготовками вакумують до тиску $\sim 10^{-4}$ мм ртутного стовпа [25, 29-31]. При нагріванні в вакуумі видаляються адсорбовані гази, розпадаються нестійкі хімічні сполуки типу гідратів, тобто поверхні додатково очищаються від забруднень.

Нагрівання пакетів здійснюється в методичних або камерних печах для більшості корозійно-стійких плакованих сталей до температури 1200-1250°C [31-33].

Нагріті пакети катають на звичайних листопрокатних станах, які використовуються для прокатки листів з гомогенних сталей. Ступінь пластичної деформації, необхідна для досягнення високої міцності зчеплення шарів, як впливає з практики, повинна бути в межах 70-80%. Причому максимальна ступінь обтиску повинна досягатися при першому проході і складати 17-20%. Число проходів зазвичай коливається в межах 5-10. Складний процес, що відбувається під час зварювання гарячою прокаткою, відноситься до твердофазних топохімічних процесів, що протікають по стадіях. Умовно його поділяють на три стадії (рисунок 1.12) [16, 21–23].

На першому етапі спостерігається зминання нерівностей поверхонь контактуючих шарів за рахунок вдавнення виступаючих мікронерівностей. На окремих ділянках поверхні утворюється прямий контакт чистих від оксидів поверхонь з об'єднанням кристалічних решіток шляхом хімічної взаємодії (утворення вузлів взаємодії K1, K2, ...) (рисунок 1.12 а).

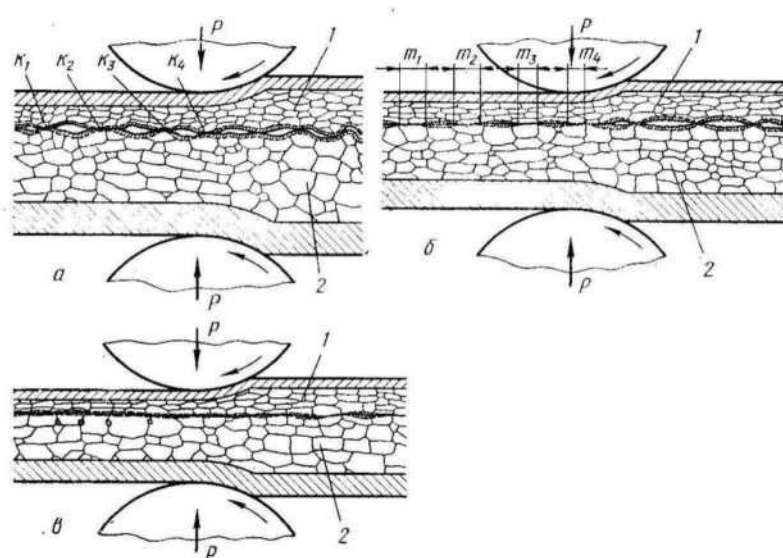


Рис. 1.12 - Схема з'єднання між шарами при зварюванні пакета гарячої прокаткою:

а - перший етап прокатки, б - другий етап прокатки, в - третій етап прокатки.

При настанні другого етапу за рахунок подальшої пластичної деформації (рисунок 1.12 б) вузли взаємодії перетворюються в зони взаємодії ($m_2, \dots$). У цих зонах з'являються місця скупчення структурних дефектів типу дислокацій і вакансій. При високій температурі такі дефекти сприяють полегшенню дифузії легуючих елементів між шарами, що в свою чергу призводить до утворення перехідної зони змінного складу і складної будови.

Третій етап завершує розширення зони взаємодії з утворенням безперервної межслойной кордону (рисунок 1.12 в). Заштриховані зони, прилеглі до валків, щоб показані відмінними в розмірах і формі зерен внаслідок більш інтенсивного охолодження зовнішніх поверхонь листа плакованої сталі.

Однак розкати з несиметричного пакету в процесі прокатки згинаються, а листи, отримані з таких пакетів схильні до викривлення.

Завершується виготовлення плакованих листів термічною обробкою, що включає загартування і високий відпуск або нормалізацію для забезпечення необхідних механічних властивостей сталі основного шару

[19, 24].

Ливарний спосіб виготовлення біметалів один з найстаріших з існуючих і застосовується для отримання різних видів біметалічної продукції. За основу методу взято отримання двох або багатошарового злитку заливкою одного або більше шарів на твердий шар іншого складу. Метод отримання біметалів заливкою застосовують, як для отримання великих виливків вагою до 13 тон, так й для отримання невеликих виливків вагою в декілька кілограмів. У залежності від потрібної компоновки, форми та ваги виливку цей метод має різновид, який передбачає подальшу гарячу обробку тиском з достатньо великим сумарним стисканням. З'єднання шарів біметалів може відбуватись, як в процесі заливки так і в процесі гарячої обробки тиском. Заливка рідким металом твердої пластини, яка розміщена в виливниці, застосовується для отримання багатьох видів біметалів різного призначення.

Зокрема, цей метод застосовується для отримання корозійностійких листових біметалів: сталь - нержавіюча сталь, сталь - мідь, сталь - мідні сплави, для отримання термобіметалів, у яких один шар є сплавом на основі кольорових металів.

При виготовленні методом заливки корозійностійких товстих листів на металургійних заводах застосовується такий порядок основних технологічних операцій.

В виливницю для виливки злитка вагою 6,5 – 13 тон поміщається спеціально підготовлений сляб з корозійностійкої сталі. Підготовка сляба полягає у його струганні з чотирьох сторін для видалення окислів і поверхневих дефектів, в знежирюванні, в обмазці сляба з двох сторін - з зовнішньої сторони магнезитовим порошком для запобігання зварюванню з металом і з внутрішньої сторони нашати́рем для покращення зварювання з вуглецевою сталлю.

В виливниці з розміщеною у ній плитою здійснюється сифонна заливка рідкої вуглецевої та низьковуглецевої сталі основного шару з мартенівської печі. Залитий метал створює захисний шар – підливку товщиною 50 - 65 мм для захисту поверхні нержавіючого сляба від окислення.

Заливка рідкого металу на тверду складову (без застосування виливниць) знайшла лише обмежене застосування для отримання невеликих партій біметалів, у вигляді сталевих стрічок з плакуючим шаром з кольорових металів та їх сплавів — міді, латуні, бронзи та інших, тому що там, де температури плавлення і гарячої обробки тиском складові різко відрізняються.

Обмежене застосування цього методу пояснюється тим, що потрібен підігрів до високої температури сталеві основи і подальшої механічної обробки ливарної поверхні. При великих розмірах листів для цього необхідні спеціальні нагрівальні печі, фрезерні верстати.

Для отримання біметалу сталь - кольоровий метал таким методом застосовується наступна послідовність основних технологічних операцій.

Готується основа — сталеві пластина. Площина роз'єму піддається струганню і знежиренню, після цього на неї наноситься шар флюсу, що сприяє кращому зварюванню шарів біметалу. До пластини по периметру приварюються бортики для отримання деко (рисунок 1.13) [25]. Отримане деко розміщують в підігрівальну піч і нагрівають до 800 — 950 °С, щоб зменшити охолодження залитого розплаву і забезпечити розчинення окислів на межі розділення двох шарів. Після цього відбувається заливка в деко металу чи сплаву плакуючого шару.

Цей спосіб також має декілька різновидів, що передбачає розплав безпосередньо на сталевій основі більш низько плавкого плакуючого шару, наприклад, при виготовленні біметалу сталь та латунь [38].

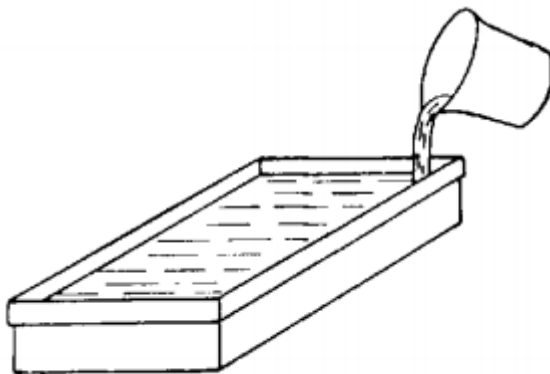


Рис. 1.13 - Схема заливки рідкого металу на тверду пластину.

Після охолодження струганням чи фрезеруванням з поверхні залитого плакуючого шару видаляють дефекти ливарного походження.

Після цього двошарову заготовку нагрівають і прокочують в гарячому стані до заданого розміру по товщині. Після обрізки і розділення може бути проведена подальша холодна прокатка у випадку, якщо потребується товщина стрічок чи смуг менше 2 — 3 мм та хороша поверхня. Холодна прокатка таких смуг чи стрічок можлива до дуже малих товщин, що складають десятю чи соту частину міліметра.

Цей метод заливки рідкого металу на тверду пластину застосовується для отримання труб з високоміцного алюмінієвого сплаву Д16 з двостороннім плакуванням алюмінієм марки АД1, з подальшим пресуванням тришарової заготовки, холодною прокаткою і волочінням на готовий розмір [39].

Послідовне лиття двох металів в одну виливницю має декілька різновидів даного методу. Найбільш раціональний метод застосування запропонований для виготовлення термобіметалів [40].

Суть метода в тому, що в роз'ємну виливницю, що має два сифонних канали (рисунок 1.14) поміщають чавунну плоску вставку, яка точно відповідає по своїм розмірам до розмірів одного з шарів злитку термобіметалу з більш низькою температурою плавлення.

В виливницю з чавунною вставкою по першому каналу заливається більш тугоплавка складова. Після невеликої витримки (30 — 60 сек) за допомогою спеціального гвинтового механізму електромотором здійснюється вилучення чавунної вставки, і у вільний об'єм другого каналу заливається друга складова, що має меншу температуру плавлення.

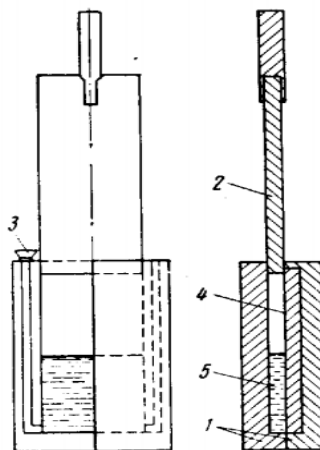


Рис. 1.14 - Схема послідовної заливки шарів біметалічного плоского злитку:

1 – роз'ємний кокіль; 2 – підйомний вкладиш; 3 – литник; 4 – сплав, що заливається в першу чергу; 5 – сплав, що заливають другим.

В процесі залиття другої складової відбувається часткове наплавлення по площині з'єднання з залитою раніше складовою, що у випадку дотримання певного температурного режиму забезпечує надійне з'єднання шарів. Після затвердіння другого шару виливницю розбирають та з неї витягають двошаровий злиток з двома литниками, який після обрізки литників нагрівають і прокочують на лист.

Головною перевагою цього методу є те, що він дає можливість з'єднувати такі сплави, які не вдається з'єднати сумісною пластичною деформацією через те, що існує суттєво велика різниця в температурах гарячої обробки тиском.

У порівняння з заливкою твердої складової цей метод має перевагу в тому, що при поступовій заливці забезпечується більш міцне з'єднання

шарів і усуваються трудомісткі операції при підготовці поверхні залитої пластини.

На сьогоднішній день цей метод застосовується лише для отримання двошарових виливків розміром 40 x 220 x 550 мм (40 кг) при виробництві біметалів, які мають відмінні температури плавлення складових. Співвідношення товщини шарів в цих термобіметалах складає 1 : 1,35.

Особливістю вертикальної установки для отримання біметалічного плоского злитку є наявність двох кристалізаторів, розташованих на різних рівнях по висоті. Автори цього методу запропонували дві схеми різних установок для отримання двошарових та тришарових плоских злитків та схеми розливних установок для отримання двошарових круглих злитків й двошарових труб [41, 42].

При цьому методі здійснюється лиття спочатку одного шару через кристалізатор простого типу, а після цього на рівні, де відбулось утворення досить товстої скоринки у безперервного злитку, заготовка потрапляє у інший кристалізатор, в який заливається другий метал (рисунок 1.15).

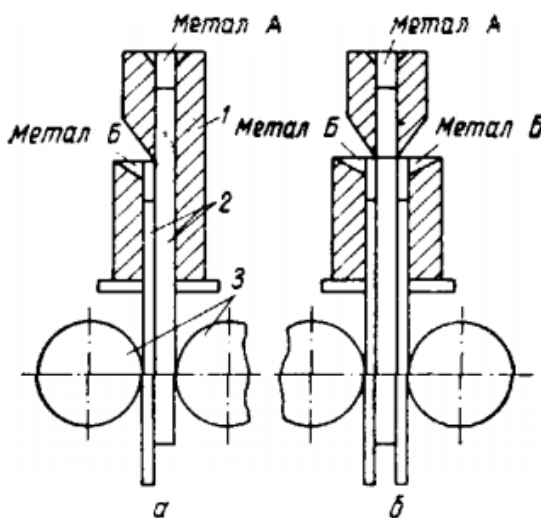


Рис. 1.15 - Схема безперервного лиття двошарового (а) чи тришарового (б) біметалічних плоских злитків: 1 – кристалізатор; 2 – шар відлитого металу; 3 – ролики, що тягнуть

Представлений метод, може бути застосований для отримання тришарових виливків круглого, плоского та квадратного перетину, а також біметалічний злитків з місцевим плакуванням. Для цього була запропонована принципова схема безперервного лиття з похилим розташуванням кристалізатору (рисунок 1.16) [43].

Після затвердіння біметалічні виливки розрізають і вони піддаються тим операціям, які необхідні і для простих суцільних литих заготовок при отриманні з них кінцевого продукту — прокату потрібних розмірів та форми.

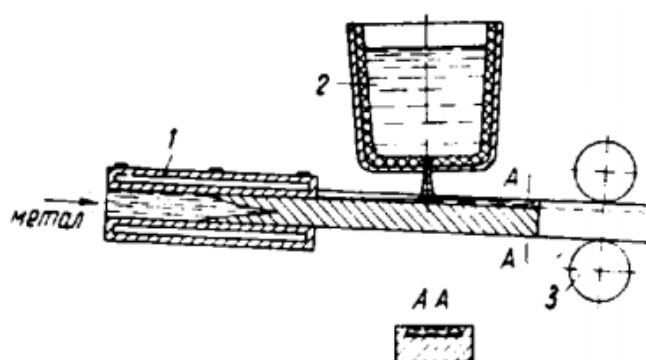


Рис. 1.16 - Схема безперервного лиття біметалу злитку з похилим розташуванням кристалізатора: 1 – кристалізатор для отримання злитку з жолобом; 2 – ківш з металом плакуючого шару; 3 – ролики, які тягнуть.

Заливка рідкого металу в проміжок між двома рухомими нагрітими стрічками. Цей спосіб був запропонований у США, однак відомостей в літературі не опубліковано (рисунок 1.17).

Відцентрове лиття біметалічних труб та втулок. При цьому способі здійснюється або заливка одного металу чи сплаву на тверду основу, чи послідовне лиття в кокіль, який обертається з двома різними металами. В другому випадку необхідна пауза після заливки першого матеріалу для його затвердіння, після цього заливається другий метал.

Цей спосіб може бути застосований, як для отримання двошарової вставки підшипників (сталь та бронза), так і для отримання двошарових

трубних заготовок і листів, що піддаються гарячій чи холодній прокатці на менший розмір [44].

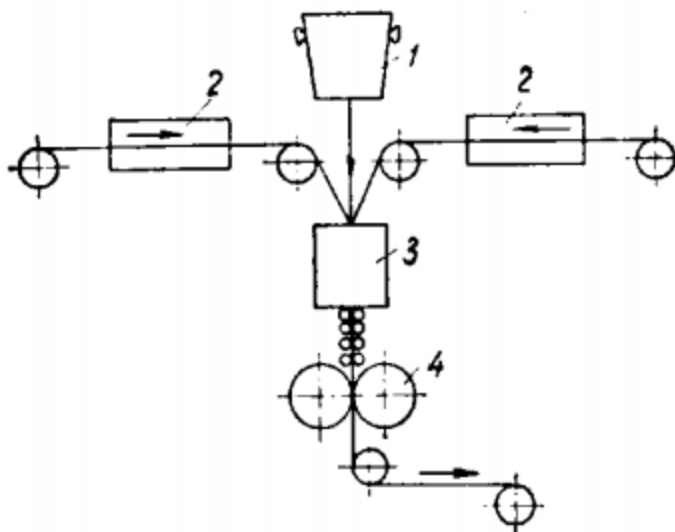


Рис. 1.17 - Схема отримання біметалу заливкою рідкого металу між двома нагрітими стрічками: 1 – ківш з рідким металом; 2 – печі для підігріву стрічок; 3 – кристалізатор; 4 – ролики, що тягнуться.

Способи виготовлення наплавленням

Одним з варіантів виготовлення біметалів є нанесення на основний метал наплавленого за допомогою зварювання плакувального шару, що має високу корозійну стійкість або зносостійкість. У таких випадках наплавлений шар створюється, як правило, електродуговим зварюванням неплавким електродом з присадкою зі сталі, застосованої для утворення плакуючого шару, в середовищі захисного газу. Наплавлення дуговим електрозварюванням широко використовується для захисту від корозії або зносу поверхонь різних деталей, що стискаються в процесі експлуатації з агресивним середовищем. Щоб уникнути неспроможності між нанесеними зварювальними валиками часто наплавлення проводять в два або більше шарів. При виготовленні великогабаритного листового прокату двошарових сталей процес нанесення наплавлення стає малопродуктивним, тому наплавлення наносять на поверхню сляба, підготовленого для подальшої

прокатки на лист необхідних розмірів. В даний час спосіб виготовлення двошарової листової сталі нанесенням наплавленого шару електродуговим зварюванням практично не використовується, так як інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в середині XX століття був розроблений і успішно впроваджений в промисловість новий спосіб з'єднання металів за допомогою електрошлакового зварювання, коли основним тепловим джерелом є шлакова ванна. На основі цього процесу з'явилася нова технологія отримання біметалів - електрошлакове наплавлення (ЕШН) [25–27].

Процес ЕШН має ряд істотних переваг перед дуговим наплавленням:

- збільшення продуктивності по масі наплавленого металу до 6 разів;
- зменшення витрат електроенергії на 15-20%;
- можливість наплавлення великої товщини металу за один прохід;
- зменшення частки участі основного металу в наплавленому шарі;
- поліпшення якості наплавленого металу по шкідливих домішках.

Суть методу ЕШН полягає в тому, що на розташовану в спеціальному кристалізаторі заготовку основного металу, за допомогою рухомого з певною швидкістю електрода, що складається з однієї або декількох смуг або прутків сталі для плакування наноситься шар розплавленого металу (рисунок 1.18). Кристалізатор являє собою пристрій, в якому рідкий наплавлений метал кристалізується. Для запобігання перегріву кристалізатори, які зазвичай виготовляють з міді, охолоджують проточною водою, а їх поверхні, що контактують з розплавами шлаку і металу, покривають графітом для захисту від електрохімічної ерозії.

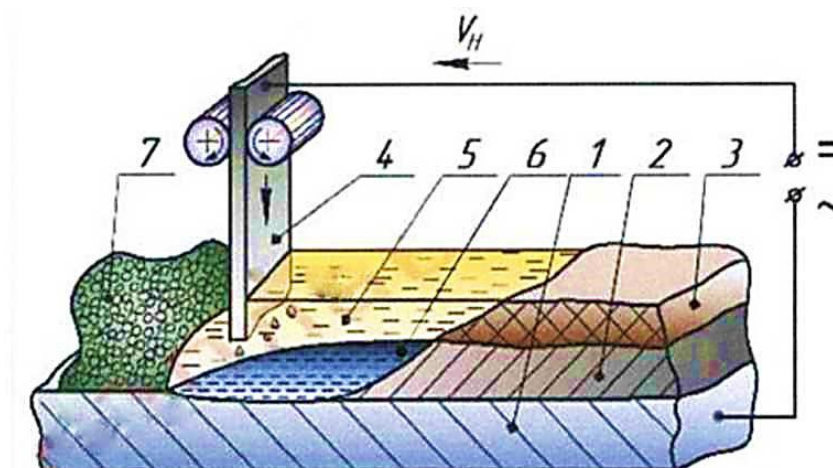


Рис. 1.18 - Схема процесу електрошлакового наплавлення: 1 - основний метал; 2 - наплавлений метал; 3 - шлакова кірка; 4 - смуга наплавленого металу; 5 - шлакова ванна; 6 - кристалізатор; 7 - зварювальний флюс.

Необхідною умовою ведення процесу електрошлакового наплавлення є наявність шлакової ванни. Створення шлакової ванни досягається шляхом розплавлення флюсу до рідкого стану в тигельній печі і заливкою шлаку перед початком наплавлення в робочу зону процесу ЕШН. Підтримка шлакової ванни протягом всього процесу ЕШН здійснюється шляхом додавання флюсу на дзеркало розплавленої шлакової ванни.

Важливою вимогою до процесу наплавлення є забезпечення його стійкості. Для підтримки стійкості процесу ЕШН необхідно стабілізувати температуру, об'єм шлакової ванни і глибину занурення електроду в шлак.

Незважаючи на ряд істотних переваг способу ЕШН, таких як забезпечення високої чистоти сталі плакувального шару по сірці, кисню і неметалічних включеннях, при виготовленні плакованих великогабаритних листів має ряд недоліків, а саме:

- необхідність збереження після прокатки плакувального шару збільшеної товщини із за можливого утворення суцільності між смугами з наплавленого металу в процесі створення ЕШН;
- можлива нерівномірність по товщині плакуючого шару;

- підвищена у порівнянні з іншими способами витрата дорогої нержавіючої сталі.

При використанні технології плазмового наплавлення біметалічних листів наплавлений шар може містити карбіди: Fe_3C ; Mn_3C ; Cr_7C_3 ; W_2C ; WC ; VC ; TiC ; B_4C , Mo_2C , та ін, а також карбоборіди, нітриди заліза і легуючих елементів. У процесі наплавлення використовуються матеріали як вітчизняних, так і зарубіжних виробників. Це дозволяє вибрати необхідний склад металу, що наплавляється, виходячи з умов роботи виробу, характеру і інтенсивності зношування. Твердість наплавленого шару біметалу за Роквеллом становить 58 - 62 HRC, твердість карбідів - до 1400 HRV [28, 29]. Максимальна температура при якій можливе використання біметалічної футеровки становить до 600 градусів С.

Зносостійкі листи можуть використовуватися в самих різних вузлах промислового устаткування. Збирання, з'єднання і закріплення біметалічних виробів на поверхні, що захищається, проводиться або за допомогою зварювання, або за допомогою болтових з'єднань, шпильок та ін. [30].

Зварювання вибухом в даний час знаходить все більш широке застосування при виготовленні двошарових плакованих сталей і інших біметалів. Тільки за допомогою зварювання вибухом стало можливим створювати з'єднання однієї міцності сталей з титаном, цирконієм, виготовлення яких неможливо іншими способами зварювання. В.І. Лисак і С.В. Кузьмін [31] дають таке визначення терміну «зварювання вибухом». Зварювання вибухом - «явище міцного з'єднання поверхонь металевих тіл, які співударяються під деяким кутом, принаймні одне з яких розганяється до швидкостей 150-100 м/с продуктами детонації вибухової речовини».

Розвиток технологій зварювання вибухом успішно здійснювалося в інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, Волгоградському ГПУ (В.С. Сєдих, В.І. Лисак, С.В. Кузьмін), московському інституті сталі і сплавів, і в ряді інших наукових і виробничих підприємств [6, 32–34].

Фізична природа і механізм твердофазного зварювання, до якої відносяться зварювання пакету гарячої прокаткою і зварювання вибухом, більшістю дослідників пояснюється за допомогою гіпотези топохімічної реакцій, заснованої на фізичному поданні про недосконалість кристалічної решітки і кінетики протікання місцевих поверхневих хімічних (топохімічної) реакцій [34, 48, 49, 51]. Умовно розвиток топохімічної реакції поділяють на три стадії (рисунок 1.19).

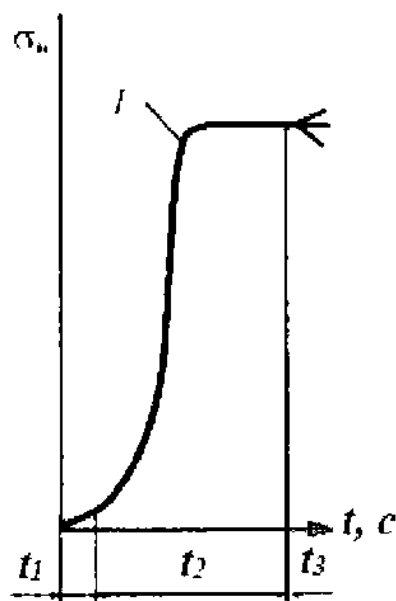


Рис. 1.19 - Зміна опору відриву біметалу в часі в процесі зварювання вибухом.

1) утворення фізичного контакту, коли відбувається зближення атомів металів, що сполучаються за допомогою пластичної деформації на відстань, де починають діяти сили Ван-дер-Вальса або навіть слабке хімічну взаємодію (t_1). При певному спрощення процес утворення фізичного контакту можна уявити, як зминання мікровиступів під дією напружень при контакті. Якщо вважати, що згладжування при пластичному перебігу протікає по дислокаційної механізму [56], то час процесу складе приблизно 10^{-9} с. Це означає, що утворення фізичного контакту не є лімітуючою стадією процесу зварювання вибухом;

2) активація контактних поверхонь з утворенням активних центрів на поверхні більш твердого із з'єднуваних металів (t_2). За теорією топохімічної реакцій активація контактних поверхонь є необхідною і достатньою умовою утворення зварного з'єднання в твердій фазі. Вона полягає в розриві хімічних зв'язків між атомами;

3) об'ємна взаємодія настає з моменту утворення активних центрів на з'єднуються поверхнях. Протягом цієї стадії розвиток взаємодії з'єднуються металів як в площині контакту з утворенням міцних зв'язків, так і в обсязі зони контакту (t_3). У площині контакту процес закінчується злиттям дискретних вогнищ взаємодії, а в об'ємі - релаксацією напружень.

За даними, викладеними в роботах [52, 54] при зварюванні вибухом з високо-інтенсивним силовим впливом третя стадія топохімічної реакції (об'ємного взаємодії) не встигає розвинути.

Необхідно також відзначити ще один важливий фактор, що супроводжує процес зварювання вибухом, а саме, локальне підвищення температури в зоні з'єднання. У деяких випадках, особливо при зварюванні вибухом міді і алюмінію, підвищення температури досягає точки плавлення, що призводить до появи ділянок оплавленого металу.

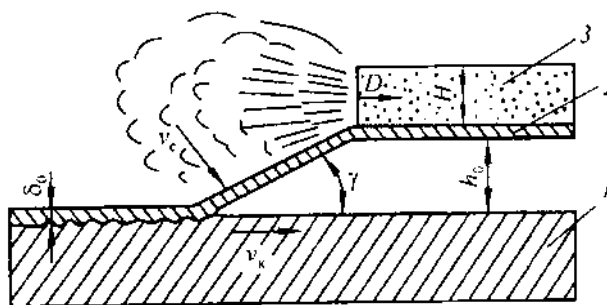


Рис. 1.20 - Схема зварювання вибухом плоских двошарових заготовок.

До теперішнього часу розроблені і застосовуються на практиці безліч технологічних схем зварювання вибухом, але в їх основі лежать всього дві принципові схеми - кутова і паралельна (рисунки 1.20).

Спочатку зварюються пластини 1 і 2 розміщують одну над іншою з певним зазором δ_0 , якій потрібно для надання необхідної швидкості. Пластини встановлюються або під кутом один до одного, або паралельно. На пластину, як буде наноситись, встановлюють заряд вибухової речовини 3 з детонатором І. Весь зібраний пакет встановлюється на підставу з піску, ґрунту, бетону і т.п.. Після підриву вибухової речовини під дією високого тиску, що утворюється, плакувальна пластина згинається на певний кут у і набирає швидкість V до декількох сотень метрів в секунду, при якій вдаряється об нерухому пластину. Вершина цього кута (лінія контакту) переміщається в напрямку поширення детонації, створюючи умови для спільного пластичного деформування металів, що зварюються і формуванню з'єднань.

До недоліків зварювання вибухом можна віднести:

- високі вимоги по очищенню контактуючих поверхонь від окалини, іржі та інших забруднень;
- забезпечення підвищеної площинності листів перед зварюванням вибухом;
- складність в рівномірному розподілі зарядів при великій протяжності зварювальних листів;
- необхідність в ряді випадків проведення термічної обробки для зниження внутрішніх напружень в зоні зчеплення шарів.

Досить часто на практиці операцію зварювання вибухом супроводжують гарячою прокаткою. В цьому випадку береться заготовка основного металу великого перерізу, який необхідний для отримання біметалу гарячою прокаткою. Також сталь для створення плакувального шару береться з певним запасом по товщині. При використанні такого варіанту усуваються два останні з зазначених недоліків, хоча помітно збільшується трудомісткість виготовлення біметалу [34].

Зварювання тертям

В одній з перших робіт [36] присвячених зварюванню тертям біметалевої пари алюмінію (АД1) з міді (МІ) розглянуто основні особливості процесу. Алюмінієву заготовку затискали в роз'ємну сталеву оправку, яка відводить тепло і перешкоджає вільній деформації алюмінію при зварюванні. Ця заготовка виступала з оправки на визначену величину (виліт), довжина якого залежить від діаметру зразка. Випробування на розтяг показали, що у всіх випадках, крім зразків, зварених на режимі з Руд.н. = 20 МПа, руйнування відбувалося по алюмінію на відстані від стику. Оптимальними питомими тисками при нагріванні та проковуванні є відповідно 30 і 200 МПа.

Аналіз зварних з'єднань показав відсутність в стику пор і включень. Мікротвердість у зоні стику змінюється з боку міді в межах від 116 МПа (стик) до 840 МПа (матриця), а з боку алюмінію – відповідно 550 - 340 МПа. Таким чином, можна стверджувати, що в прилеглій до стику вузькій смужці алюмінію і міді спостерігається наклеп. Проглядається лінія розділу двох металів товщиною близько 5 мкм. При цьому якість зварного з'єднання, як показали результати механічних випробувань, цілком задовільна.

З'єднання сплаву алюмінію АМц з міддю вивчали в роботі [57]. При зварюванні тертям подібних пар утворення з'єднання відбувається без макродеформації більш міцного матеріалу. Останнє пов'язане з різкою різницею опору деформування матеріалів при температурі, що розвивається в стику при зварюванні. Зварювання зразків діаметром 20 мм з АМц з міддю проводили в оправці (осадочній матриці). Процес зварювання регламентувався по осадці.

При металографічному дослідженні з'єднань було встановлено, що в стику при збільшенні 1800 спостерігається переривчаста лінія інтерметалідного прошарку. Ширина прошарку незначно відрізняється в

з'єднаннях, зварених на різних режимах, і не перевищує 1,5 мкм. Аналіз результатів механічних іспитів показав, що міцність з'єднань в зоні стику при питомому тиску нагрівання від 25 до 100 МПа й осадці від 2 до 10 мм при зварюванні з проковуванням майже не змінюється, що, імовірно, пов'язано з незначною зміною ширини прошарку при варіюванні параметрів зварювання. При зварюванні зі збільшенням тиску проковування спостерігається підвищення міцності зони стику в порівнянні зі зварюванням без проковування. У цьому випадку підвищення міцності з'єднання не може бути пояснено зменшенням товщини прошарку. У той же час можна припустити, що збільшення тиску проковування призводить до росту площі і кількості ділянок схоплювання в зоні контакту, що і забезпечує підвищення міцності з'єднання.

У роботі [38] основна увага приділена питанням підготовки поверхонь до зварювання, приведені режими зварювання прутків діаметром 20-30 мм. Сумарна осадка (в основному алюмінію) складає 0,7-1,0 від діаметра заготовки. Рекомендується проводити підрізання поверхонь торців на токарному верстаті безпосередньо перед зварюванням. Після закріплення заготовок у затискачах зварювальної машини необхідно проводити знежирення поверхонь, які з'єднуються, спиртом чи бензином. Стверджується, що така технологія гарантує одержання з'єднань рівноміцних основному металу (алюмінію).

Розглянуті літературні дані по зварюванню міді з алюмінієм отримані при конвекційному (звичайному) зварюванні тертям, для якого характерне швидке примусове припинення обертання. У роботах [39, 40] розглянуті особливості зварювання міді МІ з алюмінієм АД1 при різних різновидах зварювання тертям — конвекційному, інерційному і комбінованому, основною відмінністю яких є динаміка зменшення швидкості обертання на заключній стадії процесу зварювання. В результаті виміру температури зони контакту встановлено, що на досліджуваних режимах температура досить

швидко (за 0,4...1,2 с) досягає значення 350...500 °С, тобто температури, при якій може відбуватися хімічна взаємодія зварюваних металів, що супроводжується реактивною дифузією та утворенням інтерметалідних з'єднань. Процес нагрівання стику відбувається нерівномірно. Максимум тепловиділення в початковий період тертя зафіксований у кільцевій зоні, розташованій в інтервалі від периферії зразків до 0,5R від центра, мінімум — у центрі. Різниця між максимальною і мінімальною температурою нагрівання в цей період складає до 150 °С. Зі збільшенням колової швидкості інтенсивність росту температури збільшується і збільшується процес вирівнювання температури по перетину. Збільшення тиску при нагріванні (P_n) інтенсифікує нагрів поверхонь, але при досягненні $P_n=40-70$ МПа температура знижується, що пов'язано з витисненням із зони контакту нагрітого металу [39, 40].

З'єднання, що мають найкращі показники міцності і пластичності, отримані при $v = 1,5...2,0$ м/с і $P_n = 40...70$ МПа, при яких забезпечується швидкість осьової деформації 5,5...8,0 мм/с. Однак, одержати з'єднання зі стабільно високими показниками механічних властивостей і уникнути утворення інтерметалідного прошарку при конвекційному зварюванні не вдається. У перехідному шарі таких з'єднань переважає фаза, що відповідає інтерметалідному з'єднанню $CuAl_2$. При дослідженні структури з'єднань пори, раковини і не сплавлення по границі розділу не виявлені. Результати виміру мікротвердості показали, що товщина ущільнених приконтактних шарів алюмінію з мікротвердістю HV 340...360 МПа складає 1,5...2,0 мм. До цих шарів примикає область металу з рекристалізованим зерном, що має мікротвердість HV 320...330 МПа [39].

При інерційному зварюванні, у відмінності від конвекційного, осьове зусилля на заключній стадії процесу прикладається до заготовок, що обертаються, тим самим забезпечується більш висока інтенсивність і

ступінь локалізації деформації в зоні контакту, чим при конвекційному зварюванні.

У процесі металографічних досліджень якісних зварних з'єднань, отриманих інерційним зварюванням, авторам не вдалося знайти перехідний шар з інтерметалідною фазою. Рентгеноспектральний аналіз підтвердив відсутність інтерметалідної фази в зоні з'єднання зразків, отриманих при інерційному зварюванні. На кривих розподілу міді й алюмінію не спостерігаються перегини, характерні для з'єднань з постійним чи перемінним складом; у цій зоні має місце взаємна дифузія міді й алюмінію на глибину до 3 мкм.

Таким чином, для запобігання утворення суцільного інтерметалідного прошарку при зварюванні тертям необхідно зменшити час стадії нагрівання та інтенсифікувати зсувні деформації на поверхні початкового контакту на стадії проковування.

Можливості застосування для виготовлення біметалів потужних концентрованих джерела енергії

На даний час існує велика кількість методів отримання біметалів з використанням концентрованих джерел енергії таких як плазмове наплавлення металевого порошку [41], дугове наплавлення [42], магнітно-імпульсна зварювання [43, 44], лазерна і електронно-променева обробка [45–47], ультразвукове зварювання [48, 49]. Всі перераховані методи отримання біметалів мають ряд недоліків, в основному технологічних, це складність технології, висока енергоємність процесів, низька продуктивність, вузька спеціалізація використовуваного обладнання, трудомісткість і не регулярна повторюваність технологічного процесу.

Застосування лазерного зварювання для виготовлення біметалічних заготовок вирішує багато з проблем перерахованих вище, широко поширених методів. При лазерному зварюванні металів досягається висока

якість шва і не потрібно застосування вакуумних камер, як при електронно-променевому зварюванні, а це дуже важливо в конвеєрному виробництві. Воно дозволяє не тільки підвищити якість обробки матеріалів, а й поліпшити техніко-економічні показники виробничих процесів [50].

Основними перевагами лазерного зварювання є можливість отримання з'єднань різнорідних металів, висока швидкість, короткочасний нагрів, незначна величина зони термічного впливу, можливість застосування універсального лазерного обладнання, можливість автоматизації і роботизації технологічного процесу, висока швидкість процесу.

З огляду на програмне управління лазерним устаткуванням при відпрацьованій технології можна забезпечити високий показник відтворюваності процесу зварювання, що має велике значення в умовах серійного виробництва.

Сутність процесу кліщового лазерного зварювання [50] при виготовленні біметалів полягає в отриманні з'єднання внахлест шляхом проплавлення променем двох або більше однорідних або різнорідних металевих листів, розташованих один над одним. Лазерний промінь, для збільшення площі з'єднання, рухається при цьому по певній траєкторії.

Дослідження лазерного зварювання різних матеріалів [45], особливо між алюмінієм та сталлю, проводилися на протязі багатьох років. Однак широке застосування зварювання сталі з алюмінієм обмежено неможливістю виготовлення зварних швів з механічними властивостями, достатніми для задоволення вимог експлуатації. Лазерно-дугове гібридне зварювання поєднує в собі переваги лазерного зварювання, що забезпечує стабільність процесу, можливість введення значної кількості енергії без втрати локальності процесу, значне збільшення глибини зварювання.

Лазерне та лазерно-дугове гібридне зварювання [45] з метою з'єднання оцинкованих сталей з алюмінієвими сплавами і надалі буде

привертати увагу дослідників. На даний час утворення біметалів на основі сталі і алюмінієвих сплавів в наслідок утворення крихких Fe-Al інтерметалідних сполук є дуже важливою проблемою промисловості не тільки України а і інших країн світу.

Привабливою для виготовлення біметалів є технологія, що розроблена фірмою «Still Work» (Україна).

Біметалеві SWIP листи, що виготовляються згаданою фірмою представляють собою двошаровий матеріал, що складається з двох різних металів (сталей або сплавів) міцно з'єднаних між собою по всій площині дотику. Основою таких листів може бути як звичайна низьковуглецева сталь, так і жароміцні сталі. На основу порошковим наплавленням з використанням плазми наноситься спеціальне зносостійке покриття.

Функціональний шар біметалічних листів SWIP може містити карбіди: Fe_3C ; Mn_3C ; Cr_7C_3 ; W_2C ; WC ; VC ; TiC ; B_4C , Mo_2C та ін., а також карбобориди, нітриди заліза і легуючих елементів. У процесі наплавлення використовуються матеріали як вітчизняних, так і зарубіжних виробників. Це дозволяє вибрати необхідний склад металу, що наплавляється, виходячи з умов роботи виробу, характеру і інтенсивності зношування. Твердість наплавленого шару біметалу за Роквеллом становить 58 - 62 HRC, твердість карбідів - до 1400 HRV [20].

На сьогодні максимальна температура, при якій можливе використання біметалічної футеровки становить до 600 °C.

Зносостійкі листи SWIP використовуються в самих різних вузлах промислового устаткування. Збірка, з'єднання і закріплення біметалічних виробів на поверхні, що захищається, проводиться або за допомогою зварювання, або за допомогою болтових з'єднань, шпильок та ін.

Застосування зносостійких листів SWIP визначається цілою низкою переваг, порівняно з однорідними металевими матеріалами, що дозволяє

створити комплекс експлуатаційних властивостей, недосяжних в сталях або сплавах.

Застосування біметалічних листів SWIP доцільно з наступних причин:

- можливість захисту обладнання від будь-якого виду зносу;
- значне збільшення терміну служби устаткування за рахунок підвищення зносостійкості поверхні, що захищається;
- зменшення ваги футеровки до 50% і, як наслідок, збільшення продуктивності обладнання;
- скорочення витрат на спеціальні ремонтні бригади;
- відсутність тривалих простоїв виробництва;
- відсутність необхідності в придбанні нового дорогого обладнання;
- скорочення витрат на спеціальні ремонтні бригади;
- скорочення витрат на обслуговування і ремонти;
- зменшення операційних витрат на утримання обладнання і, як наслідок, зниження собівартості продукції;

Розглянуті у першому розділі технології виробництва біметалічних матеріалів за основу беруть процес з'єднання металів з рідкої фази. Технологічні процеси, що було проаналізовано, на сьогоднішній день мають багато недоліків, основними з яких є розплавлення всього об'єму металів, що з'єднуються, утворення дефектів та локальних напруг (рисунки 1.21).

Одним із передових способів вироблення біметалічних матеріалів є електродугове та плазмове наплавлення. Такі процеси є досить гнучкими і дозволяють отримувати матеріали різної конфігурацій та розмірів придатних для промислового використання.

Незважаючи на існуючі проблеми біметалічні матеріали отримали широке розповсюдження в сучасній промисловості завдяки економічно

обґрунтованому раціональному використанню матеріалів та можливості отримання матеріалів з унікальними технологічними властивостями.

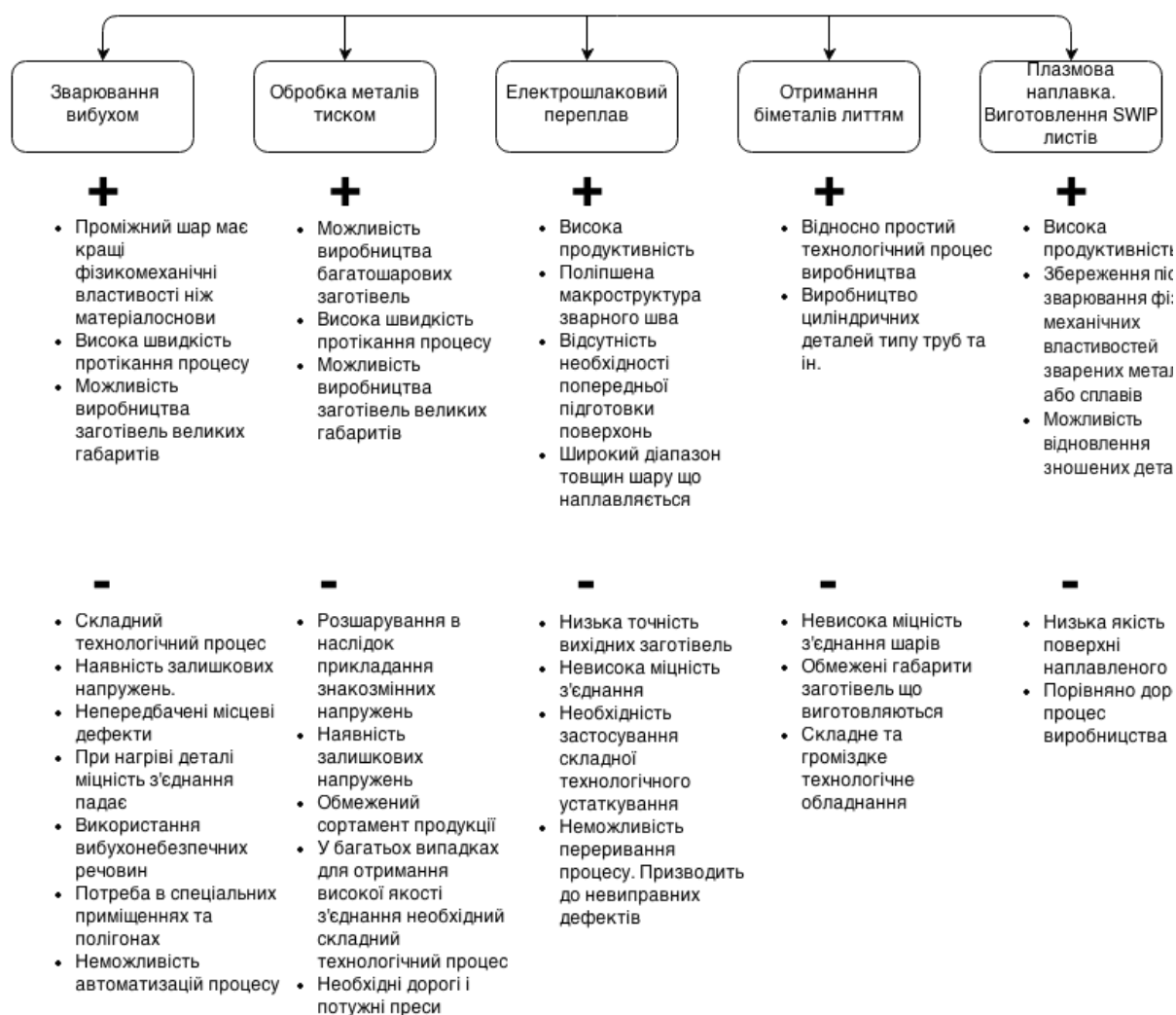


Рис. 1.21 - Основні переваги і недоліки існуючих способів виготовлення біметалів

1.6. Мета й завдання дослідження

Для підвищення експлуатаційних властивостей металевих виробів на їх поверхню наносять різноманітні покриття. Набули поширення технології нанесення на робочі поверхні виробів різного виду адгезійних покриттів (газо- полум'яне, полум'яне, детонаційне, вакуумне напилення, електролітичне осадження та ін.). Поряд з високою продуктивністю, широкою гамою матеріалів, що наносяться, основним їх недоліком є

обмежена товщина якісних покриттів і головне - низька міцність їх зчеплення з основою, що не перевищує 15-20 кг/мм².

Встановлено, що найбільш ефективними в цьому плані є процеси, при яких на поверхню виробів наносяться різного виду функціональні матеріали за допомогою обробки тиском, литтям, електронно-променевим, лазерним, електродуговим, плазмовим та електрошлаковим наплавленням, зварюванням вибухом. Основна перевага цих способів - висока міцність з'єднання покриття з основою, яка визначається міцністю одного з матеріалів, що з'єднуються, і те, що вони, окрім останнього, дозволяють управляти процесом формування біметалічних композицій, надаючи їм необхідні властивості.

Аналіз літературних джерел щодо існуючих методів виготовлення біметалів показує, що використання висококонцентрованих джерел - потоків плазми, електронно-променевого та лазерного випромінювання, забезпечують достатньо високу якість з'єднання компонентів біметалу, при малій продуктивності виробництва, або навпаки – високу продуктивність при недостатній якості біметалу та низькому рівні відтворюваності результатів.

На сьогодні найбільшого поширення в промисловості отримав спосіб виготовлення біметалів вибухом. Він характеризується високою продуктивністю, низькою собівартістю, широкою номенклатурою біметалів, простотою організації процесу. Але при цьому він має і ряд суттєвих недоліків, як низька керованість процесом, невисока якість зварювання, особливо при великій площі, що з'єднуються, великий рівень шуму і вібрацій, що вимагає застосування заходів захисту.

З цієї точки зору на сьогодні найбільш ефективними є плазмові технології, що дозволяють виготовляти біметалічні листи і вироби з них. Вони отримали широке поширення при виготовленні футеровок в

металургійному виробництві, деталей, що працюють в умовах гідро -, газо - і ударно-абразивного зношування.

Відзначаючи досягнуті успіхи в розробці і використанні технологій отримання біметалічних композицій, слід зазначити, що в практиці розробки таких технологій істотна роль поки належить інтуїтивним експериментальним підходам, при наявності дуже обмежених кількісних оцінок. Крім того, сучасні методи виробництва біметалічних матеріалів мають певні недоліки, що стосуються продуктивності процесів, якості поверхні, їх структурно-фазового і напруженого стану, обмеженості у виборі складових біметалів.

Не вирішеною у повній мірі залишається проблема підвищення якісних й експлуатаційних характеристик біметалів, які працюють в екстремальних умовах.

Наведений вище аналіз показав, що основними напрямками підвищення ефективності виробництва біметалів є інтенсифікація та оптимізація процесів масопереносу в зоні з'єднання складових шляхом управління станом їх поверхонь. Це дає підставу вважати, що підвищити ефективність їх виготовлення і якість можна розділивши весь процес виготовлення на два етапи. На першому етапі застосувавши висококонцентроване джерело енергії, лазерне випромінювання, сфокусоване у відрізок лінії з розподілом інтенсивності типу Тор - Нат або розгорнуте у відрізок лінії за допомогою спеціального скануючого пристрою, здійснюється розплавлення поверхневого шару одного із складових біметалу на глибину 30-50 мкм. Одночасно з початком його переміщення на розплавлену поверхню зі спеціальної фурми з заданою витратою подається розплав другої складової біметалу, попередньо підготовленого за допомогою індукційного нагріву.

Метою даної роботи є розробка високоефективних процесів виготовлення біметалів з урахуванням умов їх експлуатації, вимог до

продуктивності, енергоємності і економічної ефективності з застосуванням лазерно-ливарних, механо-ливарних й інших комбінованих методів та розробка відповідного обладнання.

Основні задачі, які потрібно вирішити для досягнення поставленої мети:

1. Розробити нові підходи до реалізації лазерно-ливарних процесів виготовлення біметалів, визначивши їх енергетичні та інші технологічні показники.

2. Розробити принципово нові способи отримання біметалів лазерно-ливарним, механо-ливарним методами, та комбінованими - з попередньою підготовкою поверхні складової, застосуванням процесу електродугового зварювання.

3. Провести теоретичні та експериментальні дослідження запропонованих процесів, визначити взаємозв'язки між їх вихідними технологічними параметрами, кількісними і якісними характеристиками отриманих поверхневих шарів.

4. Розробити обладнання та рекомендації для практичного використання лазерно-ливарних та механо-ливарних процесів виготовлення корозійностійких біметалів при формуванні на поверхні функціональної складової регулярного мікрорельєфу з різною топографією.

5. Розробити принципово нові способи отримання корозійностійких біметалів при використанні потужних джерел енергії.

6. Розробити нові методи та рекомендації для виготовлення деформованих та гнутих біметалів при їх використанні для формоутворення коробчастих конструкцій.

7. Створити нові підходи для виготовлення алюмо-стальних біметалів і рекомендації до їх впровадження у виробництво.

8. Оцінити можливості реалізації проекту виготовлення біметалів на ринку «Startup» по запропонованим новим технологіям отримання біметалів.

9. Розробити рекомендації до впровадження розроблених процесів у виробництво біметалів.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ

2.1. Розробка процесу виробництва біметалів лазерно-ливарним методом

Виходячи з необхідності утворення міцного з'єднання між матеріалом основи та матеріалом що наплавляється постає задача підігріву поверхневого шару основи до температури плавлення. Це необхідно для утворення металургійного зв'язку між матеріалом що наплавляється та основою. В процесі аналізу різних схем утворення біметалічних композитів були обрані два найбільш технологічно доцільні варіанти.

Перший варіант передбачає сканування основи 7 лазерним пучком 2 по пилоподібній траєкторії з частотою f . Позаду пучка на визначеній постійній відстані ллється розплав з фурми 4, шириною що відповідає ширині основи. Основа є рухома по осі OX і рухається прямолінійно з постійною швидкістю V (рисунок 2.1). Сканування відбувається по всій ширині основи у напрямку осі OY .

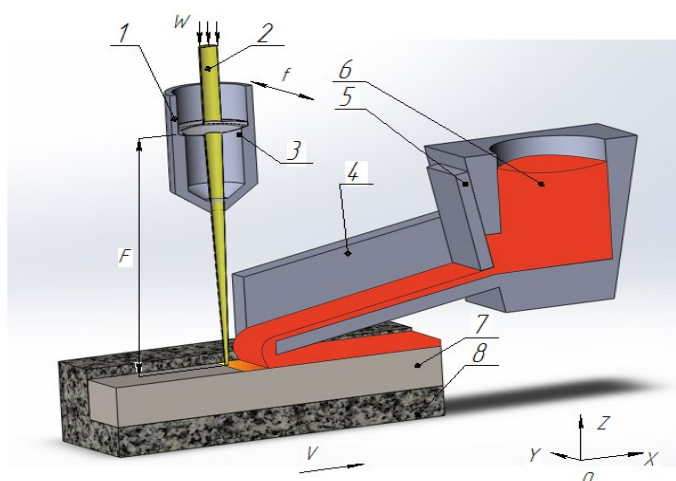


Рис. 2.1 – Схема лазерного біметалічного композиту з використанням скануючого лазерного ручка: 1 – сопло; 2 – лазерний пучок; 3 – лінза; 4 – літник; 5 – заслінка; 6 – розплав; 7 – основа; 8 – форма

Другий варіант передбачає нагрів основи 7 лазерним пучком 2, що має форму лінії ширина якої відповідає ширині основи. Позаду пучка на визначеній постійній відстані летить розплав з фурми 4, шириною що відповідає ширині основи (рисунок 2.2). Основа є рухома по осі OX і рухається прямолінійно з постійною швидкістю V .

В якості базової моделі був обраний перший варіант адже він не потребує комплексної оптичної системи для перетворення лазерного променя в лінію та може працювати з лазерним джерелом меншої потужності ніж було б потрібне для варіанта номер два.

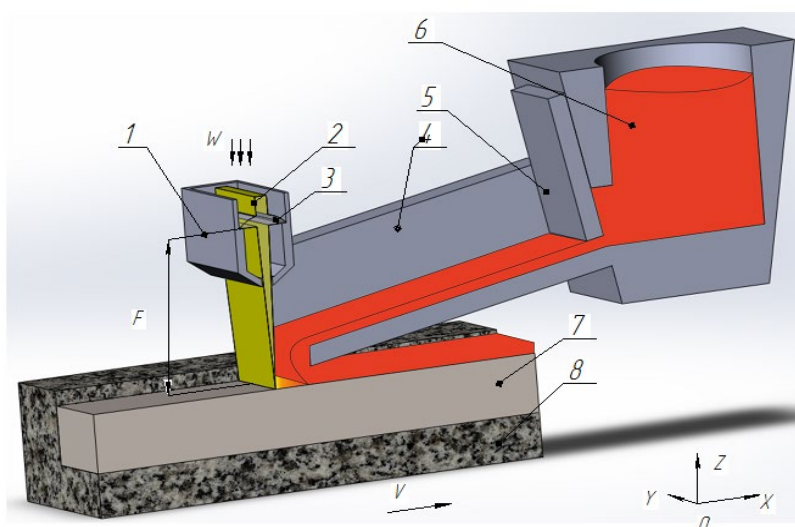


Рис. 2.2 – Схема лазерного біметалічного композиту з використанням скануючого лазерного ручка: 1 – сопло; 2 – лазерний пучок; 3 – лінза; 4 – литник; 5 – заслінка; 6 – розплав; 7 – основа; 8 – форма

Аналіз факторів, що впливають на процес виробництва біметалічних матеріалів при обраній схемі обробки.

Проводячи аналіз факторів що впливають на процес виробництва біметалічних матеріалів при обраній схемі було визначено, що всі фактори можна поділити на:

- параметри сканування лазерного сканування;
- параметри матеріалу основи для біметалу;

- параметри матеріалу розплаву, що наплавляється;
- параметри доставки розплаву, що наплавляється, в зону розплаву основи для біметалу.

До параметрів сканування лазерним випромінюванням відносяться:

- потужність лазерного випромінювання;
- швидкість переміщення основи для біметалу відносно лазерного пучка;
- амплітуда сканування;
- частота сканування;
- поперечні розміри лазерного пучка;
- розподіл інтенсивності лазерного випромінювання.

До параметрів матеріалу основи для біметалу відносяться:

- густина матеріалу основи для біметалу;
- температура плавлення матеріалу основи для біметалу;
- теплоємність матеріалу основи для біметалу;
- теплопровідність матеріалу основи для біметалу;
- поглинальна здатність лазерного випромінювання матеріалу основи для біметалу;
- початкова температура матеріалу основи для біметалу.

До параметрів матеріалу розплаву, що наплавляється відносяться:

- густина матеріалу розплаву, що наплавляється;
- температура плавлення розплаву, що наплавляється;
- динамічна в'язкість розплаву, що наплавляється;
- теплоємність матеріалу розплаву, що наплавляється;
- теплопровідність матеріалу розплаву, що наплавляється.

До параметрів доставки розплаву, що наплавляється, в зону розплаву основи для біметалу відносяться:

- конфігурація отвору крізь який доставляється розплав (довжина, ширина, глибина);
- швидкість розплаву крізь отвір, що напряму залежить від висоти напірного стовпа розплаву;
- товщина слою що необхідно наплавити.

Проаналізувавши параметри обробки були виділені фактори що мають значний вплив на процес наплавлення, а також можуть служити для керування процесом.

- потужність лазерного випромінювання;
- швидкість переміщення основи для біметалу відносно лазерного пучка;
- амплітуда сканування;
- частота сканування;
- початкова температура матеріалу основи для біметалу;
- конфігурація отвору крізь який доставляється розплав(довжина, ширина, глибина);
- товщина слою що необхідно наплавити;
- висота напірного стовпа.

2.1.1 Теплофізичні процеси, що відбуваються в металевих сплавах при лазерному опроміненні та їх моделювання

Перенесення теплової енергії (кінетичної енергії мікрочастинок) в речовині визначається процесами теплопровідності. Явище теплопровідності проявляється при безпосередньому зіткненні окремих частинок тіла або окремих тіл, що мають різні температури. У газах перенесення теплової енергії здійснюється шляхом взаємодії дифундуючих молекул і атомів, а в рідинах і твердих тілах (діелектриках) - пружних хвиль

(фононів). У провідниках перенесення енергії в основному здійснюється шляхом дифузії вільних електронів.

Процес перенесення теплоти теплопровідністю можливий лише тоді, коли в різних точках тіла температура неоднакова. Тому передача теплоти теплопровідністю в речовині супроводжується зміною температури, як у просторі, так і в часі [75].

Температурним полем $T(\vec{r}, t)$ називають сукупність значень температури у всіх точках розглянутого тіла, положення якого задано координатами, x , y , z , або вектором $\vec{r}$, в кожен фіксований момент часу. Основним завданням теорії теплопровідності є вивчення просторово-часового розподілу температури t , тобто визначення залежності $T = T(\vec{r}, t) = T(x, y, z, t)$ [83].

Температурне поле, що змінюється як у просторі, так і в часі, називається нестационарним температурним полем. Для нестационарного температурного поля характерний несталий режим теплопровідності, коли температура змінюється з часом. При обробці матеріалу імпульсним лазерним випромінюванням виникає нестационарне температурне поле.

При сталому тепловому режимі температура в кожній точці тіла з плином часу залишається незмінною, міняючись лише від точки до точки. Таке температурне поле називається стаціонарним. При цьому температура є функцією тільки координат

$$T = T(\vec{r}) = T(x, y, z), \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

У тілі з температурою $T(\vec{r}, t)$ можна виділити поверхню, у всіх точках якої в будь-який момент часу t_1 , температура однакова. Така поверхня називається ізотермічною. Її рівняння має вигляд $T(\vec{r}, t_1) = \text{const}$.

При аналізі теплообміну між двома нескінченно близько розташованими ізотермічними поверхнями з температурами T і $T + \Delta T$

(рисунок 2.3) можна показати, що швидкість зміни температури в деякій локальній точці M , простору в напрямку $\vec{l}$ визначається похідної функції T у напрямку $\vec{l}$

$$\frac{\partial T}{\partial l} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \cos \beta + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \cos \gamma$$

α, β, γ - напрямні кути вектору в декартовій системі координат.

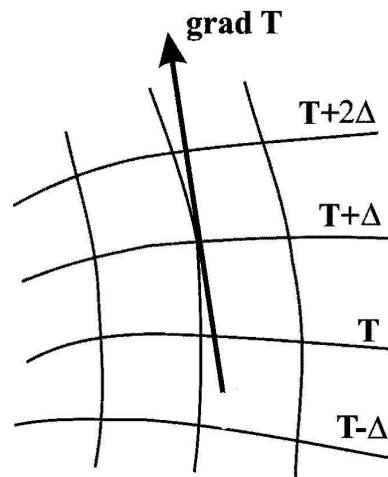


Рис. 2.3 - До визначення температурного градієнту і ізотермічної поверхні

Найбільша швидкість зміни температури спостерігається в напрямку нормалі до ізотермічної поверхні $\vec{n}$. Отже, в будь-якій точці M ізотермічної поверхні можна побудувати деякий вектор, спрямований по нормалі до цієї поверхні в бік збільшення температури, який характеризує швидкість зростання температури в цьому напрямку (тобто похідну від температурної функції $T(\vec{r}, t)$ по напрямку нормалі $\vec{n}$). Такий вектор називають градієнтом температурного поля і записують у вигляді

$$\vec{\nabla} T = \vec{\text{grad}} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - одиничні вектори, що збігаються за напрямком з координатними осями відповідно.

Незалежно від вибору напрямку нормалі $\vec{n}$ вектор $\text{grad } T$ спрямований у бік зростання температури. Він показує: як різко змінюється температура всередині тіла.

Відповідно до сказаного вище, можна записати

$$|\nabla T| = |\text{grad } T| = \frac{\partial T}{\partial n}, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = \vec{n} |\text{grad } T|$$

У тілі з нерівномірним розподілом температури (що не знаходиться в повній тепловій рівновазі) завжди відбувається перенесення теплоти, тобто для передачі теплоти теплопровідністю необхідно, щоб існував градієнт температури, який визначає величину теплового потоку. У цьому сенсі температурний градієнт є основним фізичним параметром, що визначає умову виникнення процесу передачі теплоти. Тепловий потік, на відміну від температури (величини скалярної) має цілком визначений напрямок: від точок тіла з високою температурою до точок тіла з більш низькою [75].

Зв'язок між величинами, що визначають передачу теплоти, встановлює рівняння теплопровідності. Рівняння теплопровідності виведено на основі закону збереження енергії і закону Фур'є. У випадку завдання теплопровідності описується системою диференціальних рівнянь. У разі нерухомого джерела тепла ця система має вигляд:

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \text{div}[-\kappa \text{grad } T] + q_v(\vec{r}, t) \quad (2.1.)$$

Теплофізичні коефіцієнти c - питома теплоємність, ρ - щільність, κ - коефіцієнт теплопровідності в загальному випадку залежать від координат, часу і температури. Тепловий потік $-\kappa \text{grad } T$ вимірюється кількістю теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю площі поверхні, перпендикулярної напрямку потоку в розглянутій точці. Щільність потужності теплового джерела $q_v(\vec{r}, t)$, чинного в обсязі тіла, в загальному випадку також залежить від температури.

При описі лазерного нагріву речовини необхідно враховувати наступні обставини. Оскільки світлова хвиля проникає в глиб середовища, то теплові джерела розподілені в об'ємі середовища, тобто є об'ємними. Через зменшення інтенсивності лазерного випромінювання в міру проникнення його в глиб матеріалу виділення енергії відбувається неоднорідно за обсягом взаємодії, що призводить до неоднорідного нагрівання речовини і, як наслідок, викликає в ньому інтенсивні процеси тепло- і масопереносу між різними ділянками [76].

Найбільш зручна для аналітичного аналізу ситуація, коли матеріал, опромінюваний лазерним пучком:

- а) ізотропне і гомогенне, тобто його властивості однакові в усіх напрямках, а температурні залежності оптичних і теплофізичних коефіцієнтів слабкі;
- б) об'ємне джерело теплоти не залежить від температури.

У цьому випадку, так як $\text{div}(\text{grad}T) = \Delta T$ (Δ - оператор Лапласа), рівняння (2.1) можна перетворити до наступного рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = a \Delta T(\vec{r}, t) + \frac{1}{\rho c} q_v(\vec{r}, t) \quad (2.2)$$

де $a = \kappa / \rho c$ - коефіцієнт температуропровідності.

Рівнянням (2.2) повинна задовольняти функція, що є розподіл температури в тілі.

На відміну від теплопровідності, яка характеризує здатність матеріалу проводити тепло, температуропровідність a характеризує теплоінерційні властивості тіла. Вона є мірою швидкості вирівнювання температурного поля в розглянутому середовищі. Чим більше a , тим швидше змінюється в часі температура. Тобто характеризує здатність речовини змінювати з більшою чи меншою швидкістю свою температуру в часі (визначає ефективність розігріву середовища в процесі перенесення тепла).

Особливо важливо підкреслити, що вид рішення рівняння (1.2) $T = T(x, y, z, t)$ визначається функцією, залежною від щільності теплових джерел $q_v(\vec{r}, t)$ і значеннями теплофізичних постійних ρ , c , κ , а однозначність рішення - граничними умовами для кожного конкретного завдання нагрівання. Зокрема, значення визначає максимальну температуру, відповідну даній щільності потужності об'ємних теплових джерел.

При нагріванні твердих тіл лазерним випромінюванням розподіл щільності потужності світлового потоку в поглинаючій середовищі за глибиною описується законом Бугера - Ламберта, в диференціальному вигляді

$$\frac{dq(z)}{dz} = -\alpha q(z) \quad (2.3)$$

У діапазоні довжин хвиль від дальньої ІЧ-області до ближньої УФ для більшості металів характерний великий коефіцієнт поглинання, який можна вважати незмінним ($\alpha = const$). У цьому випадку зміна щільності світлового потоку по глибині описується інтегральним законом Бугера-Ламберта.

$$q(z) = A q_0 \alpha \exp(-\alpha z) \quad (2.4)$$

де q_0 - щільність падаючого світлового потоку на поверхню матеріалу, A - поглинальна здатність.

У матеріалі з малою теплопровідністю κ при певній щільності потоку $q_0(x, y)$ рівноважна температура завжди вище, ніж в речовині з великим значенням κ . Питома теплоємність проявляється в здатності матеріалу накопичувати тепло, яке надходить від зовнішнього джерела, поки не досягнуто стан рівноваги. Коефіцієнт температуропровідності $a = \kappa / \rho c$ визначає, як вже було зазначено, швидкість встановлення теплового рівноваги в матеріалі при миттєвому включенні теплового джерела. При цьому відстань, на яку тепла хвиля поширюється в матеріалі за час t ,

може бути оцінено як $l_T \approx \sqrt{at}$. Розмір прогрітої області матеріалу зростає за рахунок теплопровідності пропорційно цьому параметру.

Рівняння (2.2) отримано при деякій ідеалізації процесу, тому воно є феноменологічним (описовим) рівнянням. Питання про те, наскільки точно це рівняння описує реальний фізичний процес, що відбувається при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами, може бути вирішене тільки порівнянням результатів, отриманих при вирішенні рівняння і в експерименті. В абсолютній більшості випадків феноменологічний опис процесу теплопровідності знаходиться у вельми задовільній згоді з експериментом, звичайно, при правильному виборі моделі реального процесу.

Рівняння теплопровідності є диференціальне рівняння в приватних похідних, в якому незалежними змінними є час і три просторові координати, а залежною змінною – функція T (температура). Це рівняння першого ступеня (лінійне), оскільки залежна змінна T входить в нього тільки в першого ступеня. Але разом з тим, воно є рівнянням другого порядку, так як оператор Лапласа містить похідні другого порядку від температури T по просторових координатах. Функція $q_v(\vec{r}, t)$ (у загальному випадку) вважається заданою функцією координат і часу [83].

Рівняння теплопровідності є математичною моделлю цілого класу процесів теплопровідності, але воно саме по собі нічого не говорить про розвиток процесу передачі теплоти від лазерного джерела в розглянутому тілі. Математично це пояснюється неоднозначністю рішення диференціальних рівнянь в приватних похідних. Щоб отримати приватне рішення, відповідне конкретній задачі нагрівання матеріалу, необхідно мати додаткові дані. Ці додаткові умови, які однозначно визначають конкретне завдання теплопровідності, називаються умовами однозначності.

В умови однозначності входять:

- 1) геометричні умови, що характеризують форму і розміри тіла, в якому протікає процес теплообміну;
- 2) умови, що визначають фізичні та теплофізичні властивості тіла (тепло - і температуропровідність, теплоємність, щільність), а також закон розподілу об'ємних джерел теплоти $q_v(\vec{r}, t)$;
- 3) граничні умови, що характеризують особливості теплового взаємодії граничної поверхні тіла з навколишнім середовищем. Зокрема, необхідно знати, яким чином відбуваються втрати тепла з поверхні: або за допомогою випромінювання (за законом Стефана-Больцмана), конвекції (за законом Ньютона) або випаровування;
- 4) тимчасові або початкові умови, що визначають розподіл температури в будь-якій частині тіла в деякий момент часу, який для конкретної фізичної задачі задається або приймається за нульовий $t = 0$.

Для тіла певної геометричної форми з відомими фізичними властивостями (задані κ , ρ , c , a) умови однозначності зводяться до завдання початкового і граничних умов. Початкова умова є крайовою умовою за часом, а граничні умови - просторовими крайовими умовами. Ці умови в сукупності називаються крайовими умовами. Диференціальні рівняння теплопровідності разом з крайовими умовами становить крайову теплову задачу.

Початкова умова для рівняння теплопровідності зазвичай складається в завданні температури в початковий момент часу у всіх точках оброблюваної лазерним випромінюванням деталі

$$T(\vec{r}, t = 0) = T_n(\vec{r}), \vec{r} > 0 \quad (2.5)$$

Граничні умови - умови теплової взаємодії тіла з навколишнім середовищем - можуть бути задані в різній формі залежно від характеру процесу. У тих випадках, коли на кордоні тіла не відбувається ніяких процесів з поглинанням або виділенням теплоти, а теплообмін визначається

тільки теплопровідністю, граничні умови на поверхні полягають у рівності температури і теплових потоків на кордоні

$$T = T_{cp}, \quad \kappa \left| \frac{\partial T}{\partial n} \right| = \kappa_{cp} \left| \frac{\partial T_{cp}}{\partial n} \right| \quad (2.6)$$

де T і T_{cp} - температури тіла і середовища, κ і κ_{cp} - теплопровідності тіла і середовища, $\vec{n}$ - нормаль до граничної поверхні тіло - середовища, $\partial/\partial n$ - похідна за напрямком нормалі до граничної поверхні.

Умова (2.6) досить незручно, оскільки для розрахунку температури матеріалу необхідно відшукувати температуру і в навколишньому середовищі, звичайно це повітря або газу, що подаються в зону обробки. З цієї причини в більшості практичних випадках використовують умови, що представляють собою якусь ідеалізацію дійсних фізичних процесів.

Гранична умова I роду полягає в завданні розподілу температури T_0 на поверхні тіла для будь-якого моменту часу

$$T_0 = T(x, y, 0, t). \quad (2.7)$$

В окремому випадку, коли температура на поверхні постійна на протязі всього часу протікання процесів теплообміну, умова (2.7) спрощується і приймає вигляд $T_0 = const$.

При граничних умовах II роду задаються значення щільності теплового потоку для кожної точки поверхні тіла як функції координат і часу

$$\kappa \left| \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} \right| = A q_0(x, y, t) - q_l(T) \quad (2.8)$$

- $\vec{n}$ нормаль до поверхні, A - поглинальна здатність матеріалу, $q_0(x, y, t)$ - функція, що описує тимчасову структуру і просторовий розподіл щільності потоку випромінювання по поверхні тіла, $q_l(T)$ - щільність потужності теплових втрат, пов'язаних з радіаційним або конвективним теплообміном. У разі, коли $A q_0(x, y, t) \gg q_l(T)$, втратами тепла з поверхні можна

знехтувати. При лазерній обробці зазначена умова зазвичай справедливо за таких густин потужності лазерного випромінювання і часу опромінення, коли температура поверхні не перевищує температуру плавлення.

Саме крайові теплові завдання з граничними умовами II роду становлять найбільший інтерес для процесів взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами.

Якщо задані температура навколишнього середовища T_{cp} і закон теплообміну між навколишнім середовищем і поверхнею оброблюваного матеріалу, то говорять, що в тепловій задавданню задані граничні умови III роду

$$q_l = \beta(T - T_{cp}) \quad (2.9)$$

де β - коефіцієнт теплопередачі ($[\beta] = \text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$) характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем. Умова (2.9) можна з урахуванням закону Фур'є представити у вигляді

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \bigg|_{z=0} = \beta(T - T_{cp}) \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) по суті є приватним вираженням закону збереження енергії для поверхні тіла.

Нагадаємо, що рішення рівняння (2.3) може бути отримано кількома способами. Найбільш математично потужними і універсальними є метод розділення змінних, операційний метод або метод інтегральних перетворень і метод джерел або метод функцій Гріна.

Операційний метод є одним з найбільш ефективних аналітичних методів при вирішенні крайових задач теплопровідності. Причому рішення, одержувані операційним методом, зручні для практичного використання. Операційний метод заснований на перетворенні шуканої функції $T(\vec{r}, t)$ по одній із змінних, причому це перетворення вибирається з таким розрахунком, щоб рівняння для нової (перетвореної) функції було значно

простіше вихідного. Знаходять рішення перетвореного рівняння, а потім, застосовуючи до нього зворотне перетворення, визначають рішення вихідного рівняння.

В якості перетворення, що дозволяє реалізувати цю ідею, зазвичай застосовують перетворення Лапласа за часом

$$\bar{T}(\vec{r}, p) = \int_0^{\infty} \exp(-pt) T(\vec{r}, t) dt, \quad (2.11)$$

де t - дійсна змінна, p - комплексний параметр .

Функція $T(\vec{r}, t)$ в (2.11) називається оригіналом, а $\bar{T}(\vec{r}, p)$ - зображенням $T(\vec{r}, t) \succ \bar{T}(\vec{r}, p)$.

Широке застосування операційного методу ґрунтується на тому, що диференціюванню функції в просторі оригіналів відповідає алгебраїчна операція множення в просторі зображень $f'(t) \succ p\bar{f}(p) - f(0)$. Завдяки цій властивості перетворення Лапласа є одним з основних методів рішення диференціальних рівнянь в приватних похідних, в тому числі рівняння теплопровідності. Використання перетворення Лапласа дозволяє зменшити на одиницю кількість змінних, по яких проводиться диференціювання. Зокрема, якщо в рівнянні теплопровідності є похідні за часом і однієї координаті, то в просторі зображень у відповідному рівнянні буде тільки похідна по одній координаті, тобто рівняння теплопровідності буде звичайним диференціальним рівнянням.

Іншим потужним математичним методом аналітичного рішення крайових задач теплопровідності типу (2.3) є метод джерел або функцій Гріна. Метод функції Гріна вельми універсальний: його можна застосовувати для розв'язання крайових задач при досить загальній постановці в одно, двох і тривимірних випадках, обмежених і необмежених областях, при однорідних і неоднорідних, початкових і граничних умовах,

причому як для нестационарних, так і для стаціонарних температурних полів.

Ідея методу полягає в тому, що спочатку знаходять спеціальне рішення крайової задачі теплопровідності того ж типу (так звану функцію Гріна $G(\Delta\vec{r}, t - t')$), але більш просте. Через нього визначають інтегральне представлення рішення вихідної задачі.

Важливим є поняття джерела теплоти, локалізованого в точці простору $\vec{r} = 0$ і має вигляд "миттєвого" теплового імпульсу, тобто джерела вигляду

$$\frac{1}{\rho c} \delta(\Delta\vec{r}) \delta(t - t')$$

$\delta(\vec{z})$ - дельта-функція, $\delta(\vec{z} = 0) = 1$, $\delta(\vec{z} \neq 0) = 0$.

При цьому, рішення рівняння теплопровідності можна замінити рішенням рівняння щодо функції Гріна

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \left[\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right] + \delta(t) \delta(z)$$

Якщо в рівнянні (2.2) немає об'ємних теплових джерел $q_v = 0$, то для одновимірного випадку функція виду

$$G(z, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{a\pi t}} \exp\left[-\frac{(z - \xi)^2}{4at}\right] \quad (2.12)$$

задовольняє рівнянню теплопровідності і називається фундаментальним рішенням рівняння теплопровідності.

Початковий розподіл температури, що задовольняє умові (2.12) називається тепловим імпульсом. З урахуванням цього поняття можна сказати, що фундаментальне рішення рівняння теплопровідності (2.2) дає розподіл температури в будь-якій точці опромінюється тіла в момент часу t , який викликається миттєвим точковим джерелом тепла $q_0 c \rho$, чинним в точці $z_0 = \xi$ в момент часу $t = 0$.

З рисунку 2.2.4 випливає, що у всякій точці тіла температура, створювана миттєвим точковим джерелом тепла, чинним в точці $z_0 = \xi$, при $t = 0$ визначається фундаментальним рішенням рівняння і досить швидко вирівнюється.

Зі сказаного випливає, що функція Гріна $G(x, y, z, t)$ описує вплив миттєвого точкового теплового джерела на температурне поле. Внаслідок лінійності рівняння теплопровідності разом з граничними і початковими умовами, рішення крайової задачі теплопровідності має вигляд:

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{\rho c} \int dt' \int q_v(x', y', z', t') G(x - x', y - y', z - z', t - t') dx' dy' dz'. \quad (2.13)$$

Знаючи початковий розподіл температури $T_n(x, y, z)$ і фундаментальне рішення (функцію Гріна) можна встановити шукане температурне поле (в одновимірному випадку):

$$T(z, t) = \frac{1}{(4\pi at)^{3/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} T_n(z) \exp\left[-(z - \xi)^2 / 4at\right] d\xi. \quad (2.14)$$

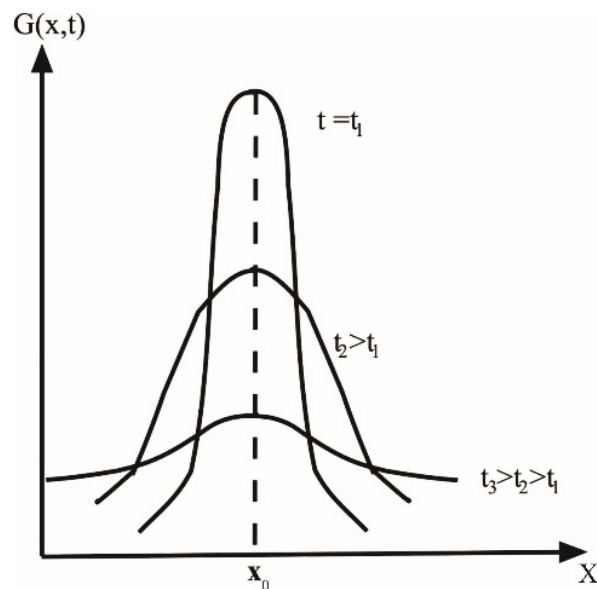


Рис. 2.4 - Графічне представлення фундаментального рішення рівняння теплопровідності за методом функцій Гріна

Згідно з рішенням (2.13 , 2.14) , після миттєвого точкового теплового імпульсу температура в точці нагріву убуває з часом за законом $T \sim t^{3/2}$, а характерний розмір зони термічного впливу зростає $\sim \sqrt{at}$.

Метод джерел (функція Гріна) успішно використовується при вирішенні теплових задач лазерної дії на матеріали з низькою температуропровідністю (біологічні об'єкти, неметали і т.д.), в цьому випадку миттєве теплове джерело дійсно локалізоване, тому можна встановити характерні закономірності зміни температурного поля в об'ємі матеріалу.

2.1.2 Напірний стовп в'язкої рідини в прямокутному каналі

Розглянутий вид течії часто має місце при литтєвому формуванні, оскільки канали для лиття зазвичай прямокутної форми. Завдання полягає у визначенні поля швидкостей і залежності витрати від перепаду тиску [87].

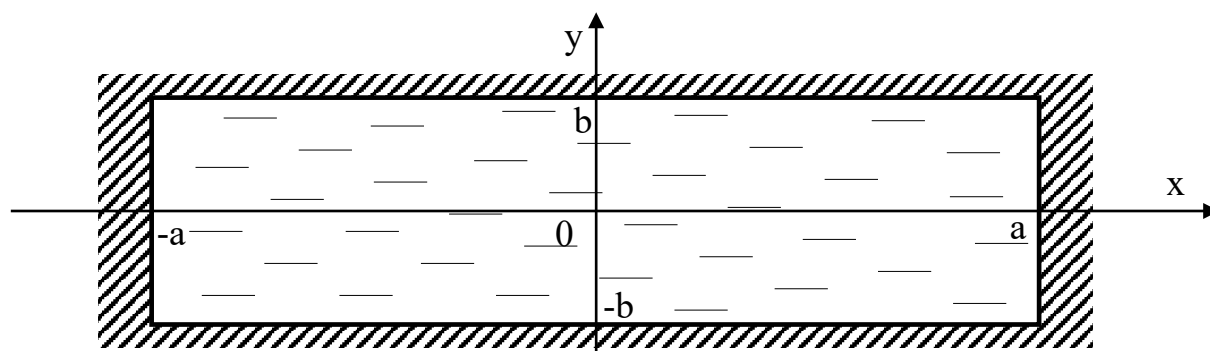


Рис. 2.5 - Конфігурація отвору

Висота і ширина каналу одного порядку. Тому завдання не можна звести до плоскої щілини. Розміри поперечного перерізу каналу $2a$ і $2b$. Схема течії представлена на рисунку 2.26.

Двовимірну течію описується рівнянням руху

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = A, \text{ де } A = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} = \text{const}$$

Тиск однорідний в поперечному перерізі каналу $\partial P / \partial x = \partial P / \partial y = 0$.

Звідки випливає, що в поперечному напрямку течія відсутня $v_y = v_x = 0$.

Граничні умови задачі зводяться до умови прилипання рідини до бічних стінок $x = \pm a, v_z = 0$; $y = \pm b, v_z = 0$.

Рішення задачі ведеться методом ортогональних проекцій Бубнова-Гальоркіна. Наближене рішення шукаємо у вигляді

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(x, y),$$

де $\varphi_i(x, y)$ - система базисних функцій, що задовольняють граничним умовам, c_i -невідомі постійні.

З урахуванням симетрії задачі, приймаємо в першому наближенні базисну функцію у вигляді

$$\varphi_i = (a^2 - x^2)(b^2 - y^2).$$

А найбільш наближене рішення шукаємо у формі

$$\bar{v} = c (a^2 - x^2)(b^2 - y^2). \quad (2.15)$$

де c -невідомо постійна (індекс опущений).

Вимагаємо ортогональності нев'язки рівняння руху $L(c_1 \varphi_1)$ до координатної функції

$$\int_0^b \int_0^a L(c, \varphi) \varphi(x, y) x dy = 0. \quad (2.16)$$

У розгорнутій формі умова ортогональності нев'язки записується:

$$\int_0^b \int_0^a \{ 2c(b^2 - y^2) + 2c(a^2 - x^2) + A \} (a^2 - x^2)(b^2 - y^2) dx dy = 0 \quad (2.17)$$

Виконавши інтегрування, знаходимо невідомий коефіцієнт c

$$c = -\frac{15A}{24(a^2 + b^2)}. \quad (2.18)$$

У першому наближенні поле швидкостей описується виразом:

$$\bar{v} = -\frac{5A}{8(a^2 + b^2)}(a^2 - x^2)(b^2 - y^2). \quad (2.19)$$

Витрата рідини визначається інтегралом

$$Q = 4 \int_0^b \int_0^a \bar{v} dx dy = -\frac{10a^3b^3}{9(a^2 + b^2)\mu} \frac{dP}{dz}. \quad (2.20)$$

Знайдемо середню по перетину швидкість

$$v_{cp} = \frac{Q}{4ab} = \frac{-10a^2b^2}{36(a^2 + b^2)\mu} \frac{dP}{dz}. \quad (2.21)$$

Для каналу квадратного перетину ($a=b$)

$$v_{cp} = -\frac{5}{36} \frac{a^2}{\mu} \frac{dP}{dz}. \quad (2.22)$$

В отриманому наближеному вирішенні постійний множник дорівнює $5/36=0.139$. Точне значення постійного множника 0.142 . Розбіжність становить $2,11\%$. Що цілком прийнятно для інженерних розрахунків.

В процесі дослідження процесів що відбуваються при виробництві біметалів за обраною схемою стає зрозумілим, що задачу з моделювання процесу обробки доцільно розділити на дві:

- створення сталої зони розплаву на поверхні основи для виробництва біметалу за допомогою скануючого лазерного пучка.
- задача доставки розплаву, що наплавляється, в сталу зону розплаву на поверхні основи для виробництва біметалу.

2.1.3 Постановка та вирішення задачі утворення стаціонарної зони розплаву на поверхні основи для виробництва біметалу

У випадку сканування основи лазерним пучком для подальшого наплавлення розплаву необхідно утворити по всій ширині заготовки зону розплавленого поверхневого шару. Утворена зона повинна відповідно руху

заготовки по осі ОХ. Таким чином реалізується сталий процес потрапляння розплаву на оплавлену зону основи, що і дозволить отримувати необхідне металургійне з'єднання.

Основною задачею є дослідження температури поверхневого шару основи в зоні заливки розплаву в залежності від швидкості руху основи та частоти сканування.

Схема обробки приведена на рисунку 2.6:

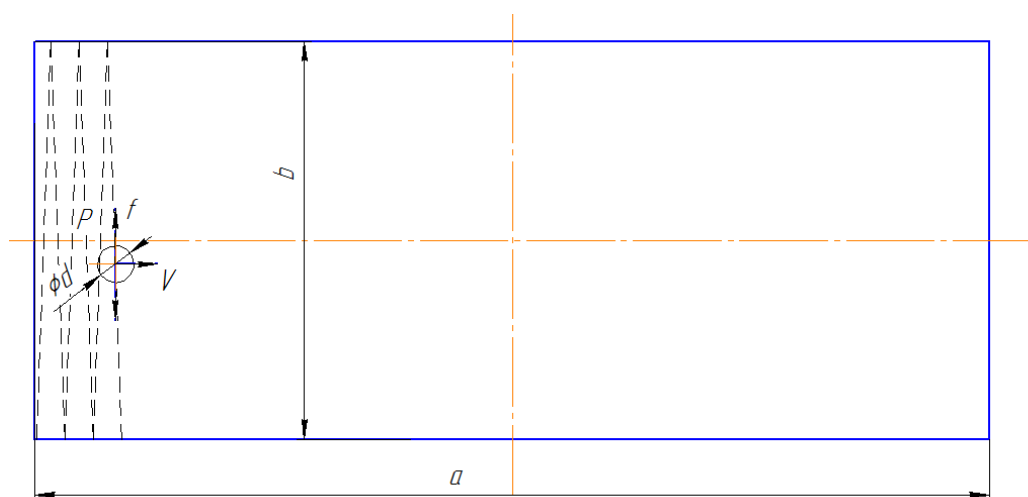


Рис. 2.6. – Схема сканування основи лазерним пучком швидкості V з частотою сканування f

Моделювання лазерного нагріву скануючим пучком було здійснено в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Даний програмний пакет дозволяє зручно і гнучко проводити моделювання теплових процесів, в тому числі дії лазерного випромінювання на металічну основу [91].

Для моделювання була обрана модель (рисунок 2.7) що імітує основу для виготовлення біметалічного композита наступної конфігурації:

- Товщина: 2 мм
- Ширина: 50 мм
- Довжина: 50 мм

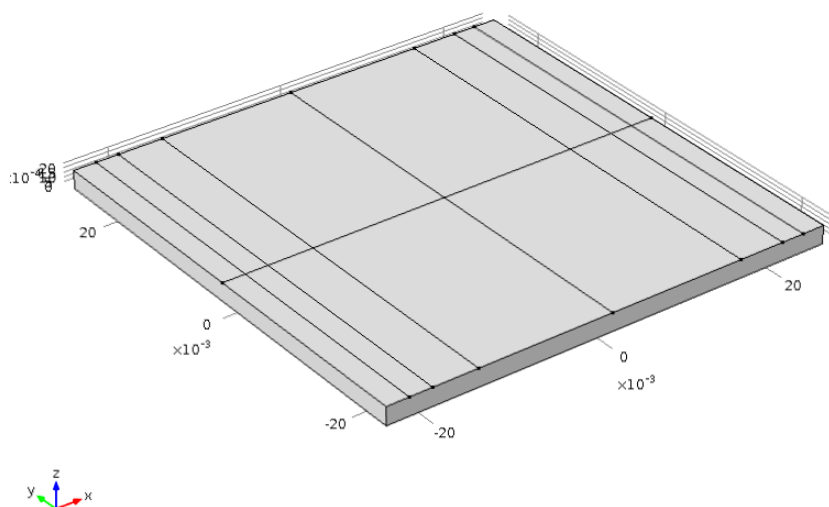


Рис. 2.7 – Схема сканування основи лазерним пучком з швидкістю V з частотою сканування f

Основа обробляється лазерним пучком з проникаючою по глибині інтенсивністю, яка задана одновимірною геометрією (рисунок 2.2.8), що показана на рисунку нижче.

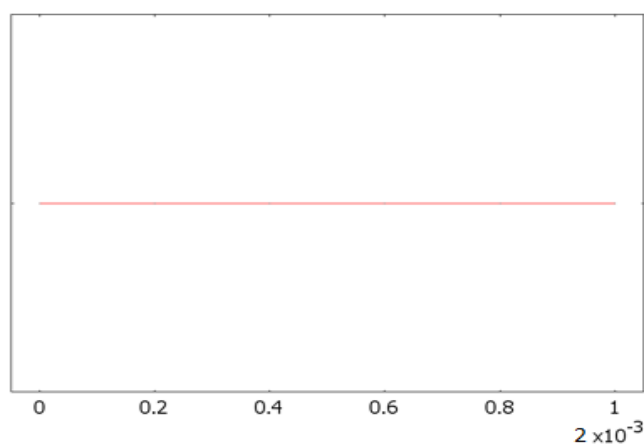


Рис. 2.8 - Геометрична модель 1D

Ця модель розглядає лазерний промінь як лінійне джерело енергії нескінченного діаметру. Для випадку дослідження температурного поля поверхневих шарів матеріалу на точність моделювання таке припущення значного впливу не здійснить.

Модель використовує для опису передачі теплової енергії в тривимірній моделі основи наступне рівняння транспортування енергії теорії теплопровідності:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\underline{k} \nabla T) = Q \quad (2.23)$$

де ρ - щільність, C_p є питома теплоємність, $\underline{k}$ є Тензор теплопровідності, і Q є джерелом тепла, яке в даній моделі рівний 0, бо лазерна дія задається іншим способом.

Матеріал основи був обраний – Сталь 45. Згідно з табличними даними метал має наступні теплофізичні властивості:

$\rho = 7826 \text{ кг/м}^3$, $C_p = 473 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ та $k = 48 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Для описання дії лазерного випромінювання по глибині основи використовується наступний вираз:

$$\frac{\partial I}{\partial x'} = k_{\text{abs}} I \quad (2.24)$$

де I відповідає відносній лазерній інтенсивності (змінна теплової моделі), x являє собою координату одновимірної моделі проникнення лазерного випромінювання в основу, k_{abs} є коефіцієнтом поглинання матеріалу, що дорівнює близько 110 см^{-1} .

В тепловій моделі опис об'ємного джерела тепла в матеріалі основи внаслідок її взаємодії з лазерним випромінювання описується наступним виразом:

$$Q = P_{\text{in}} k_{\text{abs}} I \quad (2.25)$$

де P_{in} є сумарна потужність вхідного лазерного променя.

Результуючим виразом для теплової моделі взаємодії лазерного випромінювання з основою біметалу є:

$$I_{\text{test}} * (I_x - k_{\text{abs}} * I) + k_{\text{abs}} * I * P_{\text{in}} * T_{\text{test}} \quad (2.26)$$

Перша частина цього виразу описує рівняння проникнення, а друга частина походить від умови нагрівання тривимірної моделі основи.

Моделювання проводилося для лазера з вихідною потужністю 2000 Вт.

Модель реалізує рух джерела тепла по пилоподібній траєкторії. Закон руху джерела тепла заданий системою рівнянь, які відповідають за рух лазерного джерела в площині ОХУ, що співпадає з поверхнею основи, зображується.

Рівняння по осі ОХ має вигляд:

$$x = V_x t \quad (2.27)$$

Рівняння по осі ОУ має вигляд:

$$y = W_v(t) \quad (2.28)$$

де W_v – хвильова функція трикутної форми, що забезпечує циклічне сканування поверхні основи лазерним променем вздовж осі ОУ.

Результати моделювання лазерного нагріву скануючим пучком основи для утворення біметалічних композитів

Відправними параметрами для розрахунків були прийняті наступні параметри обробки та конфігурації основ:

Матеріал основи: Сталь 45.

Конфігурація основи: 50мм x 50мм x 2мм.

Амплітуда сканування: 20мм, 30мм, 50мм.

Частота сканування лазерного випромінювання: 100Гц, 200Гц.

Швидкість переміщення основи: 1м/хв, 10м/хв.

Потужність лазерного випромінювання: 2кВт.

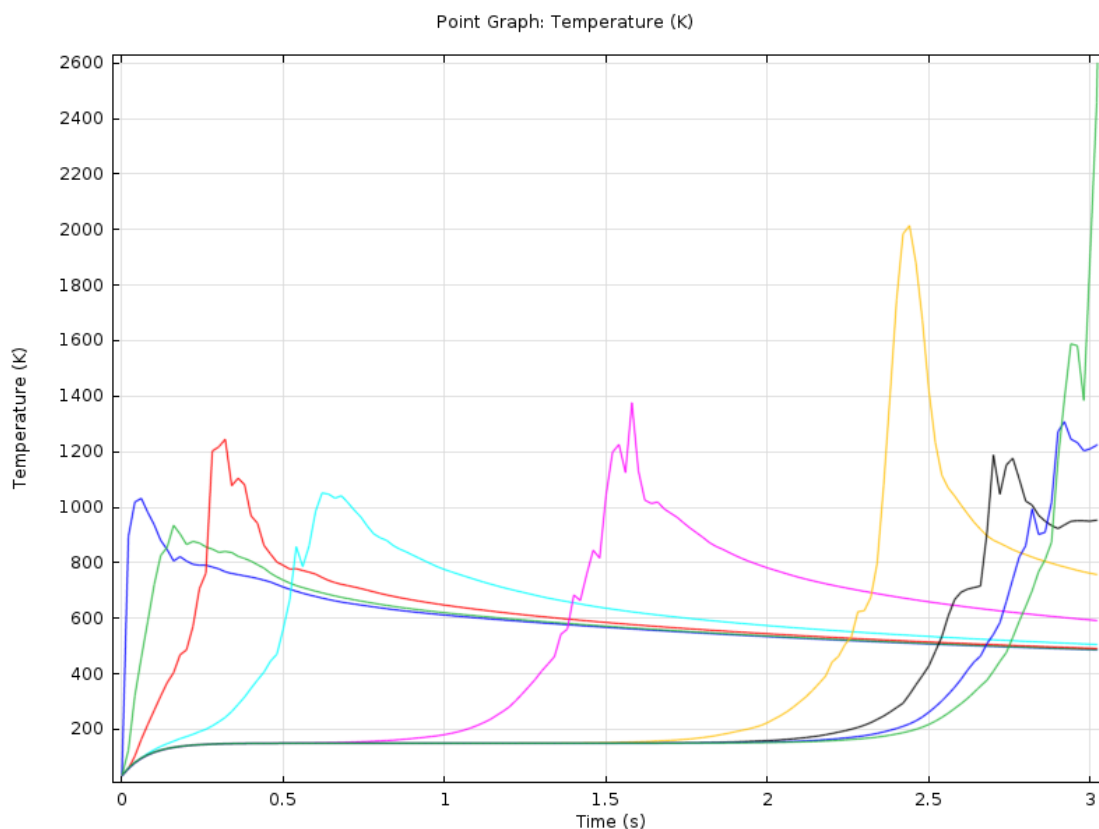


Рис. 2.9 - Температура точок на центральній осі заготовки за весь час обробки при $P=2\text{кВт}$, $A=20\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$

В результаті моделювання було виявлено, що при обробці основи товщиною 2 мм лазерним променем потужністю 2кВт при амплітуді сканування 20мм, частоті сканування 200Гц та швидкості переміщення основи 1м/хв, оплавлення поверхневого шару металу не відбувається. Це видно з графіку точкового розподілу температури за часом на рисунку 2.9. Температура поверхневого шару не перевищує 1000 градусів Цельсія. На графіку нижче кожна з ліній описує температуру точок на центральній осі заготовки, що співпадає з напрямом руху основи. Обрані точки вказані на рисунку 2.9.

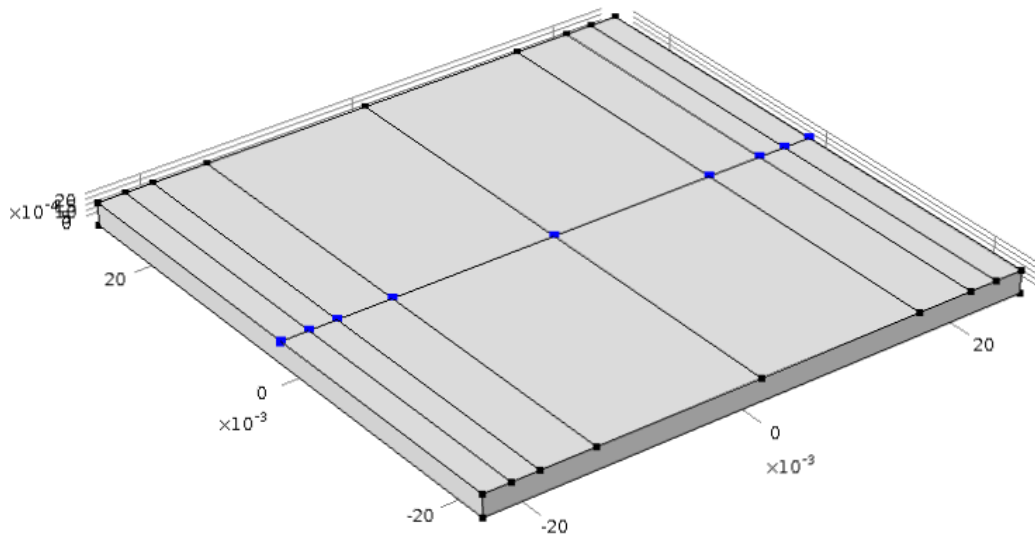


Рис.2.10 - Точки, для яких були побудовані графіки на рисунку

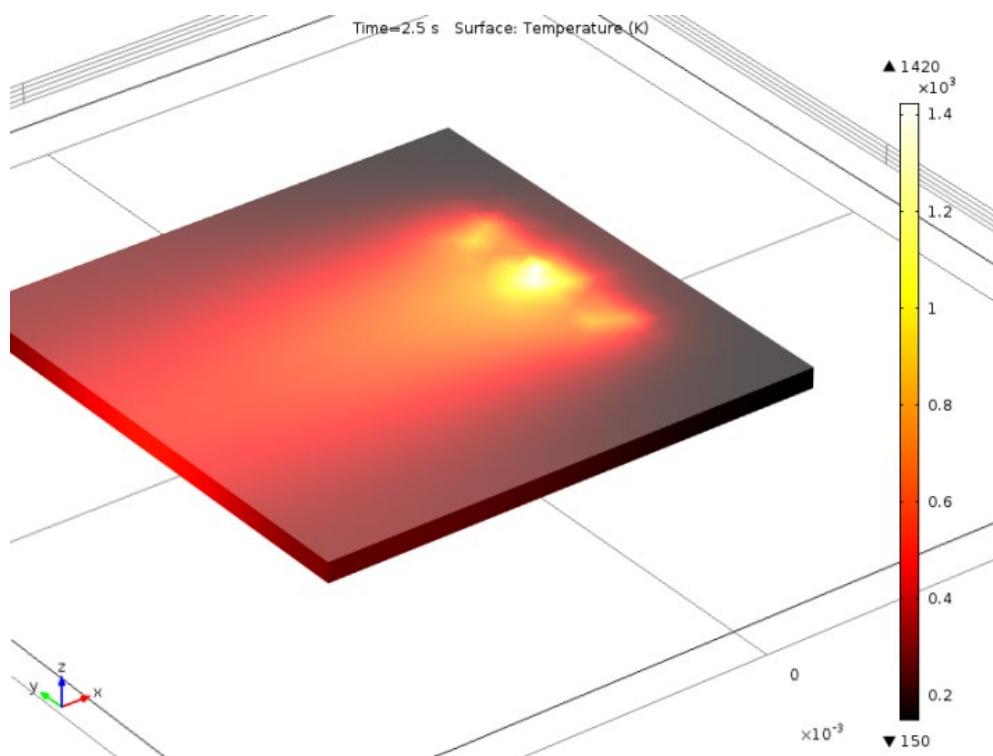


Рис. 2.11 - Температурний розподіл через 2.5с після початку обробки

Зменшуючи швидкість руху основи був знайдений режим, що забезпечить оплавлення поверхневого шару основи та дасть можливість для ефективного наплавлення. Режим передбачує зменшення швидкості руху

основи до 0.25 м/хв. В такому випадку графік температур точок на центральній осі заготовки за весь час обробки має наступний вигляд (рисунок 2.12):

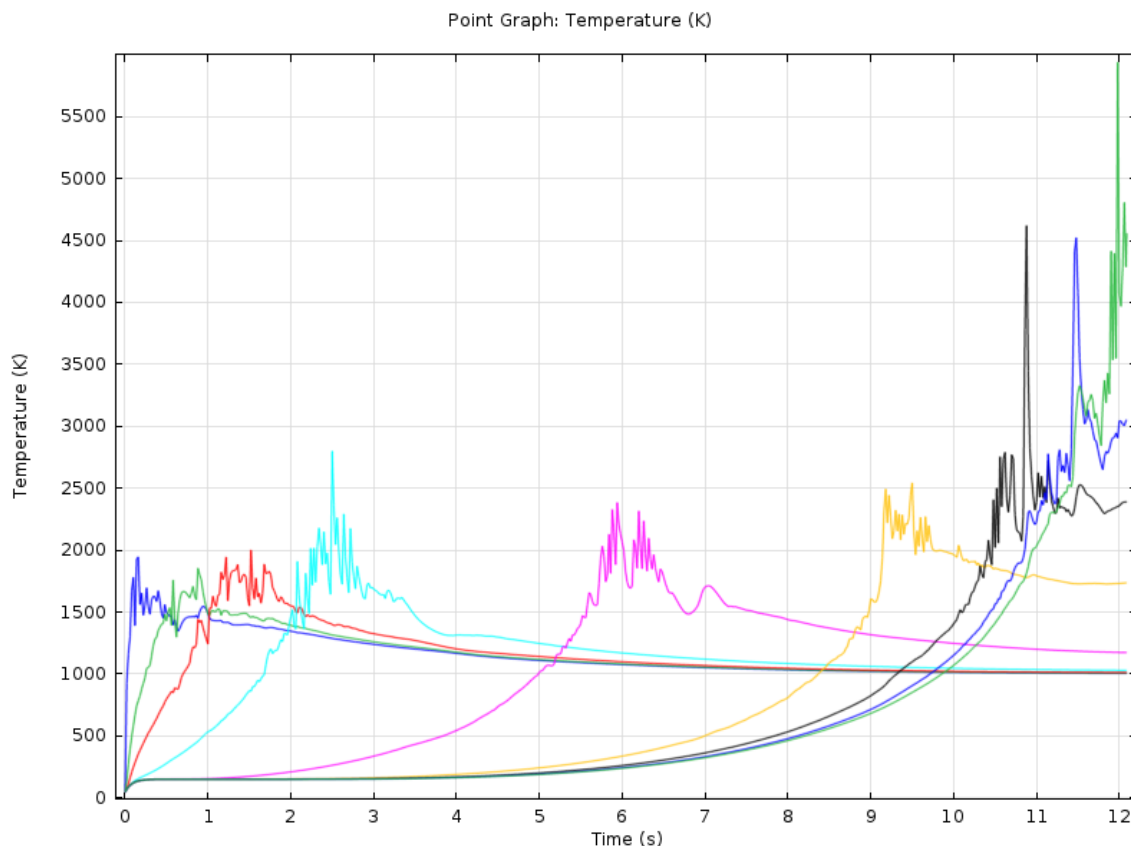


Рис. 2.12 - Температура точок на центральній осі заготовки за весь час обробки при $P=2\text{кВт}$, $A=20\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=0.25\text{м/хв}$

Внаслідок подальшого моделювання було визначено, що збільшення амплітуди сканування призводить до необхідності суттєвого зменшення швидкості обробки, що є недоцільним. Також в процесі моделювання було виявлено, що зменшувати частоту сканування недоцільно, адже в цьому разі середня температура прогріву поверхневого шару зазнає суттєвого зменшення, що призводить до необхідності зменшення швидкості обробки.

Наступною задачею моделювання є визначення необхідної потужності лазерного випромінювання для забезпечення повного підплавлення поверхневого шару в зоні обробки при заданих ефективних режимах обробки.

Таким чином для $A=30\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$ оптимальною потужністю лазерного випромінювання є $P=5.25\text{кВ}$ (рисунок 2.13).

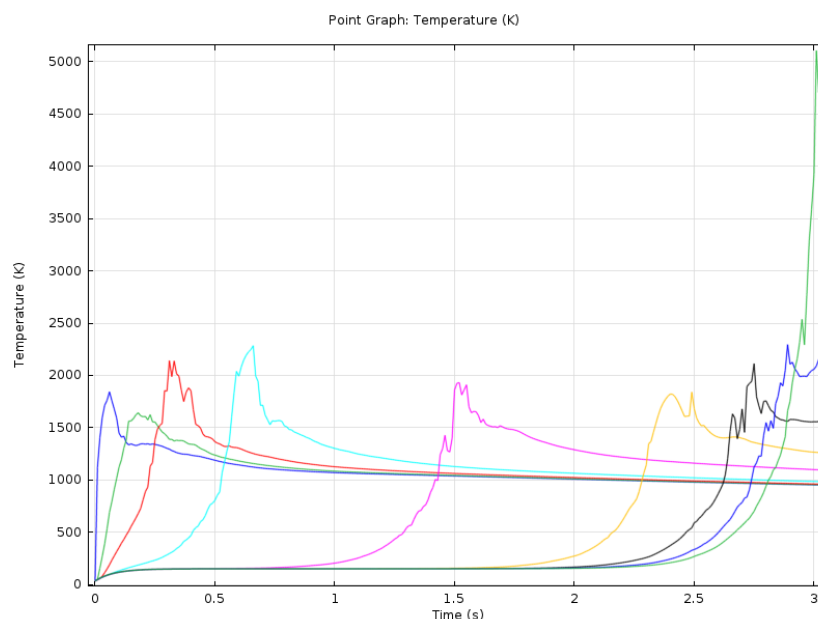


Рис. 2.13 - Температура точок на центральній осі заготовки за весь час обробки при $P=5.25\text{кВт}$, $A=30\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$

Для $A=20\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$ оптимальною потужністю лазерного випромінювання є $P=4\text{кВ}$ (Рисунок 2.14).

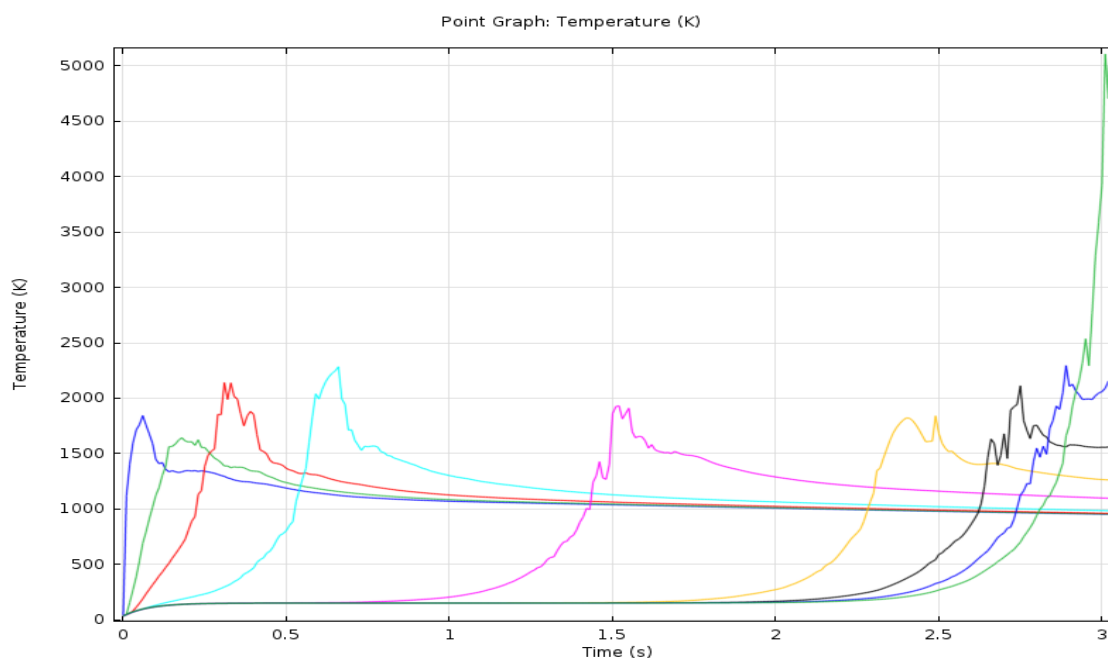


Рис. 2.14 - Температура точок на центральній осі заготовки за весь час обробки при $P=4\text{кВт}$, $A=20\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$

При збільшенні швидкості переміщення основи в 10 разів для збереження режиму проплавлення потужність лазерного випромінювання необхідно збільшити до 14кВт (Рисунок 2.15).

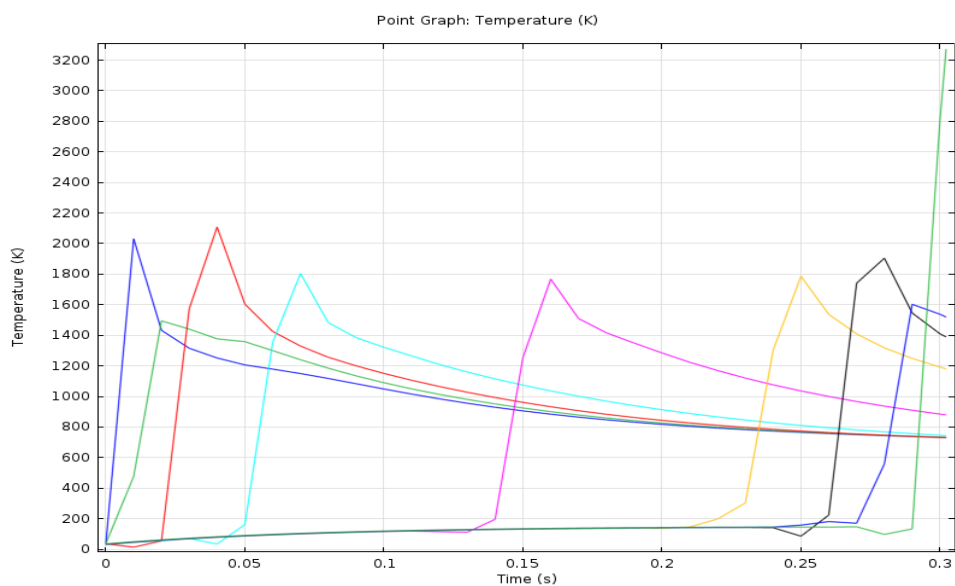


Рис. 2.15 - Температура точок на центральній осі заготовки за весь час обробки при $P=14\text{кВт}$, $A=20\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=10\text{м/хв}$

Для $A=50\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$ оптимальною потужністю лазерного випромінювання є $P=8.5\text{кВт}$ (рисунок 2.16).

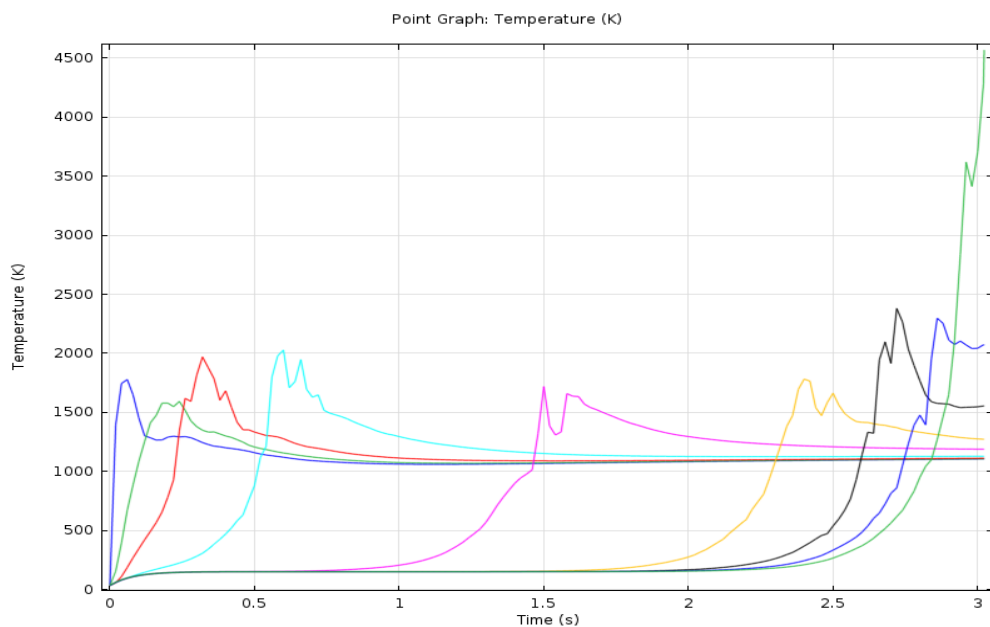


Рис. 2.16 - Температура точок на центральній осі заготовки за весь час обробки при $P=8.5\text{кВт}$, $A=50\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$

Вивчаючи температурний розподіл по глибині основи на відстані 2 мм від лазерного пучка треба відзначити, що при $P=2\text{кВт}$, $A=20\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=0.25\text{м/хв}$ (рисунок 2.17), прогрівання поверхневого шару не відбувається по всій довжині амплітуди сканування. Таким чином наплавлення можна проводити меншої довжини ніж амплітуда сканування, а саме шириною 15-16 мм. Для забезпечення повного прогріву має рацію підвищення частоти сканування та зменшення швидкості переміщення основи. Також може бути застосоване опозитне сканування поверхні за допомогою двох лазерних пучків.

При режимах обробки $P=8.5\text{кВт}$, $A=50\text{мм}$, $f=200\text{Гц}$, $V_x=1\text{м/хв}$ прогрів відбувається по всій амплітуді сканування. Це пов'язано з відсутністю інтенсивного відводу тепла від крайніх точок сканування в непрогріті зони основи по ширині (рисунок 2.18).

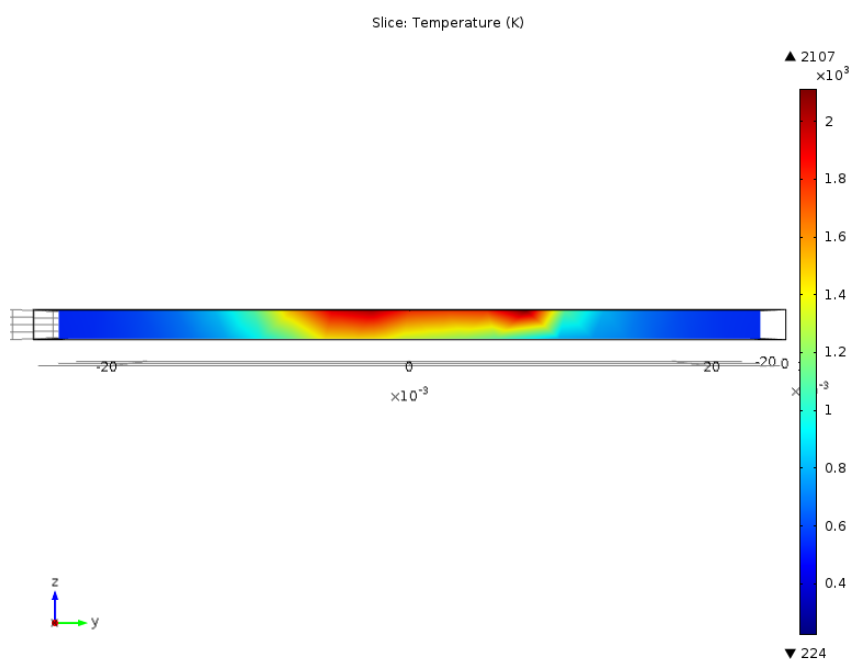


Рис. 2.17 - Розподіл температур по глибині основи на відстані 2мм від лазерного пучка через 6 с після початку обробки при $A=20\text{мм}$ $P=2\text{кВт}$, $V_x=0.25\text{м/хв}$

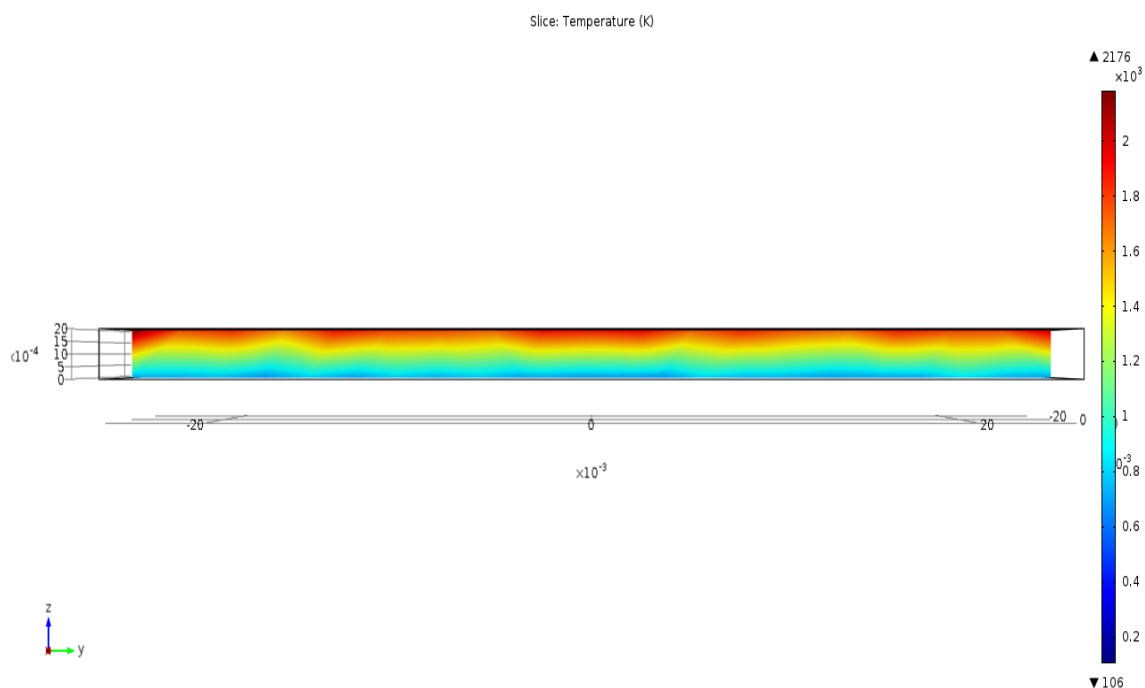


Рис. 2.18 - Розподіл температур по глибині основи на відстані 2мм від лазерного пучка через 6 с після початку обробки при $A=50\text{мм}$ $P=8.5\text{кВт}$, $V_x=1\text{м/хв}$

Вивчення параметрів зони розплаву по глибині основи в напрямку переміщення основи для виготовлення біметалу показало, що стала зона розплаву на поверхні складає $X=1 \dots 1.5$ мм.

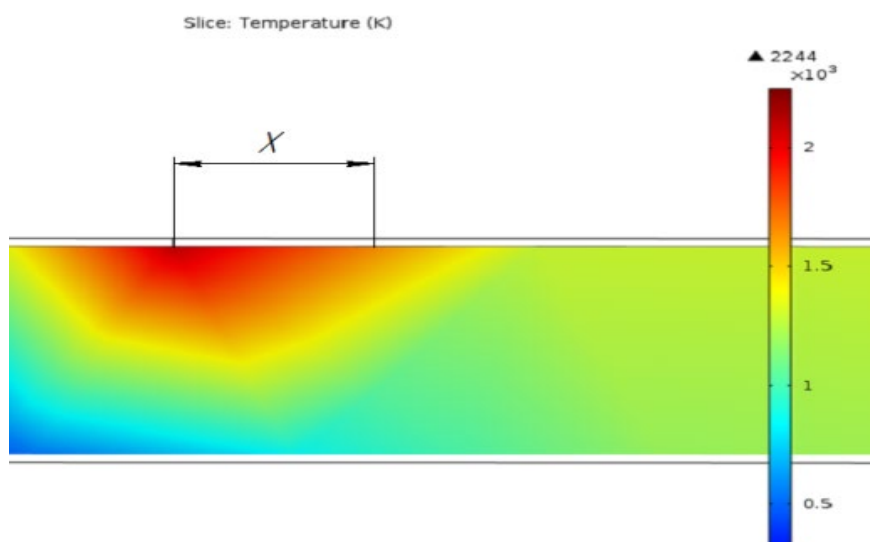


Рис. 2.19 - Розподіл температур по глибині основи в напрямку переміщення основи для виготовлення біметалу при обробці з режимами $A=50\text{мм}$ $P=8.5\text{кВт}$, $V_x=1\text{м/хв}$

Для підвищення ефективності обробки було запропоновано спробувати застосування підігріву основи для виготовлення біметалу до температур 800-1000 градусів за Цельсієм. При режимах обробки $A=50\text{мм}$ $P=8.5\text{кВт}$, $V_x=1\text{м/хв.}$ стала зона розплаву збільшується до $X=2...2.5\text{ мм.}$ (рисунок 2.20).

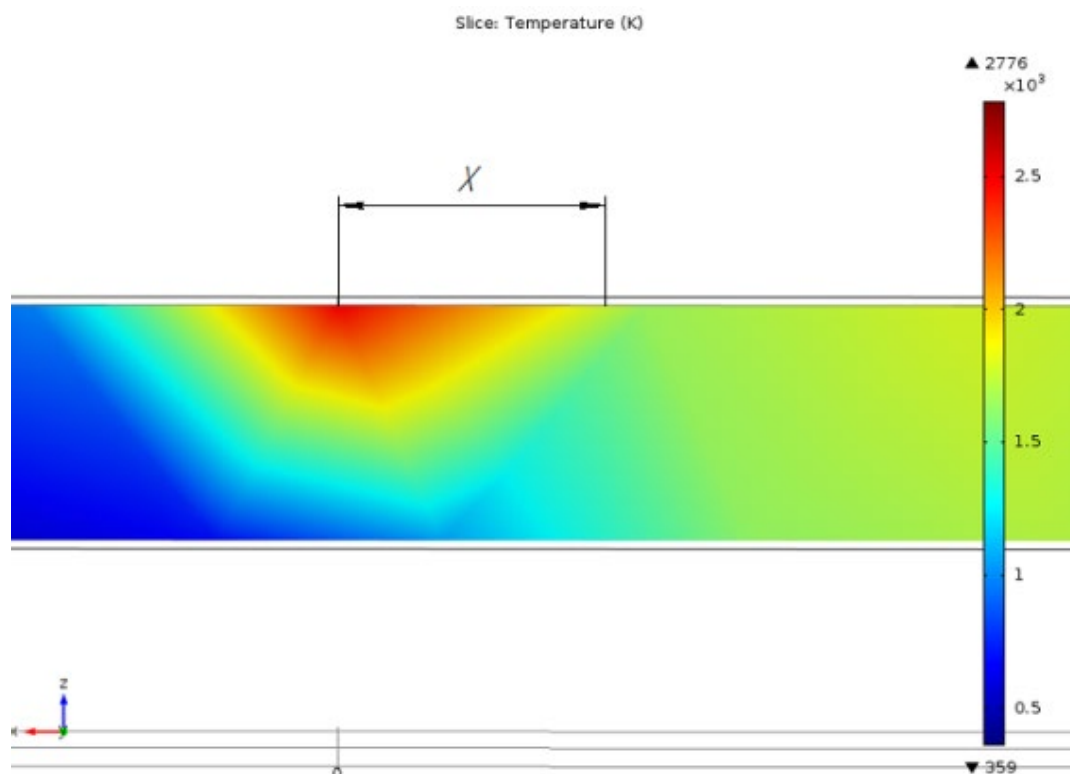


Рис. 2.20 - Розподіл температур по глибині основи в напрямку переміщення основи для виготовлення біметалу при обробці з режимами $A=50\text{мм}$, $P=8.5\text{кВт}$, $V_x=1\text{м/хв}$ та підігріві основи до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дослідження виявили, що за рахунок підігріву основи можна зменшувати необхідну потужність лазерного випромінювання, або підвищувати продуктивність обробки за рахунок збільшення швидкості переміщення основи. Однак такий спосіб підвищення ефективності доцільний лише в тому випадку, коли матеріал основи не втрачає необхідних функціональних властивостей при прогріві до високих температур.

2.1.4. Вирішення задачі дослідження витікання розплаву з фурми

Виходячи із моделі що досліджується необхідно забезпечити рівномірну подачу розплаву з фурми до поверхні заготовки. У даній роботі розглядається один з найбільш простих способів доставки розплаву на поверхню основи для біметалічного композиту. В основі способу лежить напірна подача розплаву крізь формоутворюючий канал.

Згідно з обраною схемою подачі, що зображена на рисунку 2.21 постійна швидкість подачі розплаву забезпечується постійним напором, який створює об'єм розплаву та підтримується ззовні.

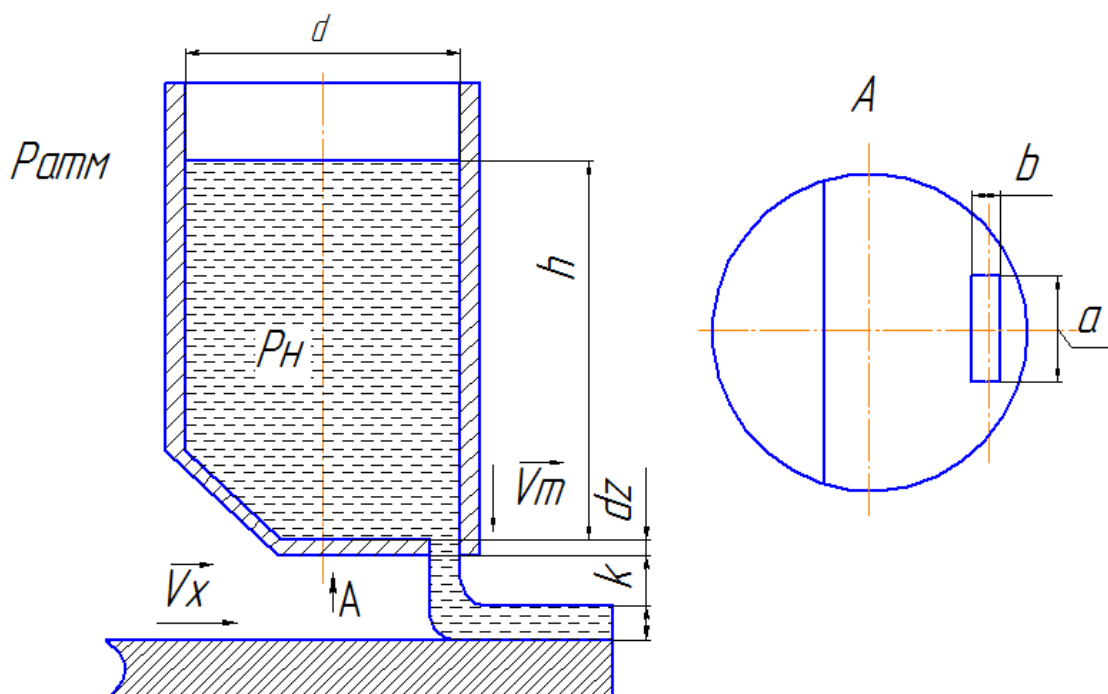


Рис. 2.21 - Схема подачі розплаву на поверхню основи для виготовлення біметалу

Приймається, що температура розплаву в фурмі не змінюється з часом, бо має індукційний підігрів.

Таким чином необхідно з'ясувати залежність швидкості напірної течії розплаву крізь отвір обраної конфігурації від об'єму розплаву

В обраній схемі обробки використовується спосіб подачі рідкого металу с фурми крізь отвір прямокутного перерізу. Фурма має механізм

підігріву, що дозволяє підтримувати метал для наплавлення в рідкому стані. Передбачений пристрій підживлювання фурми для того, щоб підтримувати постійний рівень рідкого металу.

Регулювання швидкості витікання рідкого металу, що наплавляється, здійснюється зміною висоти напірного стовпу рідкого металу. Для того щоб визначити залежність швидкості витікання металу крізь формоутворюючий отвір від висоти стовпа металу необхідно врахувати тиск, що необхідно створити для отримання необхідної швидкості витікання та тиск, що втрат при проходженні розплавом отвору.

В обраній конфігурації процесу відштовхуємося від обраної швидкості переміщення заготовки та товщині свою розплаву що має бути наплавлений.

Знайдемо швидкість витікання металу з балансу масових витрат.

З одного боку витрати дорівнюють:

$$Q = \rho b k V_x, \quad (2.29)$$

де Q – об’ємні витрати, ρ – густина розплаву, b – ширина заготовки, k – товщина свою що наплавляється, V_x – швидкість переміщення заготовки.

З іншого боку:

$$Q = \rho b a V_m \quad (2.30)$$

де Q – об’ємні витрати, ρ – густина розплаву, b – довжина отвору що дорівнює ширині заготовки, a – ширина отвору, V_m – швидкість витоку металу.

Звідси визначимо швидкість витоку металу:

$$V_m = \frac{V_x \cdot k}{a} \quad (2.31)$$

Швидкість витікання з отвору на глибині дорівнює:

$$V_m = \sqrt{2gh} \quad (2.32)$$

Звідси отримаємо висоту стовпа, що потрібна для витікання розплаву з обраною швидкістю:

$$h_v = \frac{Vx^2k^2}{2ga^2} \quad (2.33)$$

Тиск втрат отримаємо з наступної формулі для середньої швидкості витікання з отвору прямокутного перерізу:

$$V_m = \frac{Q}{4ab} = \frac{-10a^2b^2}{36(a^2 + b^2)\mu} \frac{dP}{dz} \quad (2.34)$$

Виразимо з цієї формули dP :

$$dP = \frac{36(a^2 + b^2)\mu V_m dz}{-10a^2b^2} \quad (2.35)$$

Визначимо додаткову висоту стовпа розплаву для компенсації втрат на гідравлічне тертя в отворі користаючись формулою для тиску стовпа рідини на визначеній висоті h :

$$P = \rho gh \quad (2.36)$$

Звідки висота стовпа розплаву для компенсації втрат на гідравлічне тертя дорівнює:

$$h_L = \frac{36(a^2 + b^2)\mu v_{cp} dz}{-10a^2b^2 \rho g} \quad (2.37)$$

В обраній конфігурації ширина отвору a дорівнює 0.2 мм, а його довжина b , 50 мм. В свою чергу dz – є глибиною отвору, крізь який витікає рідкий метал. Динамічна в'язкість сталі при температурі 1450-1500 градусів Цельсія дорівнює 6мПа·с, а її густина 7070 кг/м³. Прискорення вільного падіння g дорівнює 9.81 м/с². Середня витікання швидкість розплаву прийнята 0,16м/с.

Загальна висота стовпа розплаву дорівнює:

$$H = h_v + h_L \quad (2.38)$$

Для обраних умов обробки висота стовпа дорівнює 7,5 мм. В разі зростання швидкості переміщення заготовки в 10 разів, до $10\text{ м/хв} = 0.16\text{ м/с}$, загальна висота стовпа дорівнює 193 мм.

В результаті розрахунків були отримані залежності товщини наплавленого шару від висоти стовпа розплаву в фурмі а також швидкості витікання розплаву з фурми в залежності від висоти розплаву в фурмі (рисунок 2.22).

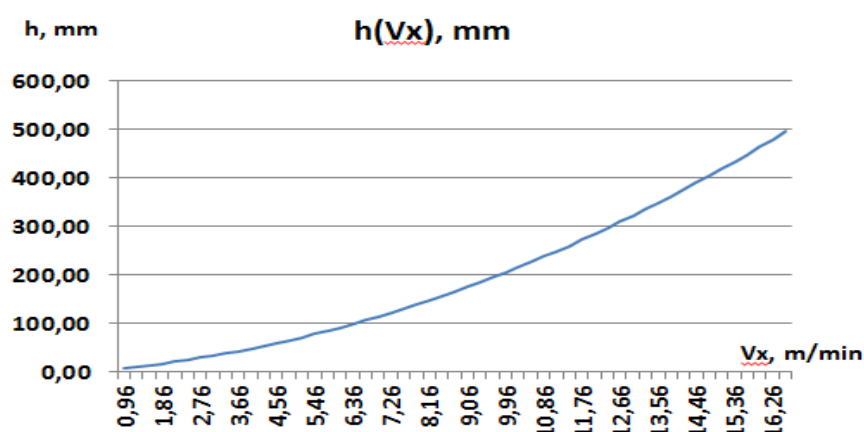


Рис. 2.22 - Залежність висоти стовпа розплаву від швидкості переміщення основи

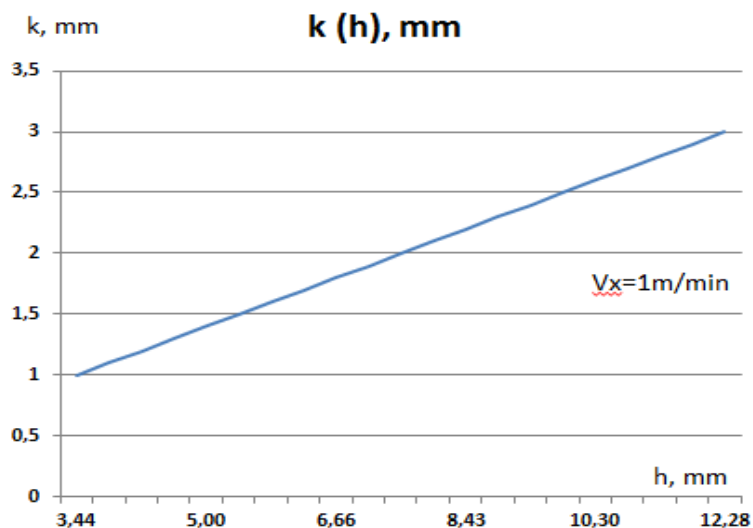


Рис. 2.23 - Залежність товщини наплавленого шару від висоти стовпа розплаву в фурмі

Встановлені оптимальні режими обробки основи для виробництва біметалу при її скануванні лазерним випромінюванням для утворення сталої зони розплаву на її поверхні. Визначено, що умова існування постійної зони

розплаву знаходиться в залежності від температурних умов та властивостей матеріалу. Саме вона є головним фактором, що визначає параметри сканування лазерного пучка, його поперечні розміри та потужність випромінювання.

Керування процесом доцільно здійснювати комплексною зміною параметрів сканування, потужності лазерного випромінювання та висоти напірного стовпа розплаву.

Приклад виробничих параметрів для обробки основи біметалу шириною 50 мм:

Таблиця 2.1 - Параметри обробки для виготовлення біметалічного матеріалу

Потужність випромінювання P	8.5кВт
Амплітуда сканування A	50мм
Частота сканування f	200Гц
Швидкість переміщення основи V_x	1м/хв
Товщина наплавленого шару k	2мм
Висоті стовпа розплаву h	7.6мм

Керування товщиною наплавленого шару здійснюється за рахунок зміни витрати розплаву шляхом регулювання висоти напірного стовпа.

Для підвищення продуктивності обробки доцільно застосувати обробку двома, скануючими в протилежних напрямках, пучками.

2.1.5 Розрахунок температурного поля металевої пластини основи при імпульсному накладенні теплового навантаження, яке моделює вплив лазерної енергії

За допомогою лазерної енергії підігрівається підкладка, на яку в свою чергу заливають розплавлений матеріал покриття.

Для теоретичної оцінки можливості реалізації лазерно-ливарної технології виробництва біметалів розроблена схематична постановка задачі, представлена на рисунок 2.24.

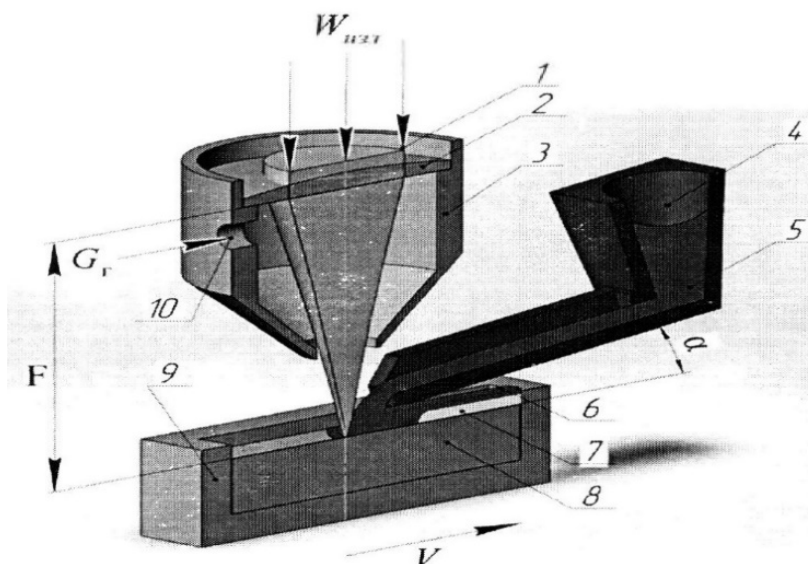


Рис. 2.24 - Технологічна схема лазерно-ливарного методу виготовлення біметалів:

1 – лазерне випромінювання; 2 – лінза; 3 – сопло; 4 – лоток; 5 – розплав;
6 – поверхневий шар; 7 – твердий шар; 8 – заготовка; 9 – обмежувачі; 10 – захисний газ.

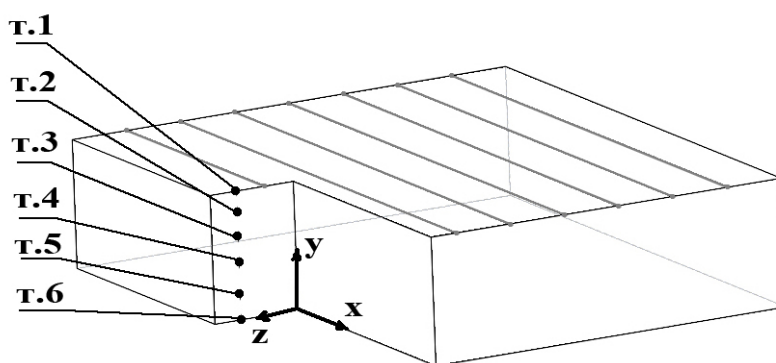
Такі розрахунки проводилися в модулі Transient Thermal програмного комплексу Ansys. У розрахунку матеріал металевої підкладки приймався як сталь Ст3. Теплофізичні характеристики матеріалу підкладки взяті в діапазоні температур від 0 до 1500°C. Для довідкових даних, що перевищують ці діапазони, використовували апроксимацію даних за допомогою лінійної функції. При розрахунках випаровування матеріалу з поверхні підкладки не враховувалось.

Лазерний промінь щодо підкладки здійснює поступально-скануючі рухи. На першому етапі моделювання дуже важливо мати достатньо адекватні уявлення про температурне поле підкладки, яке формується за допомогою теплового навантаження лазерного випромінювання. Складність руху в просторі створює достатні труднощі повнофакторного моделювання процесу нагріву підкладки. У цьому зв'язку обрана наближена модель, яка враховує весь обсяг вкладеного тепла, проте сам характер теплового навантаження представлений у вигляді імпульсної, а не безперервної подачі, що в кінцевому підсумку дещо спотворює процес

введення тепла, але поглинання і обсяг теплового навантаження досить близько відповідає істинним. Для перевірки відповідності теплового поля підкладки обсягом теплового навантаження проведено натурні випробування із застосуванням термопар, які вбудовані в підкладку. Для розрахунку температурного поля підкладки взяли такі припущення:

- вибрали розміри підкладки кратні ширині зони впливу лазерного випромінювання; швидкість переміщення лазерного променя взяли рівну $V_{пл} = 0,013 \text{ м/с}$;

- переміщення променя від початку руху до його кінця склало 20 с з урахуванням прийнятої швидкості переміщення;



Т.1 – $y = 7 \text{ мм}$, Т.2 – $y = 6,5 \text{ мм}$, Т.3 – $y = 5,5 \text{ мм}$, Т.4 – $y = 5 \text{ мм}$,
Т.5 – $y = 3,5 \text{ мм}$, Т.6 – $y = 1,5 \text{ мм}$, Т.1 – $y = 0 \text{ мм}$

Рис. 2.25 - Розташування точок зміни температури за час по осі y

- розбили поступально-скануючий рух на складові переміщення по двох осях: спочатку поперечний рух на величину, рівну ширині обробки променем, потім – поступальний рух;
- теплопередачу поперечного руху задали тепловим імпульсом, рівним теплопередачі енергії лазерного випромінювання за часовий проміжок руху променя в поперечному русі;
- за короткий час поступального руху теплове навантаження подавалося наступним імпульсом на наступну ділянку поперечного руху.

Схема розрахунку та геометричні параметри підкладки представлені на рисунку 2.26.

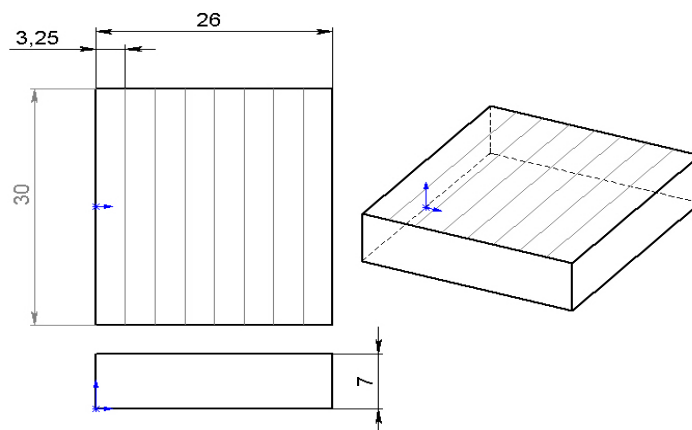


Рис. 2.26 - Структурна схема розрахункової області та геометричні параметри підкладки

Використовуючи літературні дані нагріву сталевих підкладок лазерним променем, взяли температуру нагрівання поверхні підкладки рівну $t = 3000^{\circ}\text{C}$. Після чого на основі рівнянь теплопередачі в часі розраховували змінюється теплове поле підкладки. На бічні поверхні підкладки накладали гранична умова конвекції з навколишнім середовищем при $t_{\text{oc}} = 22^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт теплообміну у всіх випадках приймали рівним $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$.

Таким же чином послідовно моделювали нагрів всіх секторів з тимчасовим кроком $0,25 \text{ с}$ протягом 2 с . По закінченню часу впливу променя на металеву підкладку для всіх поверхонь задавали умова теплообміну з навколишнім середовищем протягом наступних 18 с .

Рішення теплової задачі чисельними методами, дозволило встановити вплив густини потужності і швидкості руху лазерного променя на глибину і довжину ванни розплаву (рисунки 2.27 та 2.28) [22].

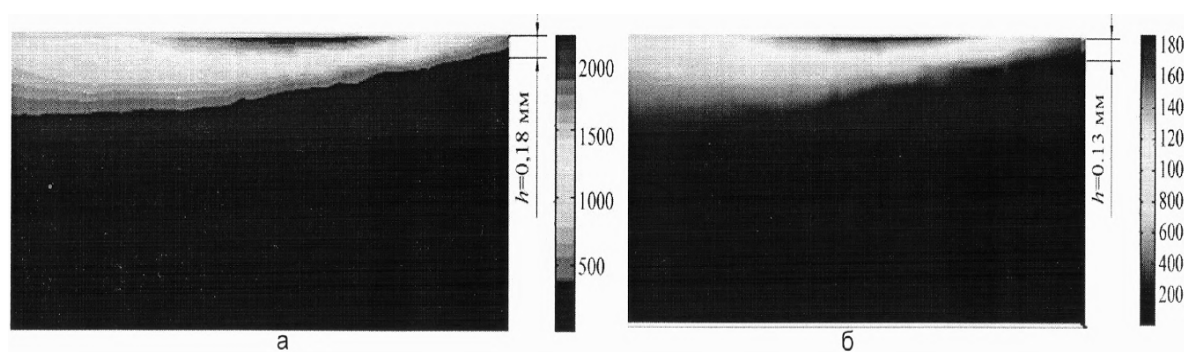


Рис. 2.27 - Глибина ванни розплаву при густині потужності (а) і (б) для швидкості руху лазерного променя $V = 0,7$ м/с

При цьому розподіл температури в поперечній площині зразка біметалу при діаметрі зони фокусування $d_0 = 2,0$ мм і густини потужності має вигляд (рисунок 2.28).

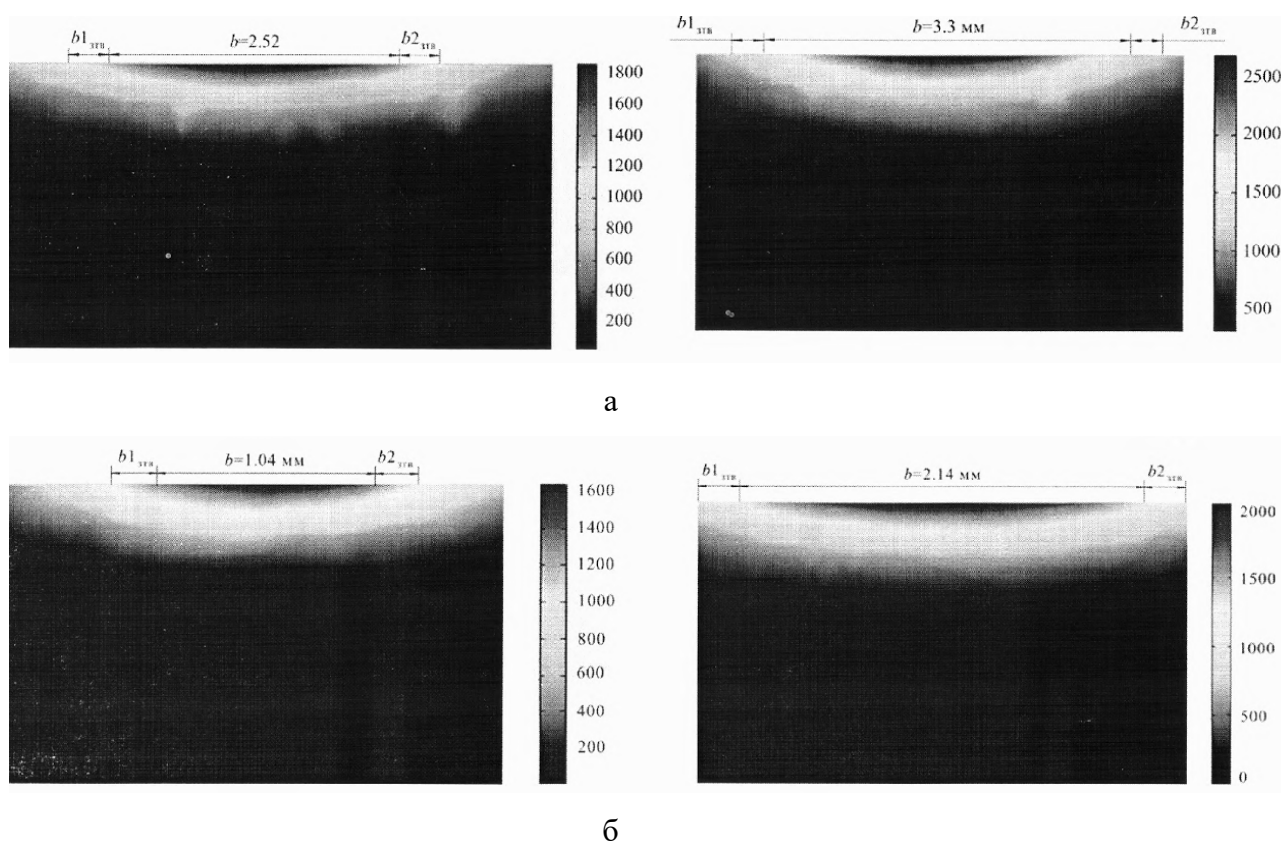


Рис. 2.28 - Розподіл температур у поперечній площині при різних швидкостях переміщення лазерного променя: а - $0,3$ м/с та б) - $0,6$ м/с густині потужності – $4,2 \cdot 10^8$ Вт/м² (а) і різних діаметрах зони фокусування: а-3 мм; б – 2 мм. Густина потужності – $5,8 \cdot 10^8$ Вт/м² (б)

З огляду на те, що при фокусуванні в зону діаметром 2,0 мм нам необхідно забезпечити густину потужності ($Wp = 5,4 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$), що дозволяє отримувати ширину розплаву в зазначених межах, то необхідна потужність лазерного випромінювання повинна становити не менше 2 кВт.

Разом з тим, отримані залежності глибини і довжини ванни розплаву від густини потужності при різних швидкостях руху лазерного джерела, а також температурні залежності в зразку при впливі рухомого лазерного променя (рисунок 2.29 – 2.33).

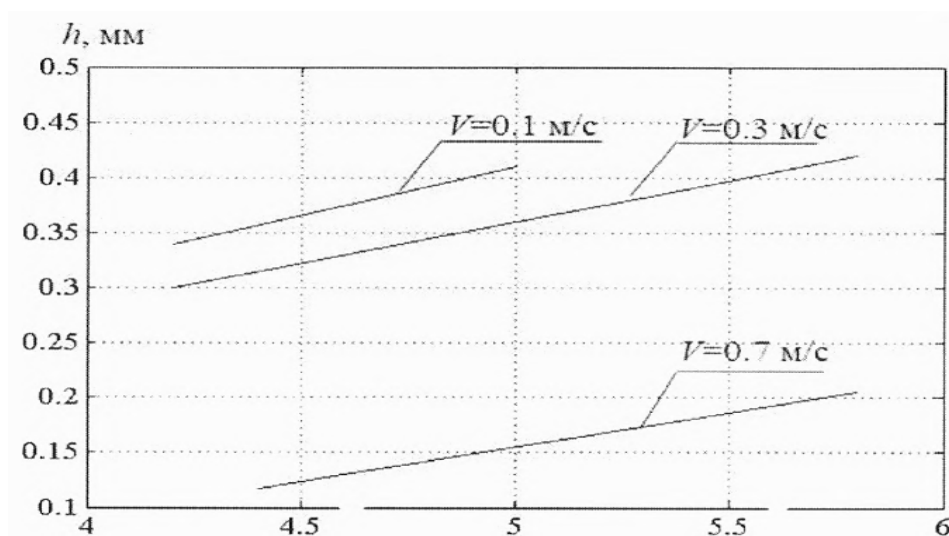


Рис. 2.29 - Залежність глибини ванни розплаву від густини потужності при різних швидкостях руху лазерного джерела

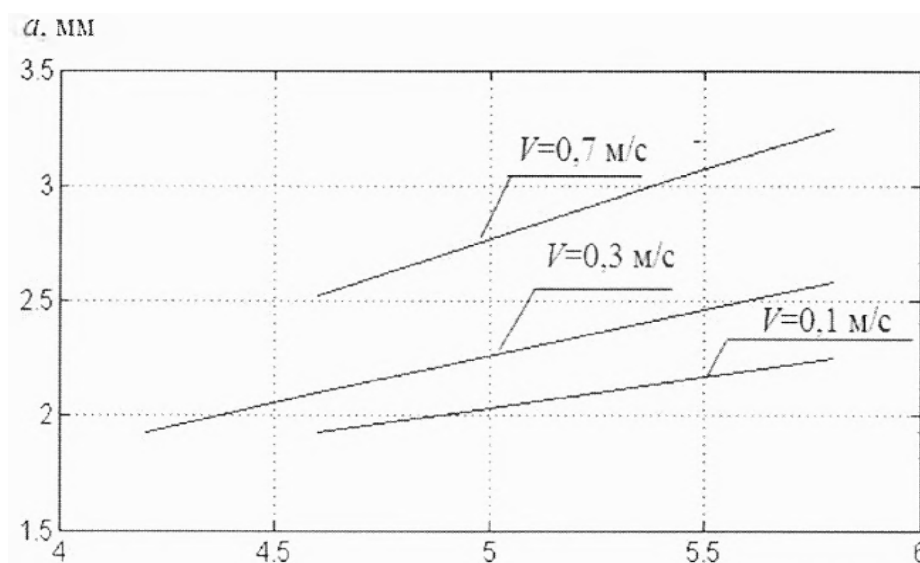


Рис. 2.30 - Залежність ефективної довжини ванни розплаву від густини потужності при різних швидкостях руху лазерного джерела

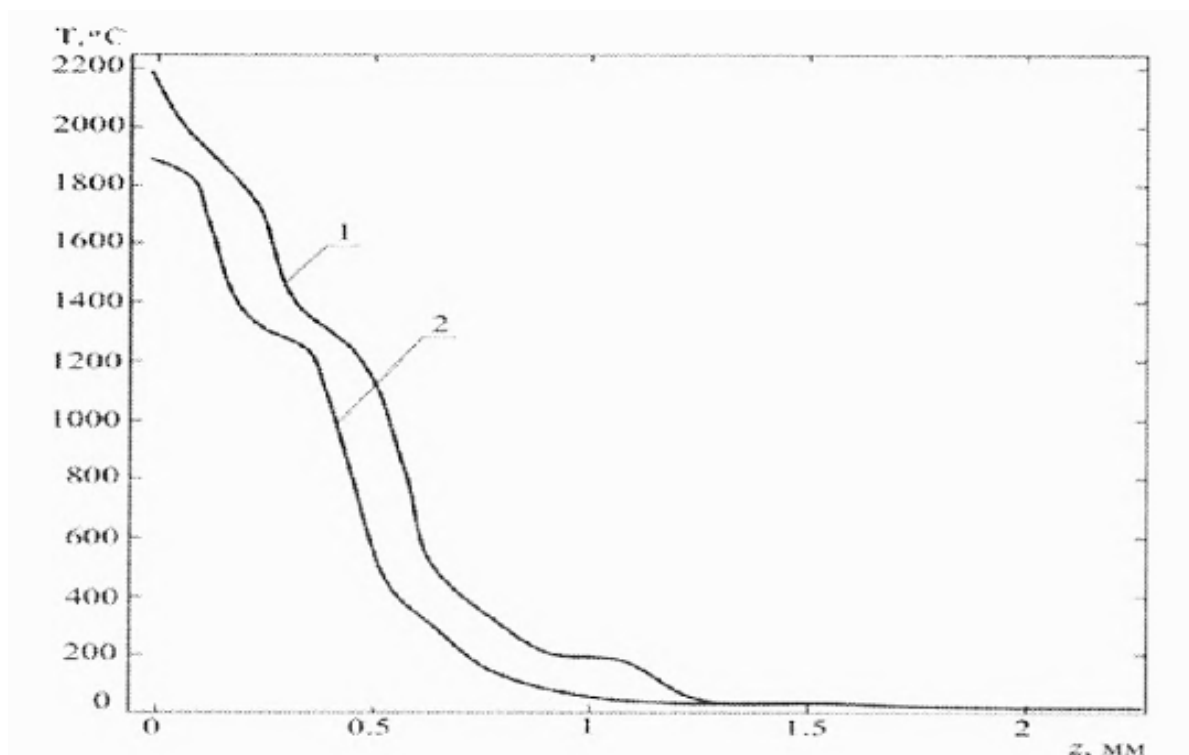


Рис. 2.31 - Розподіл температури по глибині зразка в точці нагріву в момент часу 0,1с при густині потужності (1) і (2)

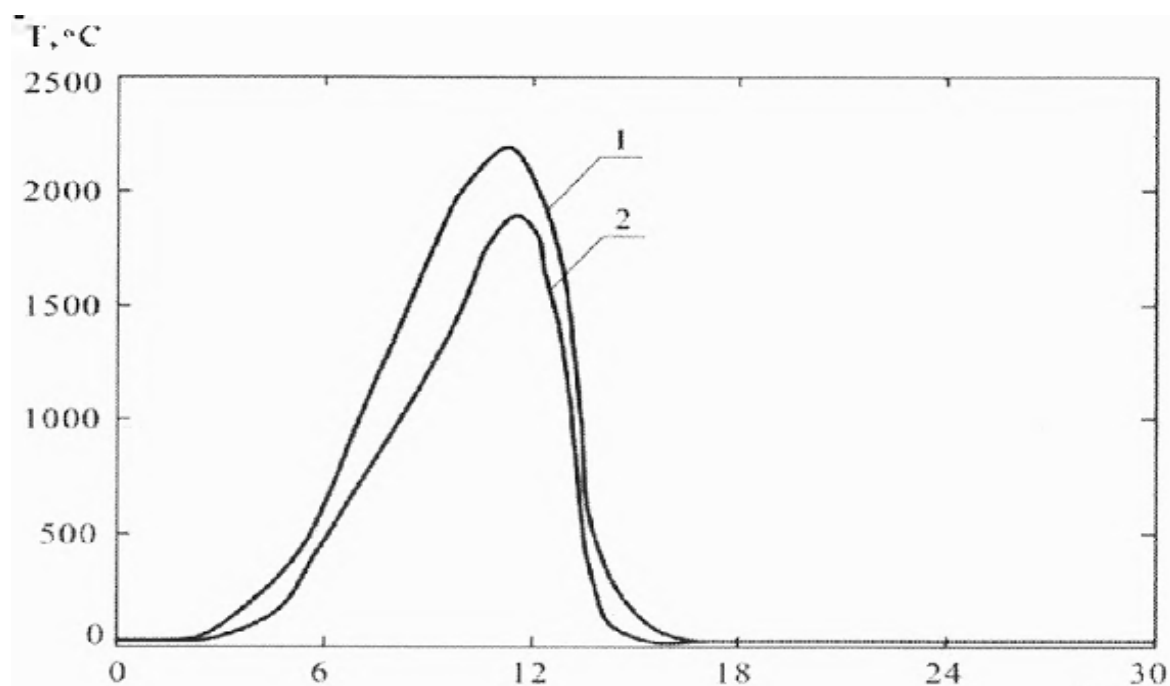


Рис. 2.32 - Фронт змін температури зразка вздовж руху джерела в момент часу 0,1с при густині потужності (1) і (2)

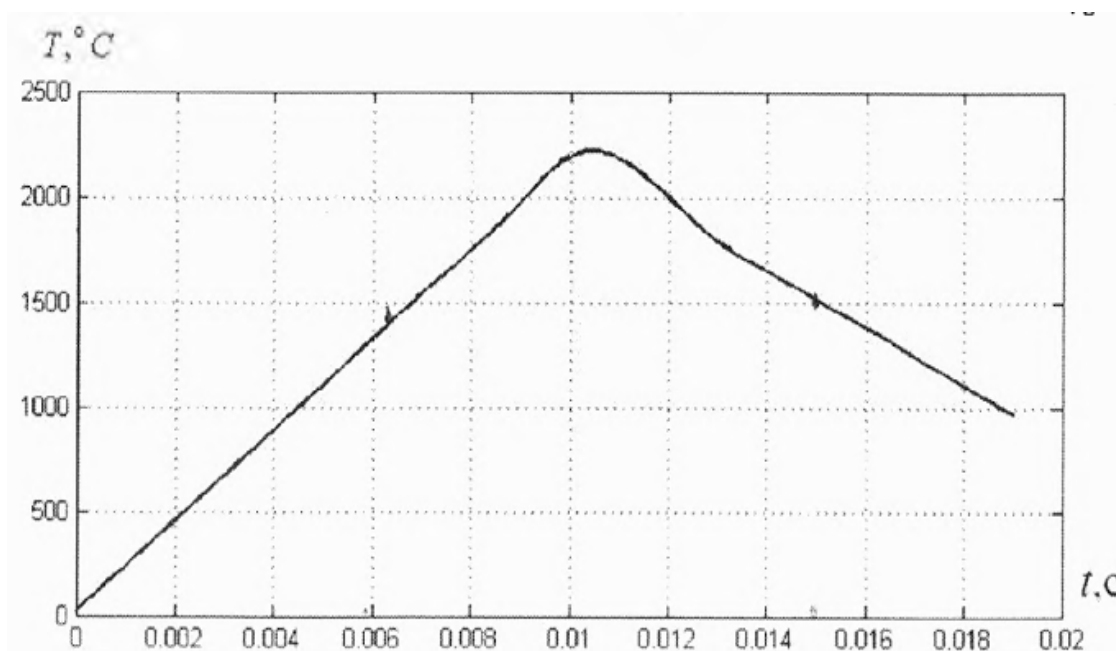


Рис. 2.33 - Зміна температури в часі в точці $X = 10,5$ мм при густині потужності і швидкості руху лазерного променя $V = 0,7$ м/с

Наведені залежності вказують на можливість отримання перехідної литої зони на біметалі за час дії лазерного випромінювання на зазначених режимах опромінення.

Синхронізації швидкості переміщення.

Одною з головних проблем при проектуванні експериментальної установки була синхронізації заливання рідкого металу і переміщення лазерного променя. Дана проблема була вирішена за допомогою комп'ютерного моделювання процесу в програмному комплексі Ansys CFX.

Метою дослідження було виявлення оптимальної швидкості заливання рідкого металу на металеву підкладку при різних геометричних параметрах заливного вузла, кута нахилу, перерізу зливного носика, об'єму зливної рідини.

Завдання моделювання ставилось для двохфазної течії рідкого металу і газу. Гідродинамічні характеристики металевого розплаву взяті при температурі плавлення і прийняті постійними за часом (табл.2.2).

Таблиця 2.2 - Гідродинамічні і теплофізичні характеристики металевого розплаву

Рідка фаза	Густина	Динамічна в'язкість	Питома теплоємність
Метал	7300 кг/м ³	0,05 Па·с	760 Дж/(кг·К)

Схема структурної області обрахунку представлена на рисунку 2.34.



Рис. 2.34 - Структура розрахункової області течії металевого розплаву по твердій заготовці

Початкові умови:

За відносний тиск прийнято гідростатичний тиск стовпа рідини.

Граничні умови:

На вході в розливному ковші на межі розділу рідкого розплаву чавуну і сталі постійний тиск $P_0 = 0$.

Граничні умови на виході - вихід у вільну атмосферу з тиском $P=0$ атм. Діаметр зливного каналу носка d , підбирався експериментальним способом з умови вільного проходження рідкого розплаву по зливному каналу. Для досягнення швидкості зливу з умови синхронізації швидкості заливки рідкого розплаву і переміщення плазмової дуги. Виходячи з отриманих даних вибрано значення $d = 5$ мм.

При проведенні розрахунків швидкості заливки металевого розплаву на сталеву заготовку варіювалися наступні геометричні параметри зливного вузла (рисунки 2.34):

Тут:

- h висотою стовпа рідини в заливальному ковші;
- α кута нахилу зливного носка.

Як показали розрахунки та спостереження за зоною заливки основного металу (підкладки) розплавленим металом (плакуючим шаром), швидкість поширення розплаву по поверхні металу основи значно нижче зазначених в експериментах швидкостей плавлення підкладки. Так, швидкість поширення розплаву може становити лише 0,03...0,1 м/с в залежності від типу розплаву і його температури, тоді як оптимальна швидкість плавлення на обраних режимах становить 0,7 м/с.

Тому може бути розроблена схема заливки біметалу при одночасному плавленні його основи лазерним випромінюванням (рисунок 2.2.35), коли лазерний промінь одночасно сканується в поперечному напрямку зі швидкістю, що забезпечує плавлення підкладки, тобто зі швидкістю $V_{ск.} = 0,7$ м/с, з рухом в напрямку заливки робочого шару зі швидкістю руху розплаву, тобто зі швидкістю $V_{роз.} = 0,03 \dots 0,1$ м/с.

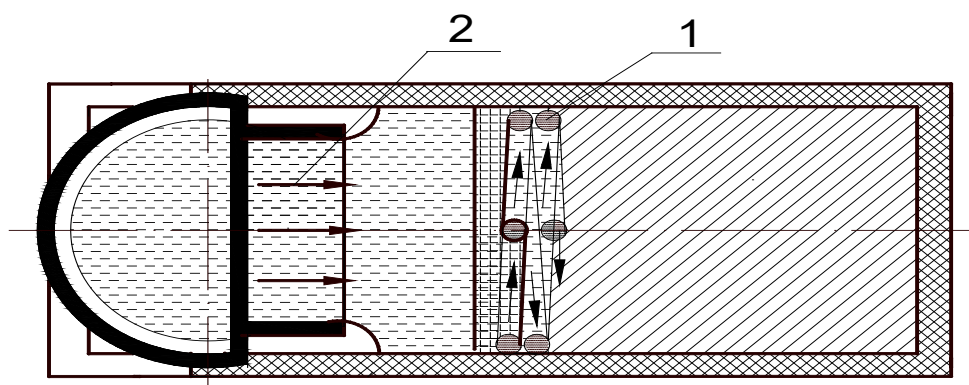


Рис. 2.35 - Схема заливки біметалу при одночасному плавленні його основи в поперечному напрямку скануючим лазерним випромінюванням і вільним плинном плакуючого розплаву: 1 – лазерне випромінювання, що сканує; 2 – вільне витікання розплаву для утворення плакуючого шару біметалу

Залежно від співвідношення швидкостей $V_{ск.}$ і $V_{роз.}$ можливі такі умови обробки (рисунок 2.36):

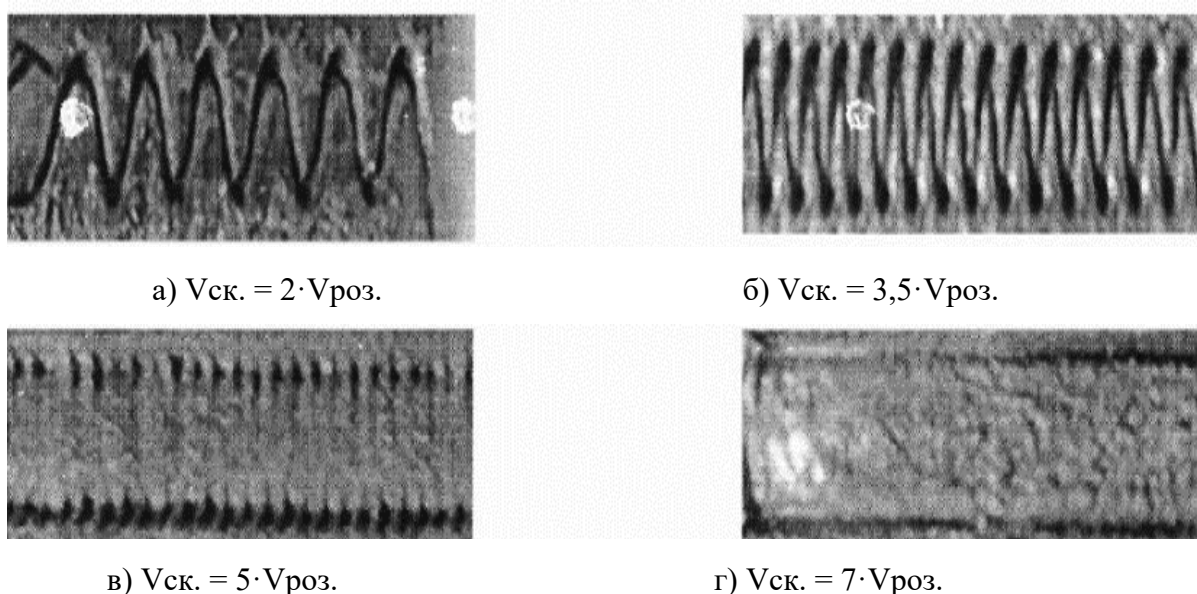


Рис. 2.36 - Реалізація умов плавлення основи біметалу при різних співвідношеннях швидкостей сканування лазерного променя і заливки розплаву

Отже, при обраній швидкості лазерного опромінення скануючим променем і швидкості вільної течії розплаву для утворення плакуючого шару біметалу ширина зони сканування, а, отже, і ширина одержуваного біметалу може становити до 150 мм. Цей метод не завжди може нас задовольняти, якщо ми хочемо отримати біметали набагато більших розмірів. При зростанні потужності лазерного устаткування, що використовується, відповідно можуть зростати і розміри отримуваних пластин біметалу.

Крім того, теоретичний аналіз показує, що, крім усього іншого, необхідна розробка таких конструктивних рішень, при яких забезпечувалося б стійке співвідношення $V_{ск.}$ і $V_{роз.}$ (рисунок 2.36). Тобто необхідне сполучення швидкостей заливки і плавлення основи при виробництві біметалів лазерно-ливарним методом. Це дозволить отримати біметали з надійним зчепленням його шарів, що гарантує працездатність біметалу в процесі всього терміну його експлуатації.

2.2. Обладнання для лазерно-ливарного виготовлення біметалів

Одним з відомих пристроїв для отримання біметалів є система отримання біметалічного зливка зі зносостійким поверхневим шаром методом ливарного плакування, яке включає засіб для подання розплавленого металічного матеріалу одного складу (наприклад, чавуну) у виливницю, в якій встановлена плита із металічного матеріалу іншого складу (наприклад, сталі 10 або 20) [2]. Цей винахід дозволяє отримувати на біметалі корозійностійкий шар потрібної товщини, проте при отриманні біметалічного зливка не досягається високий рівень міцності зчеплення шарів і висока вірогідність виникнення відшаровування отриманого шару в процесі подальшого використання.

Відомий пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів, що включає виливницю, в якій встановлена основа (плита із металічного матеріалу одного складу), засіб для подання у виливницю розплавленого металічного матеріалу іншого складу та сконцентрований лазерний промінь для нагрівання основи до температури плавлення [3]. Завдяки плавленню основи концентрованим лазерним променем, порівняно з аналогом, досягається високий рівень міцності зчеплення шарів біметалу: основи та плакувального шару, що наплавляється. Проте цей пристрій має той недолік, що при використанні лазерного випромінювання середньої потужності (до 1 кВт) край розплаву плакувального матеріалу переміщується по поверхні основи швидше, ніж переміщується сконцентрований лазерний промінь, якому потрібно встигнути розплавити основу і отримати локальну ванну розплаву потрібної глибини (наприклад, до 0,5 мм). Бо якщо лазерний промінь уподовж виливниці переміщується повільніше, ніж плакувальний розплав, то настає момент, коли промінь повністю потрапляє на плакувальний розплав та не в змозі потрапити на основу і створити в ній ванну розплаву. У такому випадку взагалі не

можливо отримати біметал з надійним зчепленням його шарів. Тому потрібно строго дозувати кількість плакувального розплаву, що подається в зону наплавлення, щоб синхронізувати названі вище швидкості.

В основу представленого пристрою покладено задачу зниження собівартості процесу лазерно-ливарного виготовлення біметалів та підвищення якості цього процесу в результаті постійного підтримування краю розплаву плакувального матеріалу на заданій відстані від сконцентрованого лазерного променя та забезпечення строгого дозування кількості плакувального розплаву, що подається в зону наплавлення, для отримання надійного змішування двох розплавів металів (плакувального та основи), що забезпечує високий рівень міцності зчеплення шарів і низьку вірогідність відокремлення плакувального шару в процесі подальшого використання біметалу.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для лазерно-ливарного виготовлення біметалів, що містить виливницю, в якій встановлена основа (плита із металічного матеріалу одного складу), засіб для подання розплавленого металічного матеріалу іншого складу (плакувального металу), який включає в себе лоток з розплавом і жолоб для рівномірного нанесення на основу плакувального шару та сопло для подачі сконцентрованого лазерного променя для нагрівання основи до температури плавлення разом з захисним газом, згідно з пропонованою корисною моделлю новим є те, що газолазерне сопло забезпечене заслінкою, яка дозує кількість плакувального розплаву, що подається в зону наплавлення за рахунок встановленого проміжку між заслінкою та основою, причому величина перерізу цього проміжку повинна бути рівною величині перерізу жолоба для подачі плакувального розплаву. Це синхронізує швидкість руху плакувального матеріалу і локальної ванни розплаву, що створюється лазерним променем в основі, та забезпечує потрібне дозування

кількості плакувального розплаву для створення перехідного шару, щоб гарантувати надійне зчеплення основи з плакувальним шаром в біметалі.

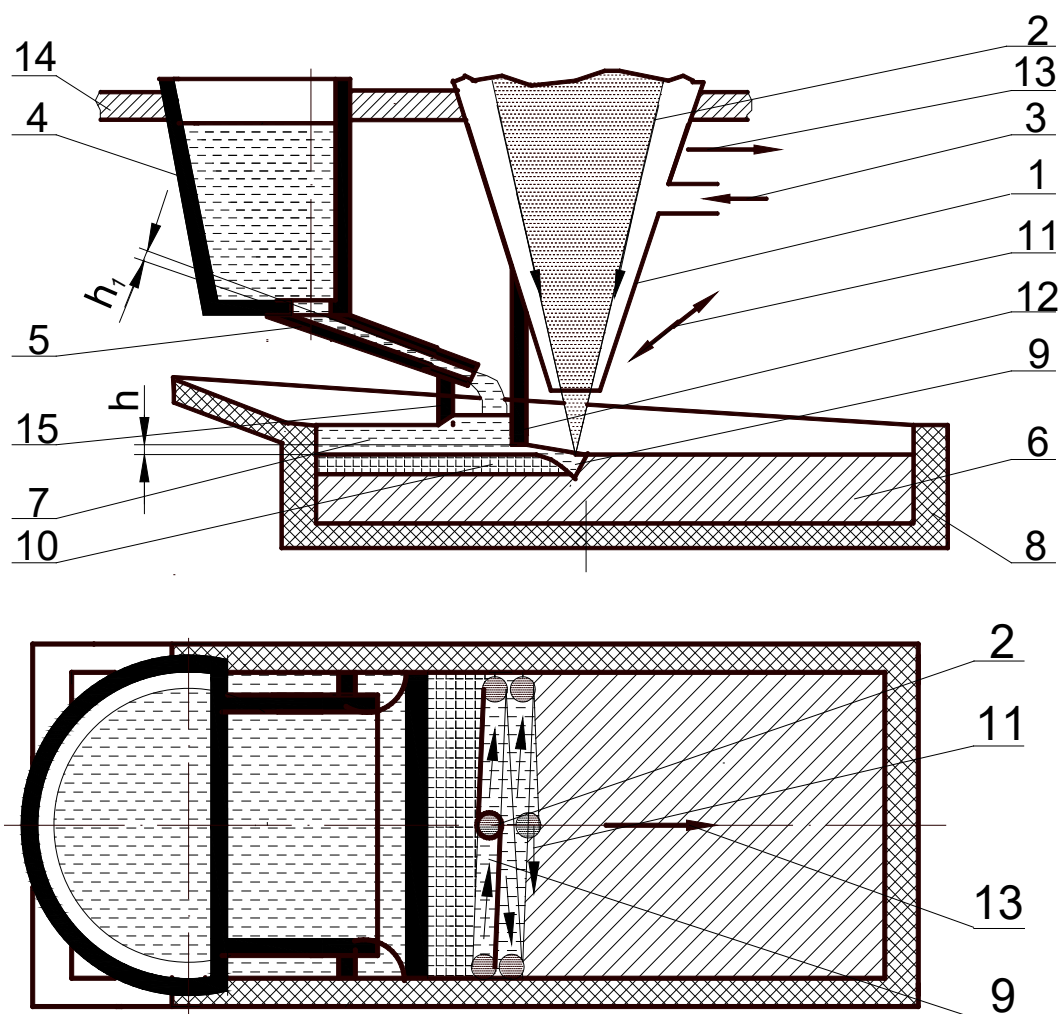


Рис. 2.37 - Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів

Сутність розробленого пристрою пояснюється кресленням, на якому на рисунок 2.37 зображений пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів з високою міцністю зчеплення його шарів.

Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів містить газолазерне сопло 1 для подачі сконцентрованого лазерного променя 2 та захисного газу 3 (наприклад, аргону) в зону обробки. Пристрій забезпечений також засобом для подання розплавленого металічного матеріалу, який включає в себе лоток 4 з розплавом та жолоб 5 для рівномірного нанесення на основу 6 плакувального шару 7 для отримання біметалу. Перед заливкою

рідким плакувальним металом 7 основа 6 встановлюється в виливницю 8. За рахунок лазерного променя 2 в середовищі захисного газу 3 в основі 6 утворюється локальна ванна 9 розплаву основи. При подальшому змішуванні в цій ванні рідкого металу основи та плакувального металу за рахунок вільної теплової конвекції створюється перехідний шар 10, який забезпечує надійне зчеплення шарів біметалу. Для забезпечення створення локальної ванни 9 розплаву основи по всій її ширині сконцентрованому лазерному випромінюванню 2 може завдаватися скануючий рух 11. Вільному розтіканню плакувального металу 7 по основі 6 перешкоджає заслінка 12, виконана із термостійкого матеріалу, наприклад, графіту. Синхронізація швидкості руху 13 заслінки 12 упродовж виливниці 8 з швидкістю руху лазерного променя 2 забезпечується конструктивно тим, що засіб для подання плакувального металу розміщений на рухомій упродовж виливниці 8 каретці 14 лазерного обладнання разом з газолазерним соплом 1. Проміжок між заслінкою 12 та основою 6 висотою (рисунок 2.2.37) забезпечує потрібне дозування кількості плакувального розплаву, що необхідно для створення перехідного шару 10 для надійного зчеплення основи з плакувальним шаром. Для стабілізації в процесі обробки потрібної кількості металу за заслінкою 12 висоту жолоба 5 підбирають із розрахунку, щоб величина перерізу цього жолоба була рівною величині перерізу проміжку між заслінкою та основою. Для забезпечення потрібної висоти плакувального шару біметалу на лотку 4 може бути розміщений шкребок 15.

Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів працює в такий спосіб.

Спочатку основа 6 для виготовлення біметалу встановлюється в виливницю 8, яка по формі, як правило, подібна формі основи 6. За допомогою фокусуючого елемента, що входить до складу газолазерного сопла 1, лазерний промінь 2 концентрується на поверхні основи 6 так, щоб

цієї концентрації було достатньо для розплавлення її поверхні і утворення локальної ванни 9 розплаву. Завдяки захисному газу 3 (наприклад, аргону), що може подаватися, наприклад, сосно лазерному променю ця ванна захищається від окислення. За допомогою засобу для подання розплавленого металічного матеріалу, який включає в себе лоток 4 з розплавом та жолоб 5, на поверхню основи 6 виливається інший потрібний металічний матеріал, дякуючи якому створюється плакувальний шар 7 біметалу. Плакувальний матеріал заливається на основу у безпосередній близькості від локальної ванни 9, так що ця ванна не встигає кристалізуватися, і, завдяки вільній тепловій конвекції та перемішуванню плакувального металу та розплаву основи, створюється перехідний сплав 10, який забезпечує високий рівень міцності зчеплення основних шарів біметалу. В залежності від потужності лазерного випромінювання може бути виготовлений біметал різної ширини. Для забезпечення обробки по всій ширині основи 6 лазерному випромінюванню 2 може завдаватися скануючий рух 11.

Швидкість течії плакувального матеріалу по поверхні основи залежить як від природи самого матеріалу, так і інших чинників. Разом з тим, для плавлення основи та створення локальної ванни розплаву цілком достатньо використовувати лазерне випромінювання невисокої потужності (до 1 кВт). Враховуючи, що вартість лазерного обладнання по експоненціальному закону зростає в залежності від його потужності, то такий підхід набагато економічно вигідніший. Проте швидкість переміщення лазерного променю уподовж виливниці при цьому значно знижується і, як правило, набагато нижча швидкості течії плакувального матеріалу по поверхні основи. Для обмеження швидкості течії розплаву та її синхронізації зі швидкістю переміщення лазерного променю уподовж виливниці використовується заслінка 12, яка розміщується на газолазерному соплі 1. Разом з тим, між заслінкою 12 та основою 6

залишають проміжок висотою , що забезпечує потрібне дозування кількості плакувального розплаву, який необхідний для створення перехідного шару 10 для надійного зчеплення основи з плакувальним шаром. Оптимальне значення величини проміжку залежить від природи плакувального металу і може бути встановлене експериментально.

При цьому на початку обробки плакувальний матеріал накопичується біля заслінки 12, створюючи шар рідкого металу висотою декілька більшою, ніж необхідна висота плакувального шару. Після цього подається лазерне випромінювання 2, якому придається скануючий рух 11 та рух 13 уподовж виливниці 8. При утворенні локальної ванни в основі 6 розігріваються також нижні шари плакувального металу біля заслінки 12, підвищується їх рідкотекучість, і метал починає витікати з під заслінки 12 та перемішуватися з металом локальної ванни 9, утворюючи перехідний шар 10. Для стабілізації такого процесу під час обробки потрібне постійне підживлення кількості матеріалу за заслінкою 12 з лотка 4 через жолоб 5. А щоб виключити можливість зміни цієї кількості, висота жолоба 5 вибирається із міркування, що величина перерізу цього жолоба повинна бути рівною величині перерізу проміжку між заслінкою та основою. Щоб забезпечити потрібну висоту та рівномірність плакувального шару біметалу, може бути використаний шкребок 15, який можна розмістити, наприклад, на лотку 12.

Таким чином, пропонований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок зниження собівартості використовуваного лазерного устаткування та підвищення якості процесу в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення плакувального шару в процесі подальшого використання біметалу.

2.3 Автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів

В основу створення автоматизованого пристрою покладено задачу в автоматизованому режимі постійно підтримувати сконцентрований лазерний промінь на заданій відстані від краю розплаву плакувального матеріалу для отримання надійного змішування двох розплавів металів (плакувального та основи), що забезпечує високий рівень міцності зчеплення шарів і низьку вірогідність відокремлення плакувального шару в процесі подальшого використання біметалу.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для лазерно-ливарного виготовлення біметалів, що містить виливницю, в якій встановлена основа (плита із металічного матеріалу одного складу), засіб для подання розплавленого металічного матеріалу іншого складу і його нанесення на основу (для створення біметалу) та сопло для подачі сконцентрованого лазерного променя для нагрівання основи до температури плавлення разом з захисним газовим потоком, згідно з пропонованою корисною моделлю новим є те, що газо-лазерне сопло забезпечене ємнісним датчиком, який контролює відстань від краю розплаву плакувального металу до локальної ванни, створеної лазерним променем. Інформація про зміну цієї відстані поступає на комп'ютер, який коректує швидкість переміщення лазерного променя. Це забезпечує в автоматизованому режимі постійне підтримування лазерного променя на заданій відстані від краю розплаву плакувального матеріалу.

Сутність розробленого пристрою пояснюється кресленням, на якому на рисунок 2.38 зображений пристрій для автоматизованого лазерно-ливарного виготовлення біметалів з високою міцністю зчеплення його шарів.

Автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів містить газо-лазерне сопло 1 для подачі сконцентрованого лазерного променя 2 та захисного газу 3 (наприклад, аргону) в зону обробки. Пристрій забезпечений також засобом для подання розплавленого металічного матеріалу, який включає в себе лоток 4 з розплавом та жолоб 5 для рівномірного нанесення на основу 6 плакувального шару 7 для отримання біметалу.

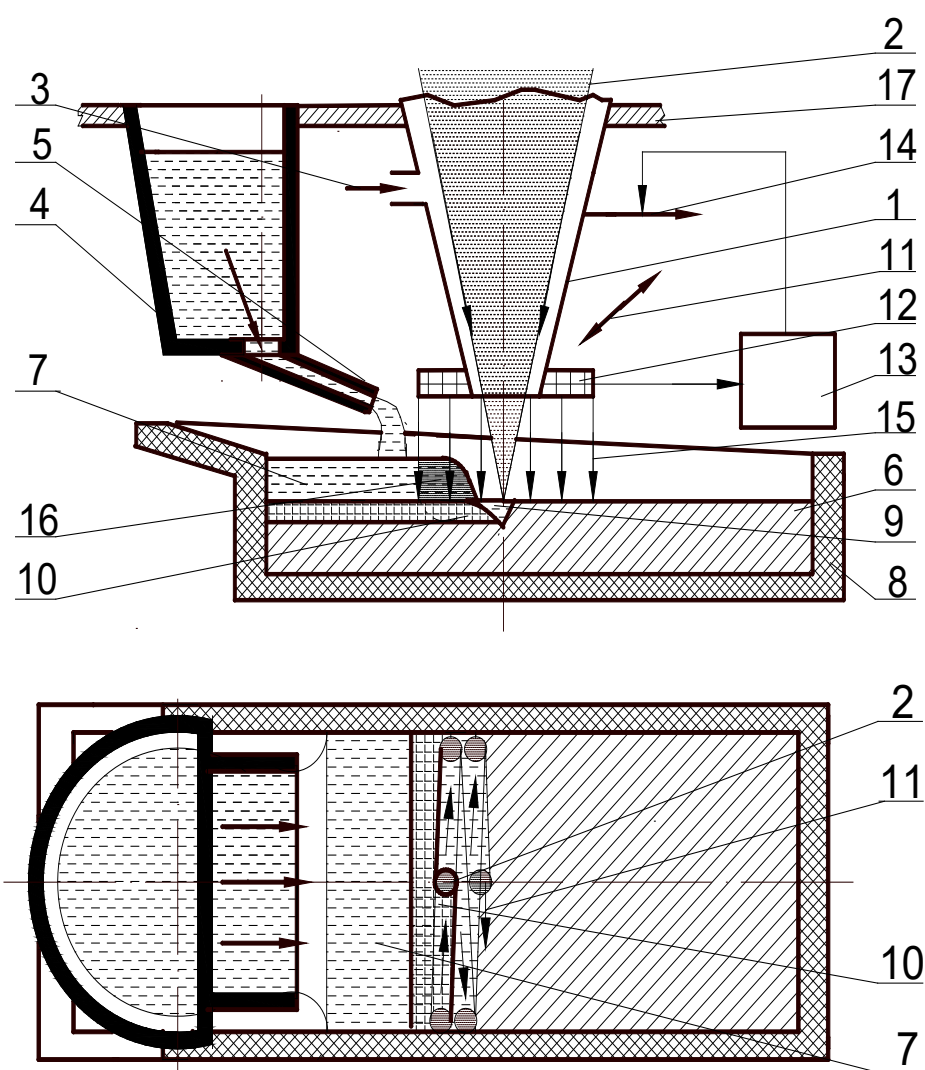


Рис. 2.38 - Пристрій для автоматизованого лазерно-ливарного виготовлення біметалів

Перед заливкою рідким плакувальним металом 7 основа 6 встановлюється в виливницю 8. За рахунок лазерного променя 2 в середовищі захисного газу 3 в основі 6 утворюється локальна ванна 9

розплаву основи. При подальшому змішуванні в цій ванні рідкого металу основи та плакувального металу, що витікає із лотка 4 через жолоб 5, за рахунок вільної теплової конвекції створюється перехідний шар 10, який забезпечує надійне зчеплення основних шарів біметалу. Для забезпечення створення локальної ванни 9 розплаву основи по всій її ширині сконцентрованому лазерному випромінюванню 2 може задаватися скануючий рух 11. Для контролю положення краю розплаву плакувального металу по відношенню до лазерного променя 2 газо-лазерне сопло 1 забезпечене ємнісним датчиком 12, який за допомогою комп'ютера 13 контролює та змінює швидкість руху 14 сконцентрованого лазерного променя 2 упродовж виливниці 8. Електростатичне поле 15, створене в проміжку між ємнісним датчиком 12 та основою 6, змінюється за рахунок частини рідкого плакувального металу 16, що потрапляє в поле дії поля 15. Засіб для подання розплавленого металу, що складається з лотка 4 та жолоба 5, може бути розміщеним як на одній рухомій упродовж виливниці каретці 17 лазерного обладнання разом з газо-лазерним соплом 1, так і окремо встановленим на нерухомій частині обладнання.

Автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів працює в такий спосіб.

Спочатку основа 6 для виготовлення біметалу встановлюється в виливницю 8, яка по формі, як правило, подібна формі основи 6. За допомогою фокусуючого елемента, що входить до складу газо-лазерного сопла 1, лазерний промінь 2 концентрується на поверхні основи 6 так, щоб цієї концентрації було достатньо для розплавлення її поверхні і утворення локальної ванни 9 розплаву. Завдяки захисному газу 3 (наприклад, аргону), що може подаватися, наприклад, сосно лазерному променю ця ванна захищається від окислення. Одночасно з початком подачі лазерного випромінювання на поверхню основи 6 виливається інший потрібний металічний матеріал, дякуючи якому створюється плакувальний шар 7

біметалу. Здійснюється це за допомогою засобу для подання цього матеріалу, який включає в себе лоток 4 з розплавом та жолоб 5. Плакувальний матеріал заливається на основу у безпосередній близькості до локальної ванни 9, так що ця ванна не встигає кристалізуватися, і, завдяки вільній тепловій конвекції та перемішуванню плакувального металу та розплаву основи, створюється перехідний сплав 10, який забезпечує високий рівень міцності зчеплення основних шарів біметалу. В залежності від потужності лазерного випромінювання може бути виготовлений біметал різної ширини. Для забезпечення обробки по всій ширині основи 6 лазерному випромінюванню 2 може завдаватися скануючий рух 11.

Швидкість течії плакувального матеріалу по поверхні основи залежить як від природи самого матеріалу, так і інших чинників. Крім того, ця швидкість може змінюватися безпосередньо в процесі заливки. Тому для забезпечення постійної відстані між краєм плакувального металу, що тече, та локальною ванною, розплавленою лазерним променем в основі, потрібно постійно контролювати та, при потребі, змінювати швидкість руху 14 лазерного променю 2 упродовж виливниці 8. Для реалізації такого контролю на кінці газо-лазерного сопла 1 розміщується ємнісний датчик 12, який створює електростатичне поле 15 в проміжку між самим датчиком 12 та основою 6. Кількість рідкого плакувального металу 16, що потрапляє під датчик 12, в поле дії його електростатичного поля 15, впливає на чутливість цього датчика. При цьому заздалегідь можна настроїти таку чутливість датчика 12, щоб кількість металу 16, що заходить в поле 15 його дії, забезпечувала потрібну відстань між краєм розплаву плакувального металу та локальною ванною, створеною лазерним променем. Інформація про чутливість датчика 12 подається на комп'ютером 13 та контролюється ним. Зміну чутливості датчика 12 в процесі заливки плакувального металу комп'ютер 13 відпрацьовує наступним чином: якщо кількість металу 16 зменшується, то комп'ютер також зменшує швидкість руху 14, і край

плакувального металу знову наздоганяє край локальної ванни в основі. Та навпаки – при збільшенні кількості металу 16 швидкість руху 14 прискорюється, і локальна ванна віддаляється від краю плакувального металу на потрібну відстань. При досягненні потрібної відстані між плакувальним шаром та локальною ванною в обох випадках швидкість руху 14 стабілізується. В такий спосіб забезпечується в автоматизованому режимі постійність відстані від краю розплаву плакувального металу до локальної ванни, створеної лазерним променем в основі, що і забезпечує стабілізацію процесу.

Таким чином, автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок підвищення якості процесу в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення плакувального шару в процесі подальшого використання біметалу.

2.4. Експериментальні дослідження можливості отримання біметалів лазерно-ливарним методом

На основі результатів теоретичних досліджень і виконаних інженерних розрахунків було проведено низку експериментів з встановлення можливостей виробництва біметалів при комплексному використанні лазерного випромінювання і індукційного електромагнітного поля. Лазерне випромінювання при цьому використовується для розплавлення тонкого поверхневого шару металу-основи (підкладки) для утворення між складовими біметалу перехідного шару, який забезпечує металургійне їх зчеплення. В якості лазерного обладнання застосовувалася технологічна лазерна установка «Комета 2» з технологічними параметрами, представленими в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Технологічні параметри лазерного обладнання

Параметр	Позначення параметра	Значення параметра	Одиниця виміру
Потужність випромінювання	W	1000	Вт
Довжина хвилі випромінювання	λ	10,6	мкм
Фокусна відстань фокусуючої лінзи	F	200	мм
Діаметр плями в зоні опромінення	d0	0,8	мм
Густина потужності в зоні опромінення	Wp	$5 \cdot 10^8$	$Вт / м^2$

В якості пар металів були підібрані матеріали, представлені в табл. 2.4:

Таблиця 2.4 - Склад біметалічних пар

Матеріал металу-основи (підкладки)	Матеріал заливного (робочого) шару
Ст.3	СЧ30
Ст.3	ЧХ16
Ст.3	Бр05Ц5С5
Ст.3	АК7
Бр05Ц5С5	АК7
Бр05Ц5С5	Бр05Ц5С5
АК7	АК7

На рисунку 2.39 і 2.40 представлені біметалічні з'єднання при заливці металу-основи (підкладки) - сталь Ст.3, рідкими чавунами різного складу.

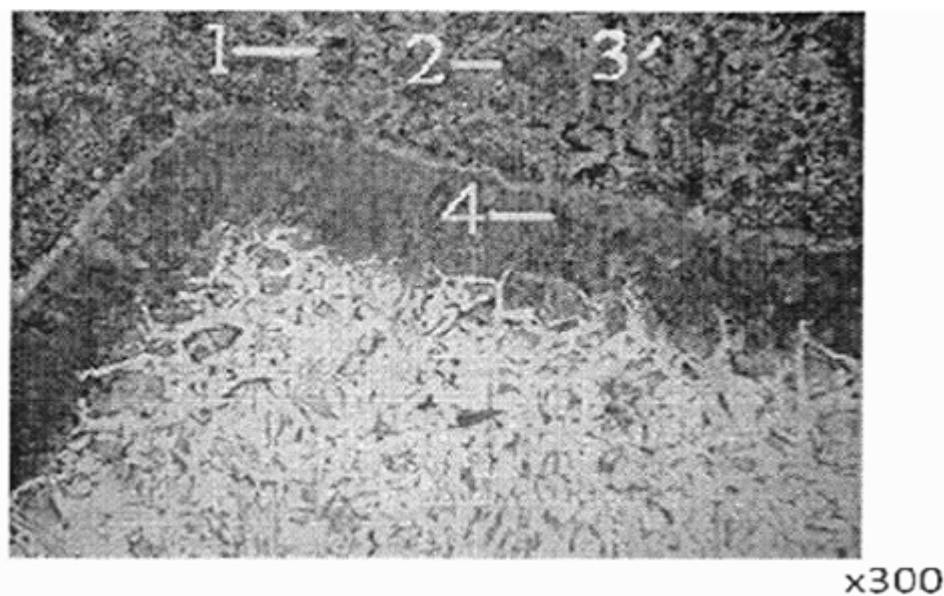


Рис. 2.39 - Структура рідкофазного з'єднання Ст.3 - СЧ30; 1 - перліт; 2 -цементит; 3 - графіт; 4 - перліт перехідного шару; 5 - оплавлений шар, Відманштетова структура.

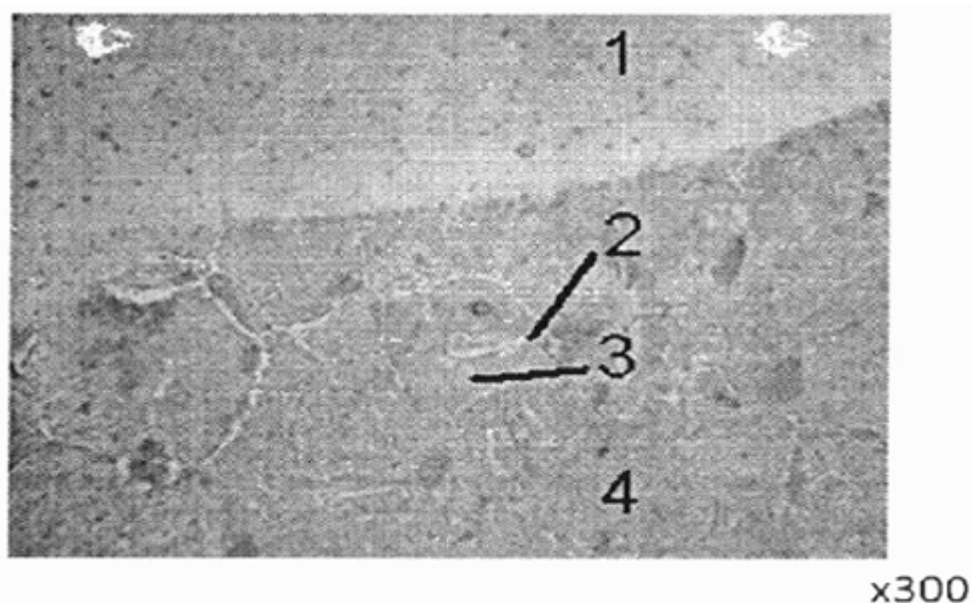


Рис. 2.40 - Структура рідкофазного з'єднання Ст.3 - ЧХ16: 1 – чавун ЧХ16; 2 – ферит; 3 – бейніт; 4 – сталь Ст3

Лазерно-ливарні рідкофазні з'єднання перехідних шарів інших біметалічних пар представлені на рисунках 2.2.42 – 2.2.44.

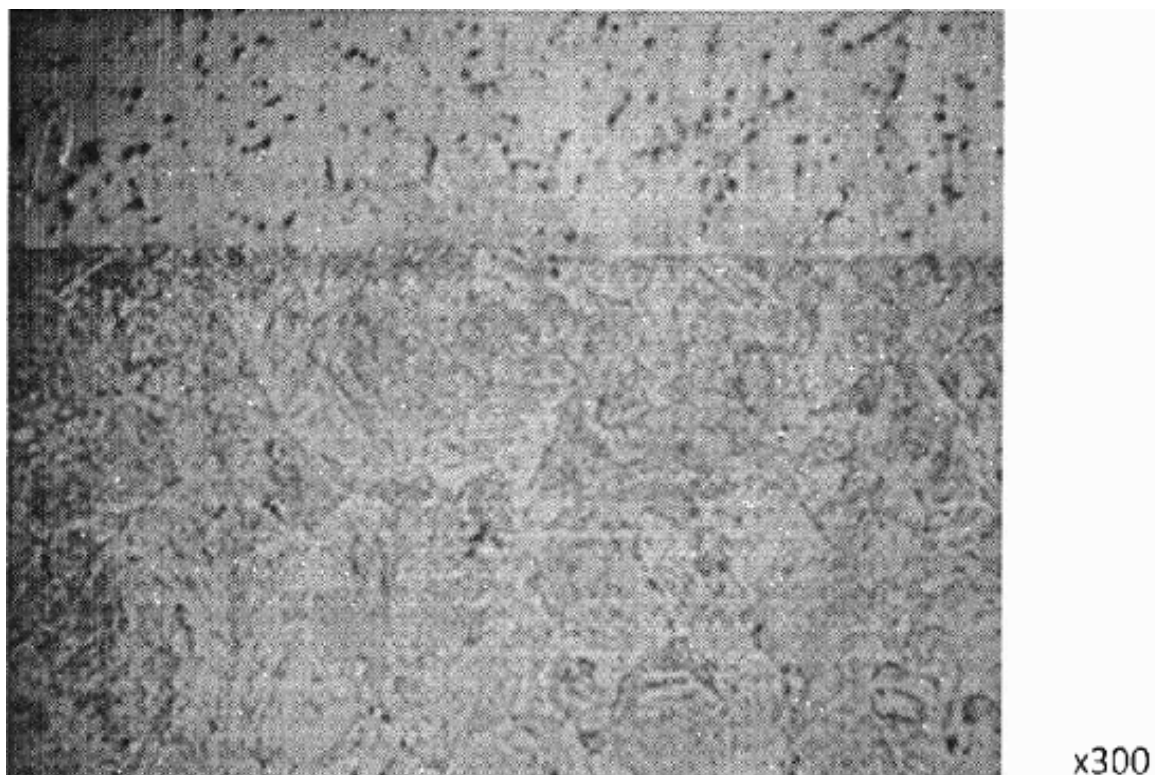


Рис. 2.41 - Структура перехідних шарів біметалевої пари «сталь - бронза»

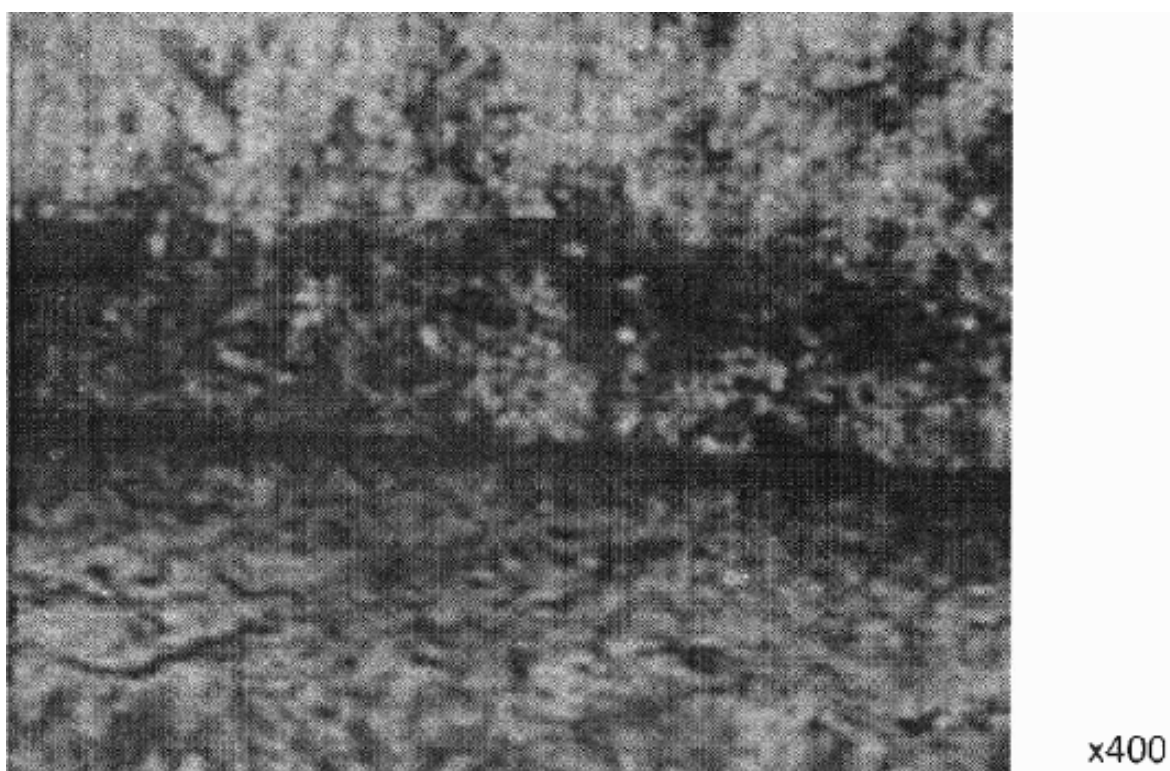


Рис. 2.42 - Структура перехідних шарів біметалевої пари «сталь - алюмінієвий сплав»

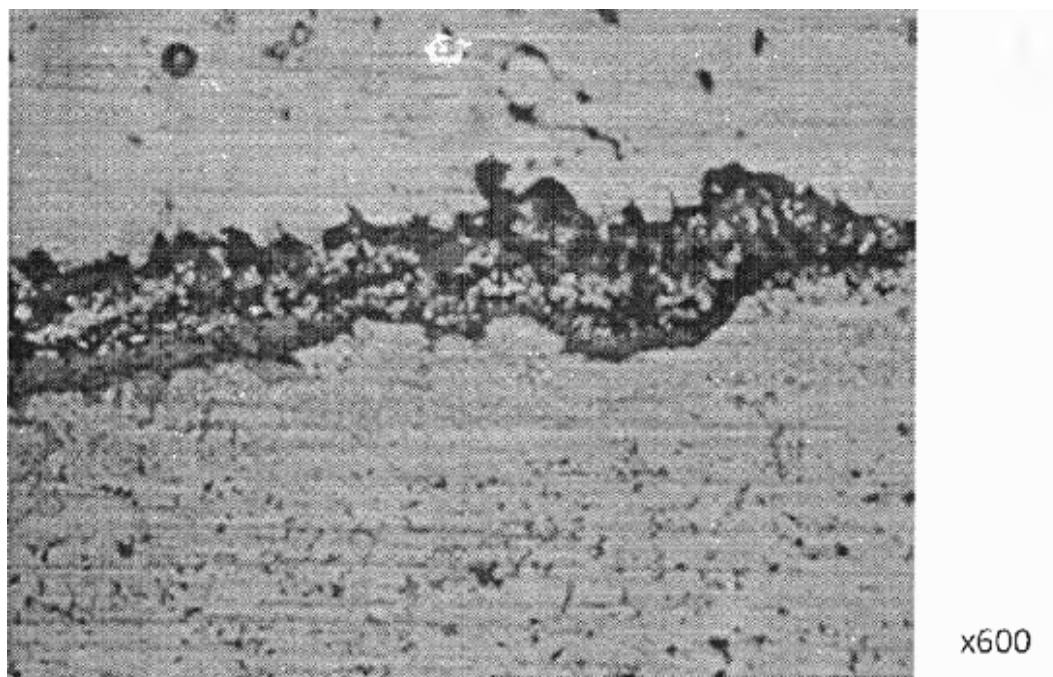


Рис. 2.43 - Структура перехідних шарів біметалевої пари «бронза - бронза»

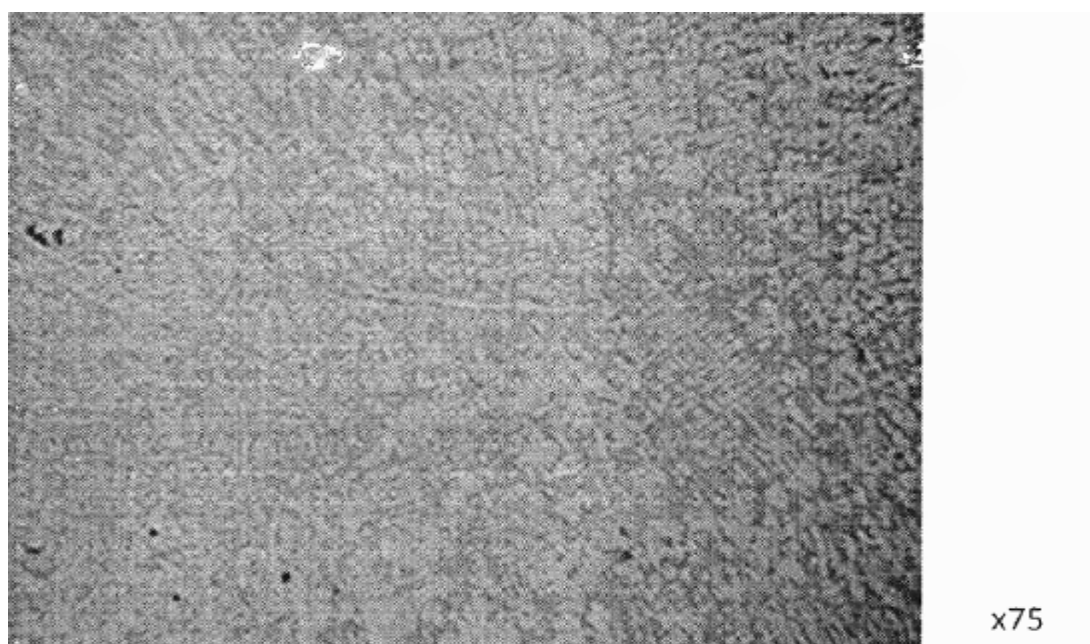


Рис. 2.44 - Структура перехідних шарів біметалевої пари «алюмінієвий сплав - алюмінієвий сплав»

Експерименти показали, що товщина і структура перехідних шарів між різними біметалевими парами забезпечує надійне їх з'єднання.

Таким чином, лазерно-ливарний метод отримання біметалічних матеріалів цілком можливий для реалізації технологічно і забезпечує

надійне з'єднання між шарами матеріалів, що входять до складу різних біметалів. Отже, це дозволяє після подальшої його конструкторської доробки впроваджувати у виробництво біметалів.

3. РОЗРОБКА МЕХАНО-ЛИВАРНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ З ЛАЗЕРНОЮ ПІДГОТОВКОЮ ПОВЕРХНІ ОСНОВИ

3.1. Механо - ливарний спосіб виготовлення біметалів

Теоретичне та експериментальне вивчення процесу отримання біметалів лазерно-ливарним способом по розробленій і дослідженій схемі показало цілковиту можливість реалізації такої технології для забезпечення надійного з'єднання між шарами біметалів. На сьогодні такий спосіб дозволяє економічно ефективно виготовляти за один прохід біметалеві листи обмеженої ширини до (50-100 мм). Для збільшення ефективності цього процесу і розширення меж його застосування потрібна розробка системи фокусування потужного лазерного випромінювання у відрізок лінії з розподілом інтенсивності типу “Top Hat”, довжина якого може змінюватись в більш широкому діапазоні значень. З метою удосконалення запропонованих способів виготовлення біметалів, пропонується процес, що дозволяє отримувати шар сплавлення складових, товщина і властивості якого забезпечують високу міцність їх зчеплення та унеможлиблює його розшарування в процесі експлуатації при високій продуктивності і раціональній собівартості.

Сутність цього процесу полягає в тому, що на поверхні однієї із складових біметалу за допомогою лазерної або механічної обробки формується регулярний макрорельєф у вигляді рівномірно розташованих з певним кроком по двом координатам виступів. При цьому форма виступів, їх поперечні розміри і висота вибираються із умов максимального запирання тепла у вершин виступів при одночасному нагріванні всіх їх поверхонь розплавом конструктивної складової. Найбільш ефективною формою поздовжнього перерізу виступів з цієї точки зору є перевернута

трапеція. Але виготовлення таких виступів значно впливає на продуктивність і собівартість виробництва біметалу. Тому, як найбільш раціональною, прийнята прямокутна форма перерізу виступів, які мають певну висоту і крок розташування по поверхні. Підготовлені таким чином заготовки встановлюються у виливницю і на їх поверхні із лотка через спеціальні жолоби з певною витратою подається розплав конструктивної складової біметалу. Розплавлений метал перегрівають по відношенню до температури плавлення функціональної складової біметалу.

3.2. Особливості фазових переходів при взаємодії розплаву з твердим матеріалом функціональної складової біметалу

Для з'ясування особливостей фазових переходів при взаємодії розплаву однієї із складових біметалу з твердим матеріалом другої функціональної складової біметалу потрібно проаналізувати динаміку руху фронту затвердження.

У зв'язку з цим, перед виконанням експериментальних досліджень проводилось моделювання розподілу температур в зоні сплавлення складових біметалу на різних етапах її утворення. При цьому досліджувались особливості змін положення і форми міжфазної границі в часі у залежності від температури.

Моделювався фазовий перехід на межі рідинної і твердої складових біметалу за допомогою методу рухомої границі відповідно до задачі Стефана в програмному пакеті «Comsol Multiphysics» v.5.5. Даний процес адаптований у відповідності із оригінальними дослідженнями в [13,14].

Об'єктом моделювання була двомірна квадратна площа, що містить область твердої речовини знизу із заданими параметрами теплофізичних властивостей нікелевого сплаву із нанесеною фактурою, і область розплаву зверху із параметрами вуглецевої сталі Ст.3, які мають різницю в температурах на зовнішніх границях області визначення. Рідка та тверда

фаза розв'язуються окремими областями, яка розділяється між собою рухомим фронтом розплаву (рисунок 3.1). Положення цієї межі в часі обчислюється відповідно до умови балансу енергії Стефана. У таблиці 3.1 наведені фізичні властивості двох матеріалів, які використовуються в даному моделюванні.

Для розрахунку положення міжфазної границі використовувався інтерфейс Deform Geometry, так як в даній задачі геометрія областей з твердою і рідкою фазами формується внаслідок фазового переходу, за рахунок зміни кількості речовини в кожній із фаз.

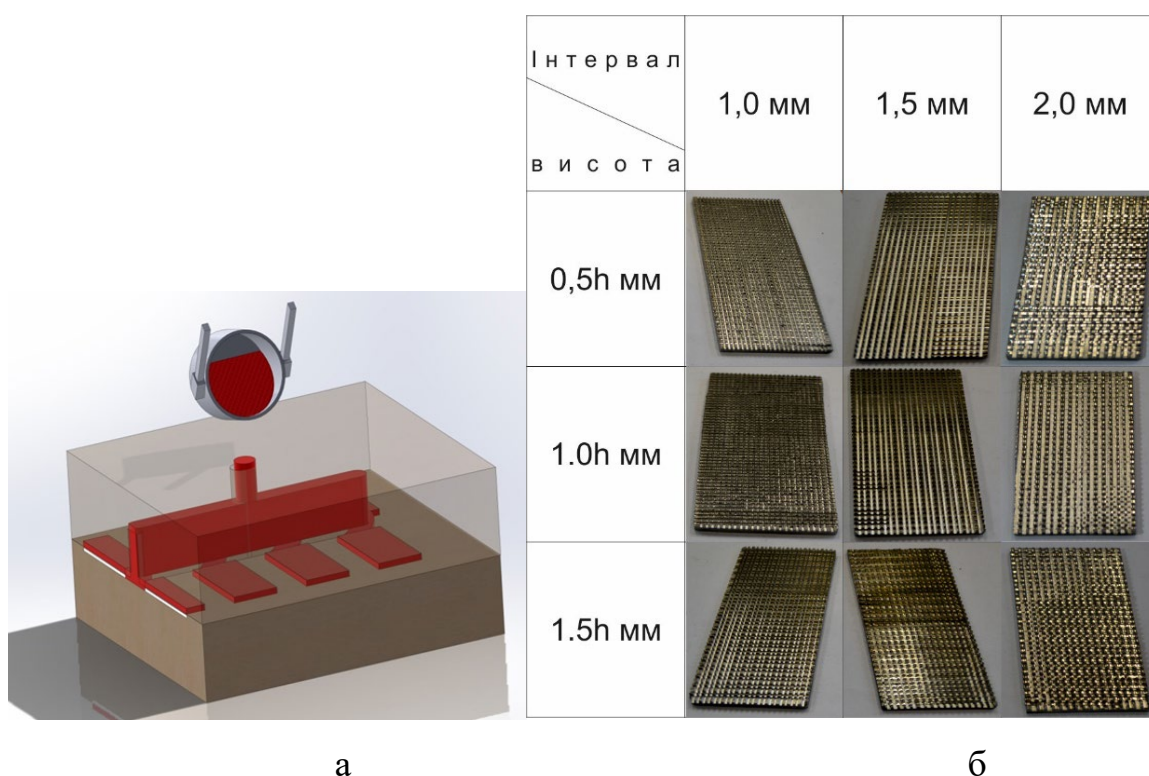


Рис. 3.1 - Схема заливки конструктивної складової біметалу (а) на поверхню його функціональної складової з регулярним макрорельєфом, що має різну висоту (h) і різний інтервал розташування – 1,0мм; 1,5мм і 2,0 мм (б).

Для опису залежності густини рідини від температури доцільно скористатись лінійним наближенням Буссінеска (3.1):

$$r(T) = r_0 (1 - aDT), \quad (3.1)$$

де α – коефіцієнт об'ємного розширення, $\Delta T = T - T_0$ – відхилення температури від рівноважного стану, ρ_0 - густина рідини розплаву при деякій рівноважній температурі T_0 . Оскільки α і відхилення температури зазвичай відносно невеликі, то лінійне наближення володіє прийнятною точністю в більшості досліджуваних задач.

Швидкість границі розділу фаз можна визначити, як відношення густини теплового потоку на границі до питомої теплоти фазового переходу, що виходить із умови сумісності чи умови Стефана (3.2):

$$v_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_{im}}{\Delta H_{1 \rightarrow 2}}, \quad (3.2)$$

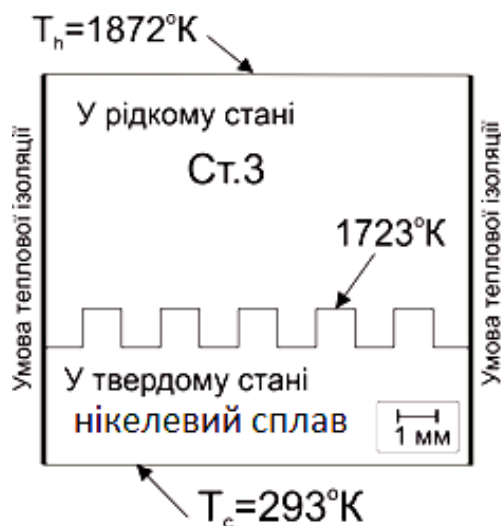
де $v_{1 \rightarrow 2}$ - швидкість границі розділу фаз (м/с), q_{im} - густина теплового потоку Вт/м², $\Delta H_{1 \rightarrow 2}$ - прихована теплота плавлення нікелевого сплаву, яка в даному випадку становить 305 кДж/кг.

У розплаві передбачається рух, що утворюється внаслідок природної конвекції за рахунок градієнту температур. Цей рух, у свою чергу, впливає на переміщення фронту між рідкою та твердою фазами.

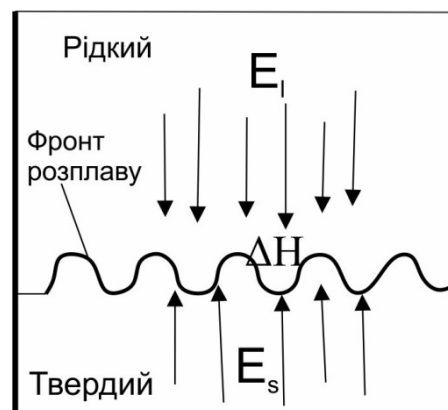
Задача розв'язувалась у двомірній області. Ця область, що наведена на рисунку.3а, представляє собою квадрат з довжиною сторони 10мм, заповнений відповідно двома матеріалами.

Таблиця 3.1 Фізичні властивості матеріалів, що використовувались при моделюванні.

Назва	Значення	Опис
k_ Cs	90 [W/(m*K)]	Теплопровідність Ст.3
k_ Ns	106 [W/(m*K)]	Теплопровідність нікелевого сплаву
Cr_ Cs	460.6 [J/(kg*K)]	Питома теплоємність Ст.3
Cr_ Ns	502 [J/(kg*K)]	Питома теплоємність нікелевого сплаву
alpha_ Cs	$7.2 \cdot 10^{-6}$ [1/K]	Коефіцієнт теплового розширення Ст.3
alpha_ Ns	$12 \cdot 10^{-6}$ [1/K]	Теплопровідність нікелевого сплаву
nu_ Cs	$8 \cdot 10^{-7}$ [m ² /s]	Кінематична в'язкість Ст.3
nu_ Ns	$9 \cdot 10^{-7}$ [m ² /s]	Теплопровідність нікелевого сплаву
rho_ Cs	7190 [kg/m ³]	Густина Ст.3
rho_ Ns	8800 [kg/m ³]	Густина нікелевого сплаву
DelH	305,4[kJ/kg]	Прихована теплота плавлення
Tf	1728[K]	Температура плавлення нікелевого сплаву
Th	1873[K]	Температура гарячої стінки
Tc	573[K]	Температура холодної стінки
p_ref	100[Pa]	Тиск



а



б

Рис. 3.2 - Геометрія і граничні умови на межі та теплові потоки навколо неї на момент початку дії розплаву

Температура верхньої і нижньої границі області підтримуються на рівні $T_h=1872$ °К та $T_c=293$ °К відповідно. Бокові границі області теплоізовані. Початковий розподіл температур змінюється лінійно у вертикальному напрямку, як показано на рис.3 - від гарячої до холодної границі - зверху вниз.

$$T_h - X_g / 0.1[m] * (T_h - T_c), \quad (3.3)$$

Початкова форма фронту плавлення - це криволінійна лінія, яка повторює геометрію виступів і розташована на відстані 4 мм від нижньої границі, де температура 1740 °К. Частина матеріалу у рідкій фазі описується рівнянням Нав'є-Стокса в наближенні Буссінеска (3.1), описані в модулях *Gravity* і *The Boussinesq Approximation sections* [15]. $T_{ref} = T_f$, T_{ref} - температура на границі двох середових, T_f - температура плавлення підкладки з нікелевого сплаву.

Основна ідея наближення полягає в особливості врахуванням залежності густини від температури. Зміна густини в замкнутому середовищі може приводити до істотної зміни тиску в розрахунковій області, що негативно позначиться на точності розрахунку. З цієї ж причини в задачах конвекції нестисливої рідини доцільно відмовитися від врахування гідростатичної складової там, де це можливо.

По мірі плавлення, рух фронту міжфазної границі прямує в сторону твердого металу. Енергетичний баланс на цьому фронті описується рівнянням:

$$\rho_0 \Delta H v \cdot n = (E_l - E_s) \cdot n, \quad (3.4)$$

де n - вектор нормалі до фронту, E_l і E_s - теплові потоки, які надходять з рідкої та твердої фаз (Вт/м²) (рисунк 3.2б).

Вираз $(E_l - E_s) \cdot n$, залучений в рівнянні 4, більш точно оцінений через множник Лагранжа для температури, T_{lm} . Ця змінна доступна, коли в

розрахунковій області COMSOL Multiphysics включений Weak Constraint, як у випадку з фіксованими обмеженнями температури на передньому фронті плавлення.

Для побудови сітки і отримання більш точного вирішення поставленого завдання було вибрано алгоритм її адаптації (рисуюнок 3.3).

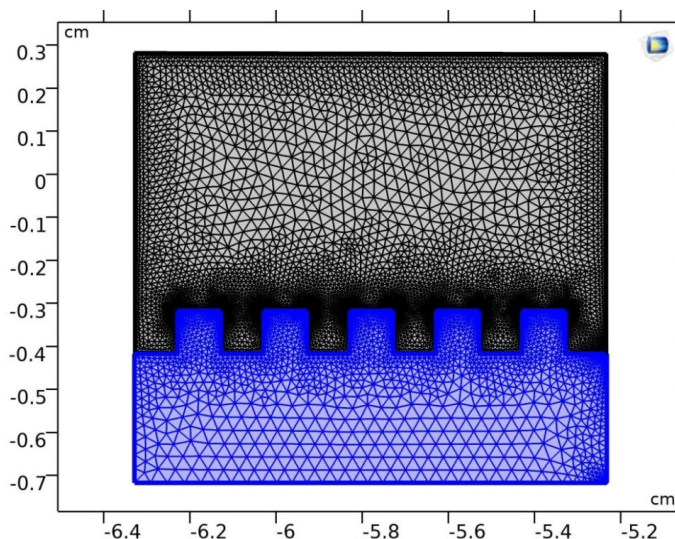


Рис. 3.3 - Адаптивна сітка на межі фазових перетворень

Температура в зоні виступів знаходиться в межах 1740-1750°K. З 12 с по 20 с процес дещо уповільнюється, границя відносно початкової температури починає рухатися повільно з швидкістю 1-1,5 м/с. На 30 с моделювання фронт плавлення більше не переміщується, оскільки досягнуто баланс між верхніми і нижніми суміжними потоками. Усталена границя фронту знаходиться на відстані 4,5 мм від нижньої границі розрахункової області.

Для управління рухом фронту плавлення необхідна деформація сітки. Під час такого перетворення певна кількість твердої фази речовина зменшується, а відповідна кількість рідкого металу збільшується. Інструментом для деформації сітки, без відображення будь-яких ефектів розширення або стиснення у властивостях матеріалу, є налаштування модулю (Deformed Geometry) [16].

На рисунках 5 і 6 показана еволюція поля температури і геометрії міжфазної границі при взаємодії двох рідкої та твердої фаз компонентів досліджуваної області у різні моменти часу. Починаючи з 4 секунди температура на поверхні виступів перевищує температури плавлення твердого компоненту (1728°K) і відбувається активна деградація профілю виступів, яка триває до 12 с.

На рисунку 3.7 показано розподіл швидкості поля температури в рідкій області в різні моменти часу, а відповідний профіль температури для нього представлено на рисунках 3.5, 3.6. Наведене свідчить тому, що вже на початку процесу ($t = 1-4$ с) швидкість плавлення має досить високу величину. Це відбувається головним чином через велику різницю температур, яка існує на початку процесу. Пізніше, на 12 с, швидкість плавлення сповільнюється через усталеність міжфазної границі і теплового поля, поки вона не падає на 30 с майже до нуля через те, що система досягає стаціонарного стану.

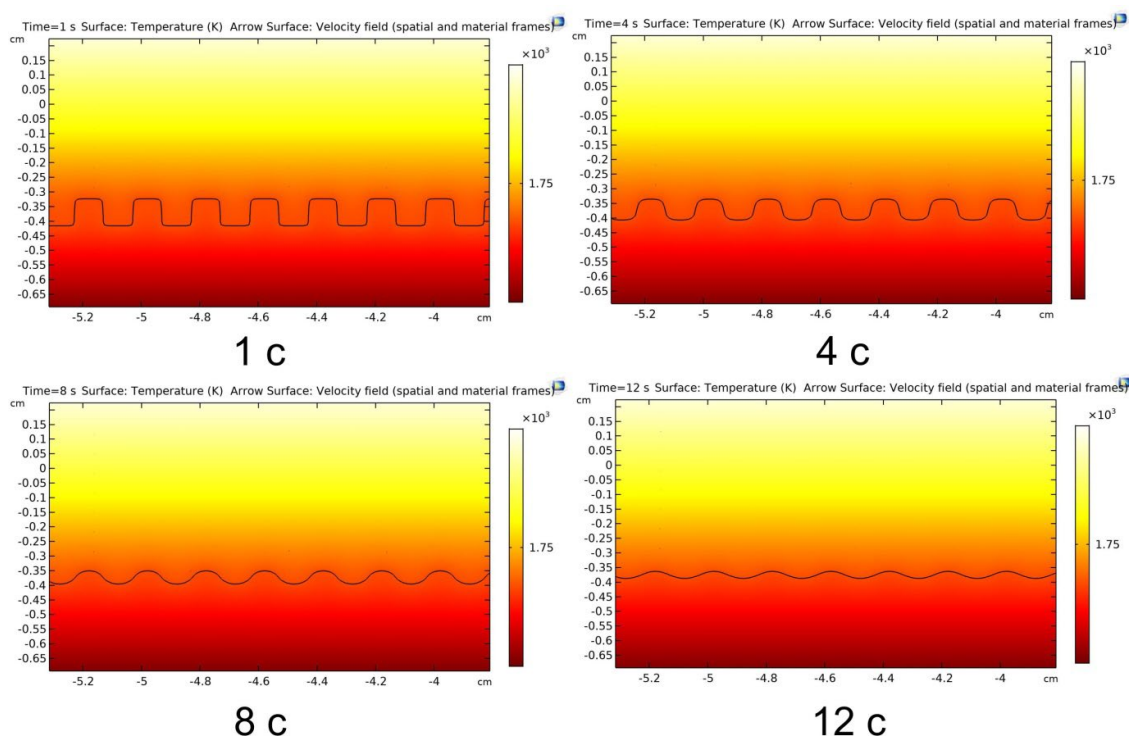


Рис. 3.5 - Зміна температурного поля і межі фаз середовищ в різні проміжки часу

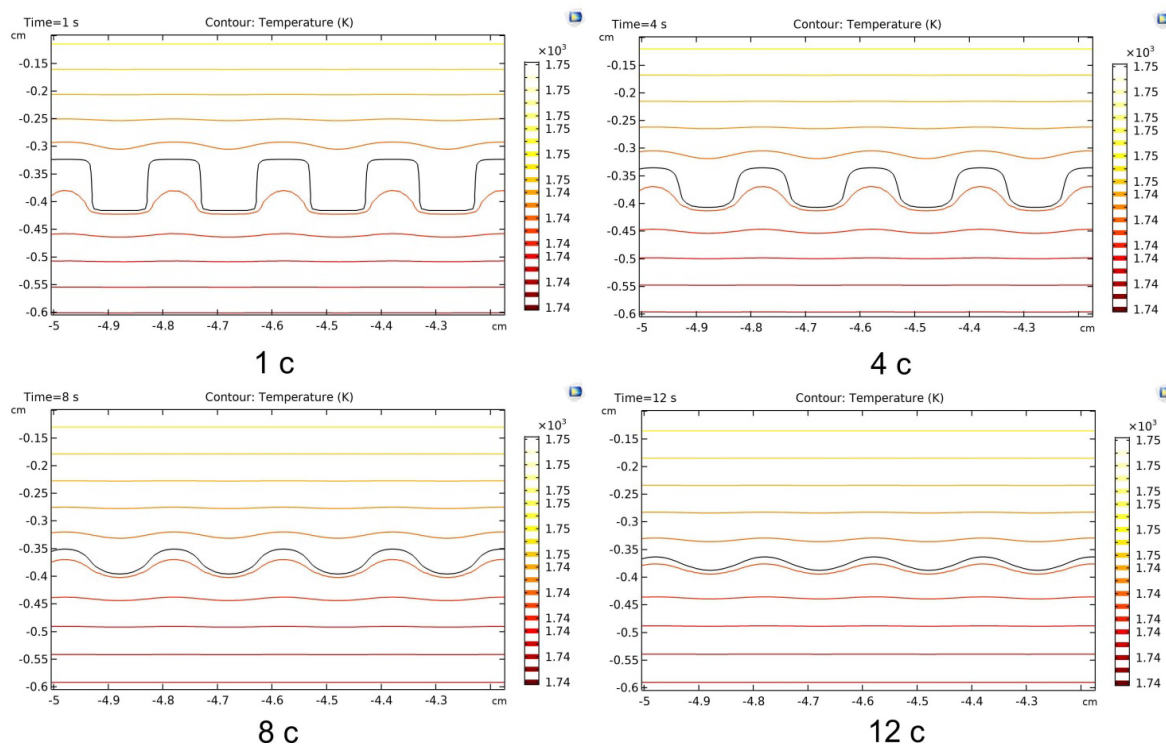


Рис. 3.6 - Температурні контури теплових потоків та межа фаз в області розрахунку в різні моменти часу

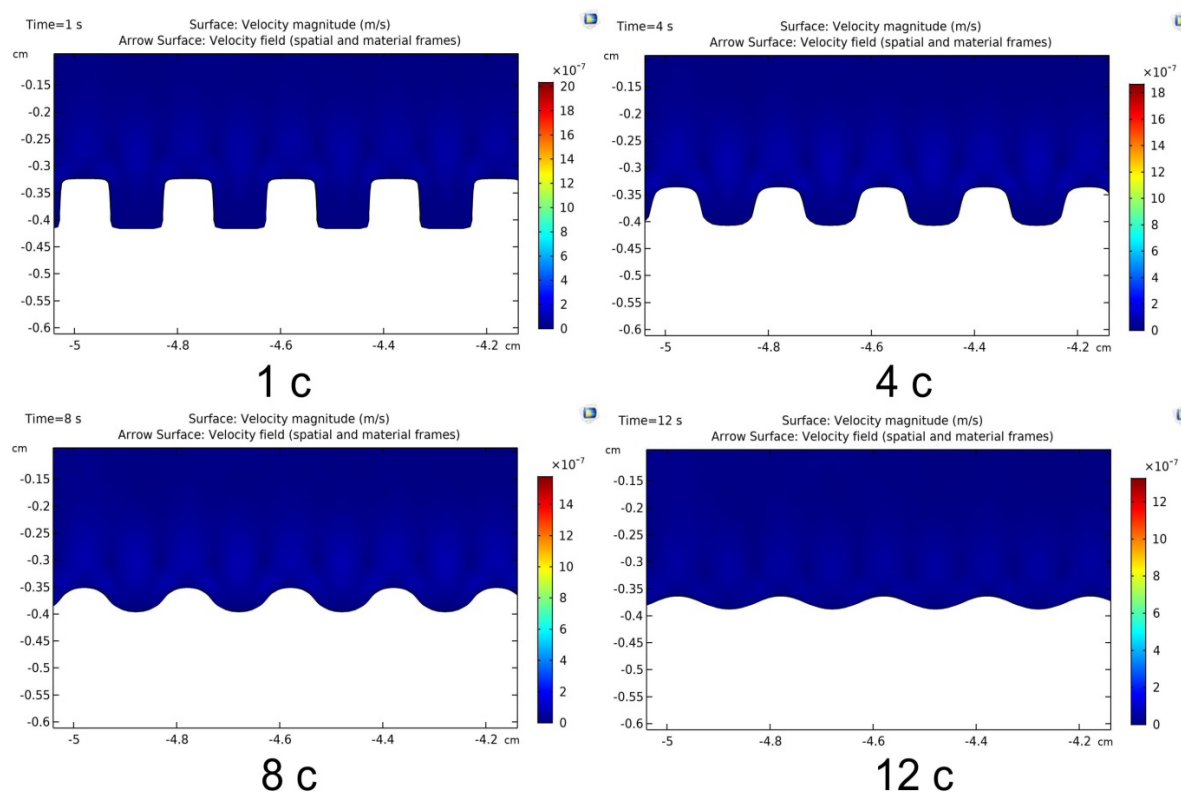


Рис. 3.7 - Вигляд швидкості теплового потоку біля границі розподілу фаз в області визначення

Піки величини швидкості теплового потоку біля границі розподілу фаз зображуються світлішими зонами над виступами. При цьому в западинах виступів швидкість руху спрямована в протилежному напрямку один до одного. Це обумовлює утворення зони із мінімальною швидкістю руху, яку можна спостерігати у відповідній частині на рисунку 3.7.

Також можна відзначити, що з 4-7 с швидкість границі вирівнюється і починає відповідати швидкості у верхній частині zdeформованих виступів, що пов'язано з рухом міжфазної границі бокових стінок виступів.

Крім того, добре відомо [17], що в разі затвердіння всередині замкнутої порожнини плавуча конвекція стає ключовим фактором при визначенні форми фронту розплаву і поля течії в області рідини. Таку поведінку фронту розплаву чітко відображено на показаних рисунках. Спочатку фронт розплаву приймає плоску геометрію, але з часом він пристосовується до криволінійної геометрії під впливом плавучої конвекції. Адаптована модель передбачає еволюцію фронту міжфазної границі поля швидкості і температури затвердіння вилівка біметалу нікелевий сплав - сталь Ст.3.

3.3. Мікроструктура і властивості біметалів, отриманих механо-ливарним способом

Серед багатьох факторів, які визначають кінцеву структуру і властивості біметалів, найбільш значними є температура нагріву розплаву, що заливається, інтервали між виступами фактури, форма виступів, теплофізичні характеристики матеріалів що взаємодіють в твердій-рідкій фазі, швидкості охолодження внаслідок тепловідводу, а також атмосфера в якому здійснюється процес. Особливості впливу вказаних технологічних параметрів на характеристики отримуваних біметалевих матеріалів мало описані в роботах вітчизняних та зарубіжних дослідників.

Аналіз біметалевих композитів «нікелевий сплав-сталь Ст.3», отриманих з використанням лазерно-ливарних процесів, виконаних в рамках науково-дослідної роботи №2028п «Розробка високопродуктивного процесу виготовлення біметалевих матеріалів різного призначення та відповідного технологічного обладнання».

Зокрема, описані результати металографічних досліджень перехідних зон з'єднання нікелевого сплаву з розплавом сталі Ст3, оцінений вплив характеристики регулярного мікрорельєфу на поверхні функціональної складової і енерговплив при взаємодії з розплавом конструктивної складової на вихідну структуру готового композиту. В той же час в багатьох виконаних на сьогоднішній день роботах глибоке структурне дослідження багатошарових металевих композитів «нікелевий сплав-вуглецева сталь» не проводилась.

В даному розділі особлива увага приділялася дослідженням мікроструктури на межі з'єднання функціональної та конструктивної складової з використанням методів світлової мікроскопії, растрової (скануючої) електронної мікроскопії, а також вивчення процесу формування біметалевих композитів шляхом математичного моделювання в програмному комплексі Comsol Multiphysics 5.5 з використанням методів рухомих границь. Сукупність отриманих даних дозволяє скласти більш детальну картину комбінованого механо-ливарного процесу.

Після попередніх механічних випробувань були виявленні зразки, які розшаровувались і їх було відбраковано. У решти зразків спостерігалось затікання і охоплення виступів нанесеної структури розплавом. Місцями розплав вуглецевої сталі тільки охоплював виступи і не повністю затікав у проміжки між ними. Чим на більшій відстані від ливника знаходився зразок, тим виникала більша нерівномірність розподілення зон контакту розплаву з його регулярними виступами. Це обумовлено різницею в силах поверхневого натягу розплаву, величини яких залежать від його

температури, яка внаслідок високого тепловідведення була недостатньою, щоб відбулось його затікання у проміжки між виступами.

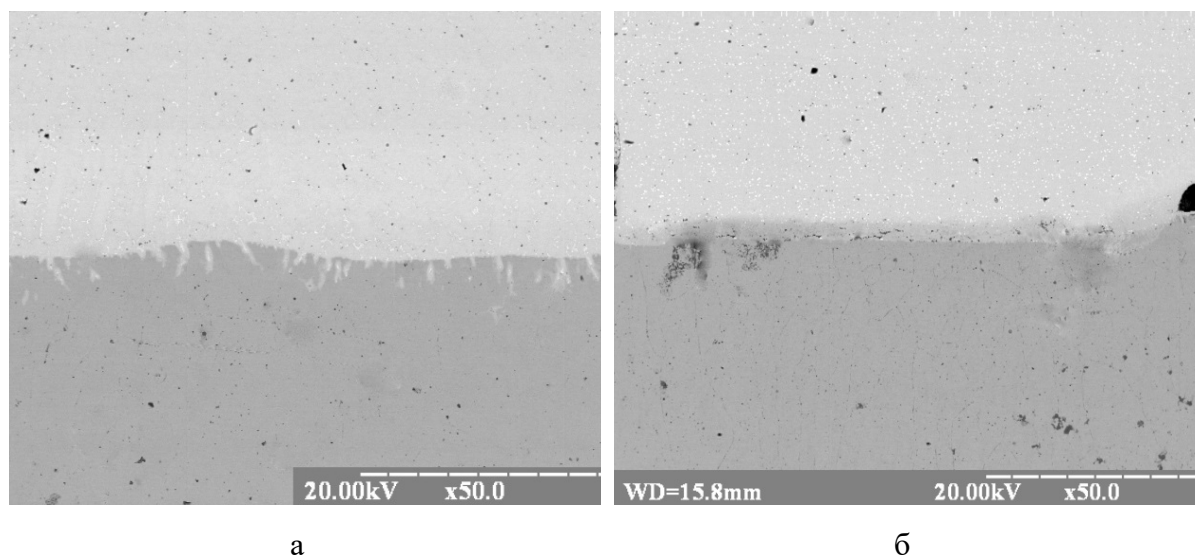


Рис. 3.8 – Зона з'єднання нікелевого сплаву H60BT+Mo і вуглецевої сталі Ст3:

а - зразка $b \times h = (1 \times 0,5)$, б - зразка $b \times h = (2 \times 1,5)$

Мікрофотографії зони з'єднання зливків «нікелевий сплав H60BT+Mo-сталь Ст3» свідчить про те, що в результаті взаємодії розплаву маловуглецевої сталі з підготовленою поверхнею функціональної складової утворюються хвилеподібна зона з'єднання (рисунок 3.8), яка відповідає дифузійному характеру. Фронт дифузії рухається в напрямку маловуглецевої сталі та охоплює два матеріали.

На рисунку 3.9 показані мікроструктури границі з'єднання і прилежних шарів функціонального і конструкційного матеріалів біметалу, отримані з використанням пластин функціонального складу з різними параметрами регулярного макререльєфу.

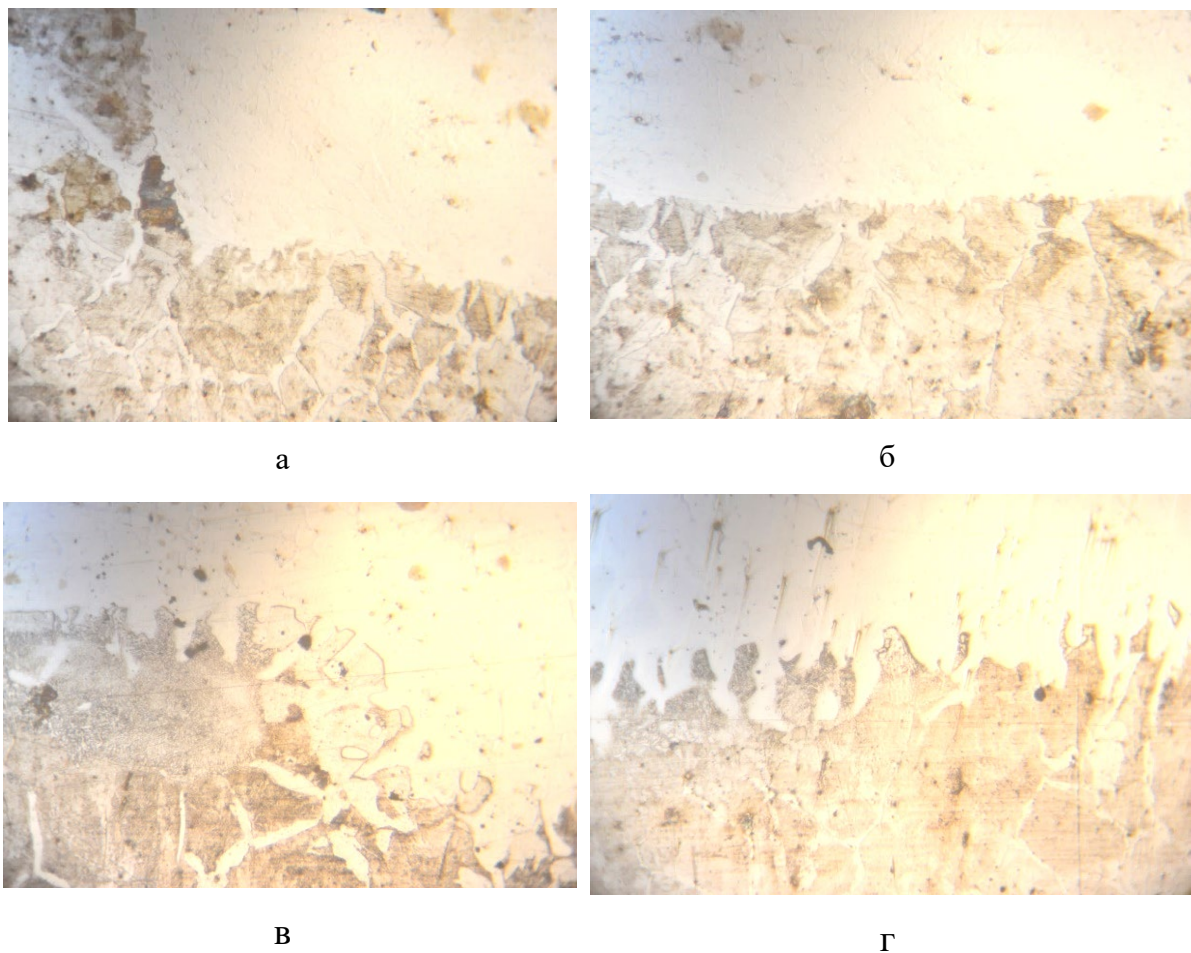


Рис. 3.9 – Мікроструктури границі з'єднання зразків біметалів з різними параметрами нанесених макроструктур $b \cdot h : a$ – (2,0x1,5); б- (1,5x1,0); в – (1,5x1,5); г – (1,5x0,5), при збільшенні 200х

Значний інтерес представляють зони сплавлення складових біметалу, що мали місце тільки в 20-30% від загальної кількості зон їх контакту і які забезпечують металургійний зв'язок між ними (рисунок 3.10). Границя з'єднання (рисунок 3.10) зразка $b \cdot h : (2,0 \times 1,5)$ мм виглядає як полоса з незначними розмитими краями, що ймовірно пов'язано із взаємним проникненням легуючих елементів із одного шару в інший, товщиною 70-115мкм, який розділяє конструкційний та функціональний шар.

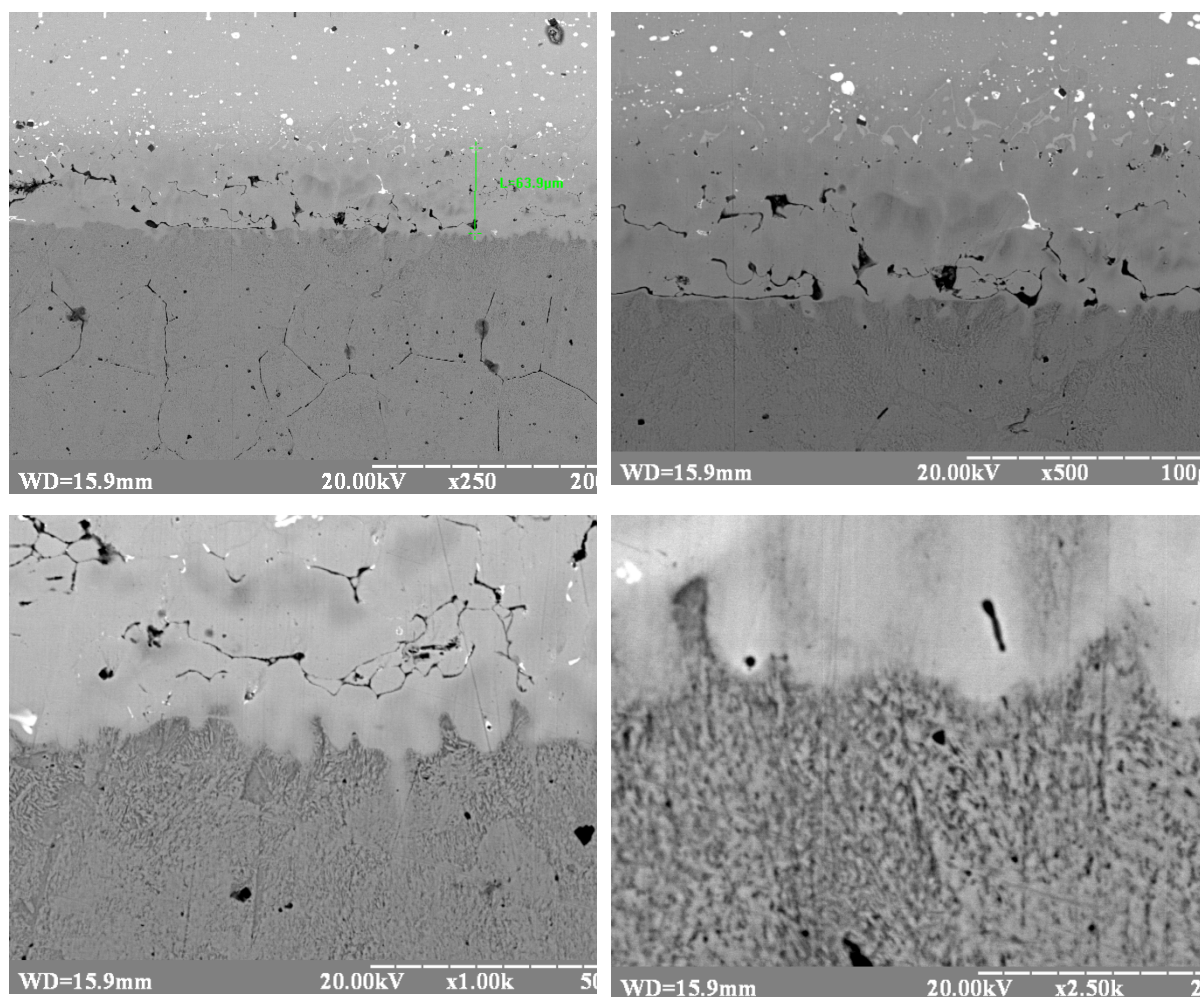


Рис. 3.10 - Фотографії мікροструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (2 \times 1,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 1,5мм і кроком 2,0 мм при збільшеннях: 250х, 500х, 1000х, 2500х

Більш детальний аналіз зон контакту розплаву з поверхнями заглиблень у нікелевому сплаві виявив у 60-70% наявність між ними ділянок з щільним механічним контактом і обумовленої цим, адгезії (рисунок 3.11а). Невелику частину рівномірно розташованих вздовж зони контакту (1 %) становлять порожнини.

В той же час при недостатній температурі та не відповідності нанесеному рельєфі при взаємодії з розплавом конструктивної складової, утворюються зубці, які служать концентраторами напружень, і з яких починається відшаровування складових (рисунок 3.11а). З цих же причин можна пояснити і появу світлих смуг зі сторони сталі Ст3 довжиною до 250

мкм, а саме за рахунок дифузії легуючих елементів із нікелевого сплаву, утворюються структури, які погано протравлюються.

Очевидно, що такий рельєф (рисунок 3.11б) границі з'єднання повинен добавляти біметалу високий опір при відриві та зрізу, але, маючи концентратори напружень і підвищену мікротвердість, на етапі охолодження утворюються мікротріщини та відшаровування.

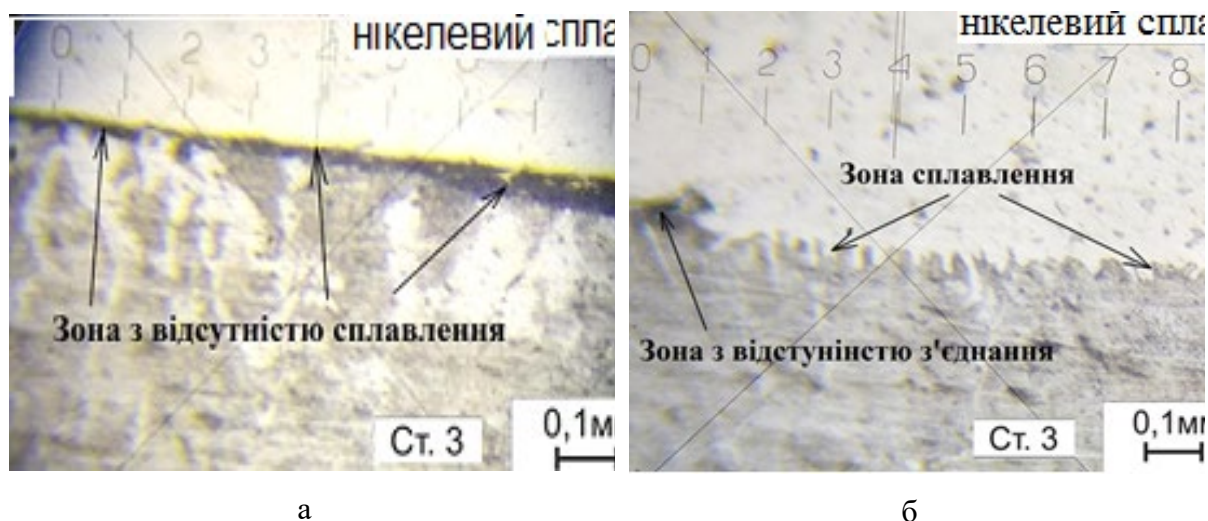


Рис. 3.11 – Мікроструктури зони з'єднання зразка $b \times h = (2 \times 1,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, де спостерігаються дефекти у вигляді пор та розшарувань внаслідок напружень, які виникають на етапі охолодження

При розгляді зразків біметалів із регулярним рельєфом $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм (рисунок 3.12), границя з'єднання представляє собою хвилясту область із непротравленими світлими смугами, які заходять в сталь Ст3 внаслідок дифузійних процесів, ширина знаходиться 160 мкм, є області де зростає до 320 мкм, найширше ніж при інших параметрах мікрорельєфу. Очевидно, це зв'язано з тим, що її формування відбувається, коли метал конструктивної складової зі сталі Ст3 знаходиться в розплавленому стані найдовше, що в свою чергу приводить до більш інтенсивного перемішування елементів, які входять в склад обох шарів біметалу.

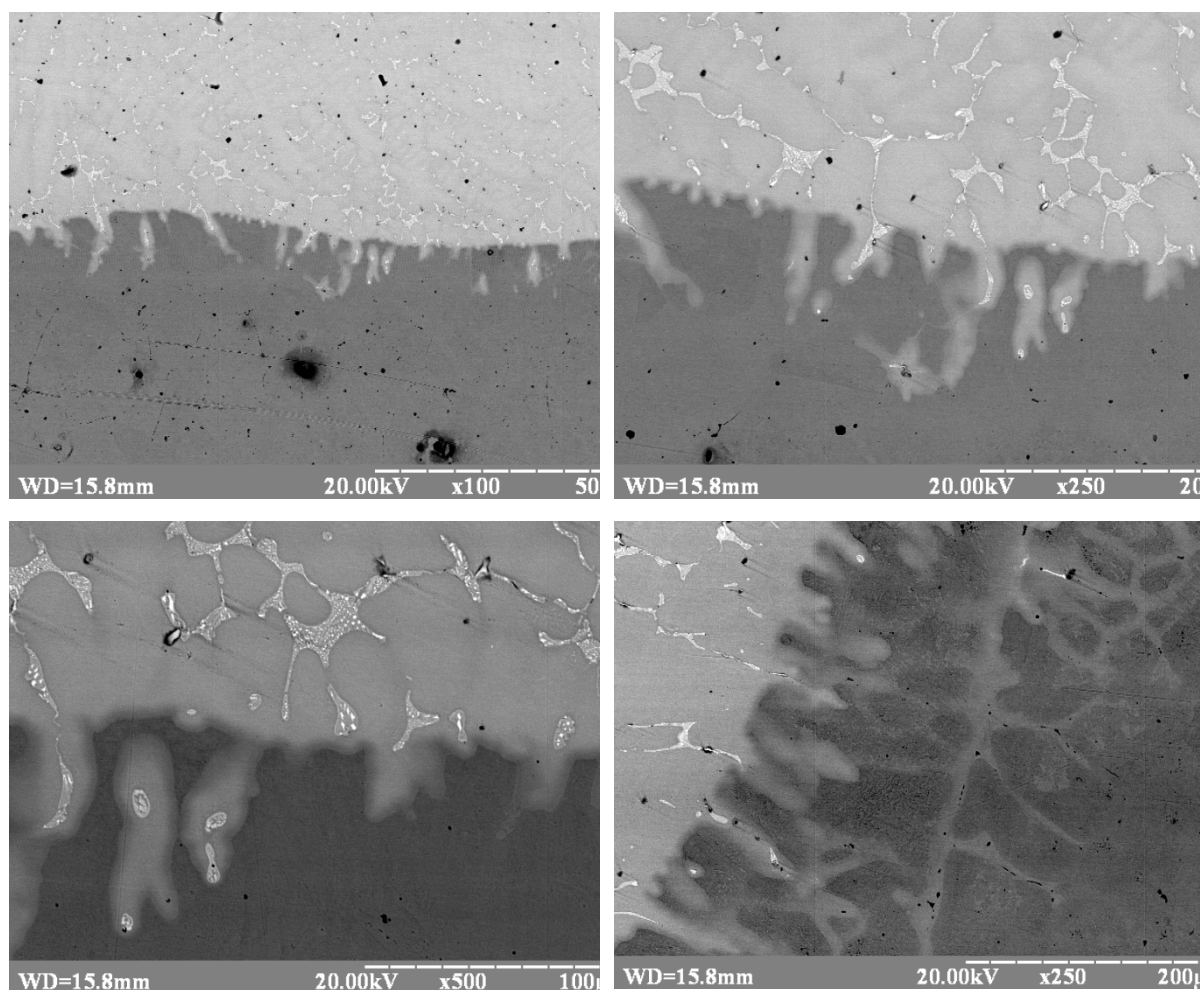


Рис. 3.12 - Фотографії мікроструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 0,5мм і кроком 1,5 мм при збільшеннях: 100х, 250х, 500х, 250х

При розгляді будови зони сплавлення (рисунок 3.13б) зразка $b \times h = (1,5 \times 1,0)$ можна побачити чітко виражену хвилястість подібну до процесів зварювання вибухом. Ширина зони сплавлення від 145 мкм до 230 мкм.

На окремих ділянках зони сплавлення, що не перевищує 5-7% від площі з'єднання, можна побачити мартенситну структуру, утворення якої, ймовірно, пов'язано з розлегуттям нікелевого сплаву (рисунок 3.14).

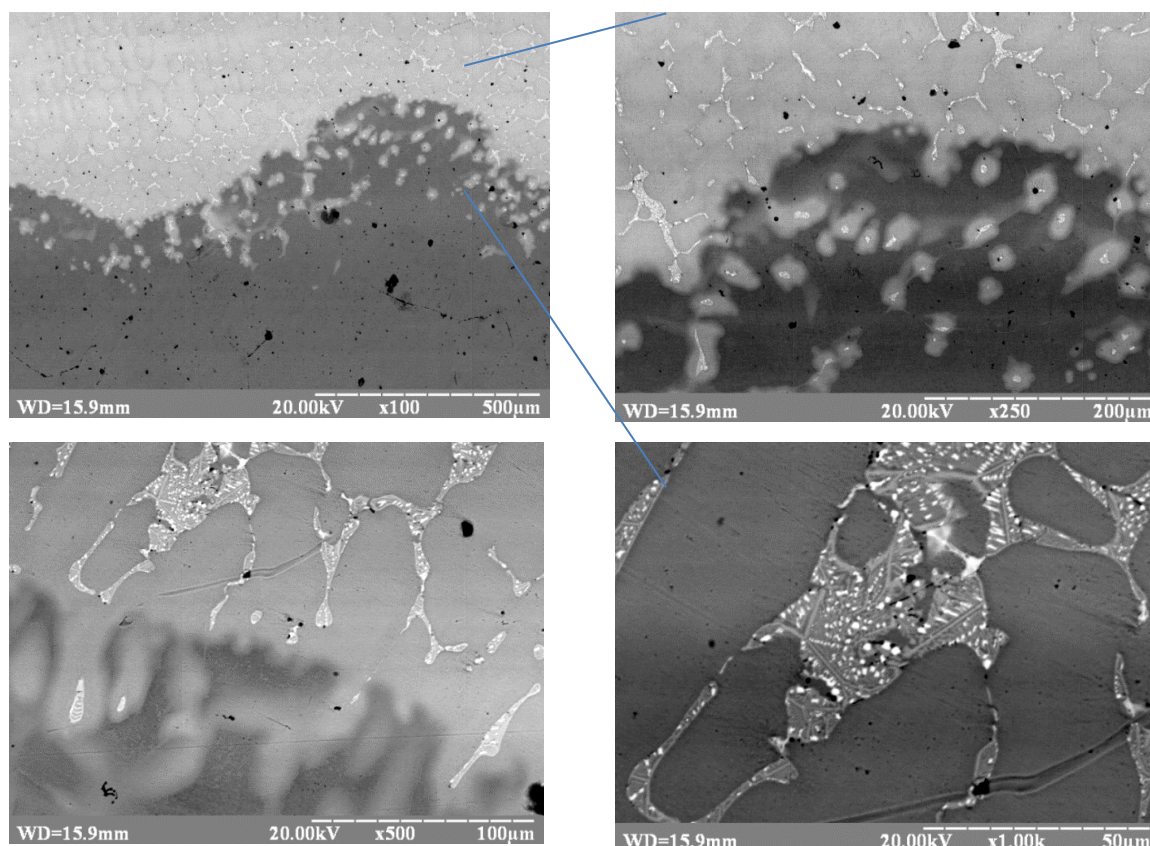


Рис. 3.13 - Фотографії мікроструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (1,5 \times 1,0)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 0,5мм і кроком 1,5 мм при збільшеннях: 100х, 250х, 500х, 1000х

На рисунку 3.15 показана лита ферито - перлітна структура нанесеної Ст3, нанесеної наплавленням на нікелевий сплав марки Н60ВТ+Мо. Добре видно дендритну будову литої сталі.

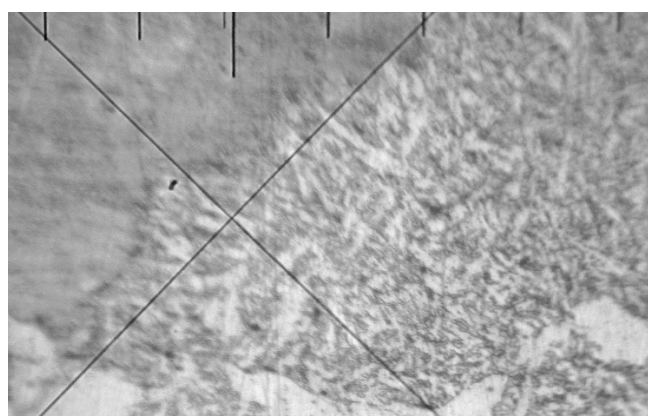


Рис. 3.14 – Утворення мартенситних структур в перехідній зоні між нікелевим сплавом та маловуглецевою сталлю виливків біметалу із топографією $b \times h = (1,5 \times 1,0)$, збільшення $\times 500$

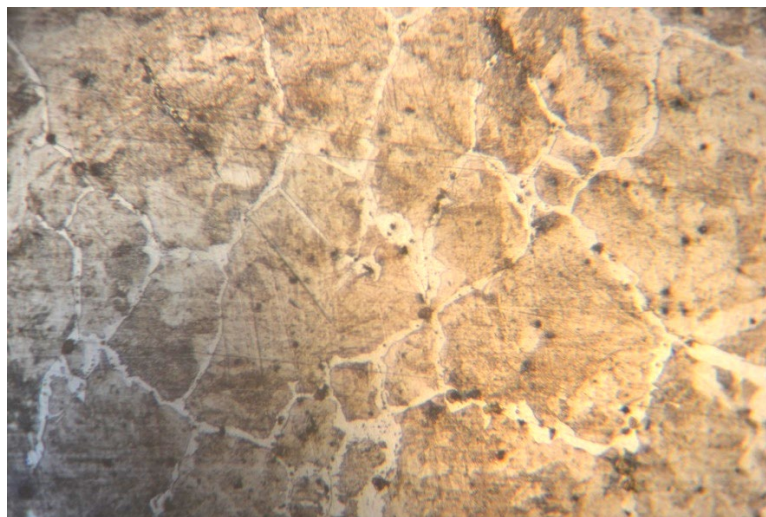


Рис. 3.16 – Будова наплавленого шару сталі Ст3 в литому стані при збільшенні $\times 200$

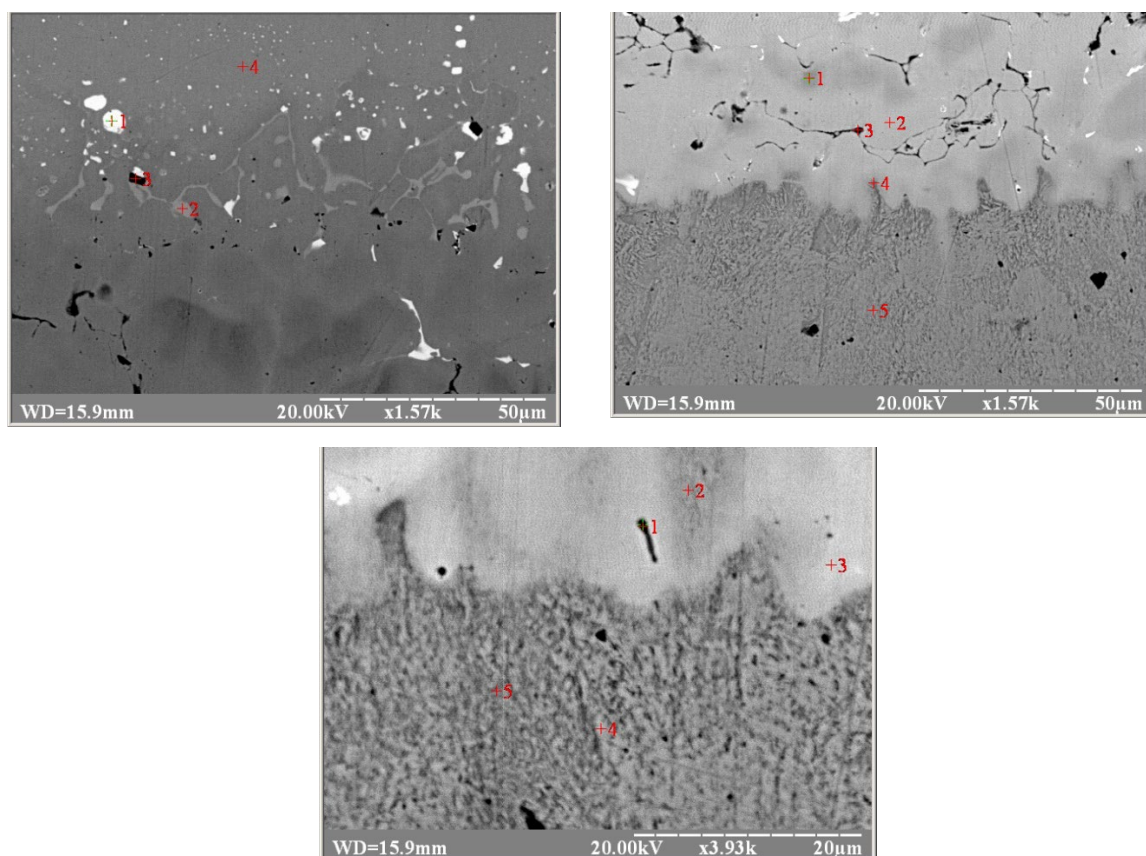


Рис. 3.17 – Структура (а,б) і зміна змісту в перехідній зоні біметалу Н60ВТ+Мо – Ст3 при збільшенні 1570х, 1570х, 3930х

Окрім оптичної металографії були проведені дослідження структури за допомогою елементного хімічного мікроаналізу з використанням

растрового (скануючого) електронного мікроскопа, обладнаного мікро- рентгено- спектральною приставкою.

На рисунку 3.17 та в таблиці 3.2 наведено вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення і в закристалізованому шарі сталі Ст.3.

Таблиця 3.2 - Вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення нікелевого сплаву і сталі Ст.3 (bхh = (2х1,5) мм).

№	Елементи, %						Шар біметалу
	S	Ti	Cr	Fe	Ni	W	
1	3.1	-	14.36	1.13	13.14	68.27	
2	1.93	-	56.63	24.28	2.98	14.18	
3	0	92.5	4.28	1.58	0.56	1.08	
4	0.81	0.41	27.9	4.16	61.04	5.67	
№	Елементи, %						Шар біметалу
	S	Ti	Cr	Fe	Ni	W	
1	0.19	0.08	0.49	96.75	2.08	0.4	
2	0.48	0.47	8.87	56.96	30.51	2.7	
3	0.19	0.64	6.94	68.83	21.5	1.9	
4	0.07	0.06	0.38	99.28	0.03	0.17	
5	0.06	0.02	0.06	99.76	0	0	

№	Елементи, %						Шар біметалу
	S	Ti	Cr	Fe	Ni	W	
1	10.36	0.15	12.84	72.6	3.61	0.43	
2	0.12	0	0.23	99.22	1.25	0.18	
3	0.36	0	4.87	78.76	14.47	1.53	
4	0	0	0	99.63	0	0.34	
5	0.19	0.03	0.1	99.55	0	0.14	

	Ti	Cr	Fe	Ni	W	Шар біметалу
1	0,08	0,49	96,75	2,08	0,40	Перехідний 2
2	0,47	8,87	56,96	30,51	2,70	Перехідний 4
3	0,64	6,94	68,83	21,50	1,9	Перехідний 3
4	0,06	0,38	99,28	0,03	0,17	Перехідний 1
5	0,02	0,06	99,76	0	0,10	Сталь Ст.3

На рисунку 3.18 наведено дифрактограму, зняту з ділянки поперечного перерізу біметалу діаметром 6 мм симетричну відносно умовної лінії з'єднання.

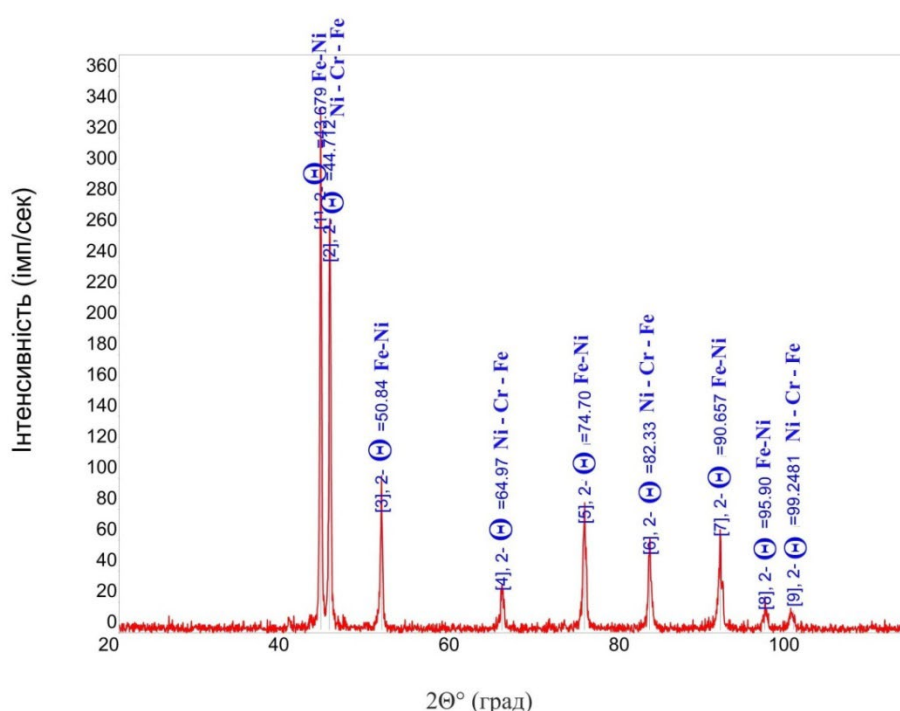
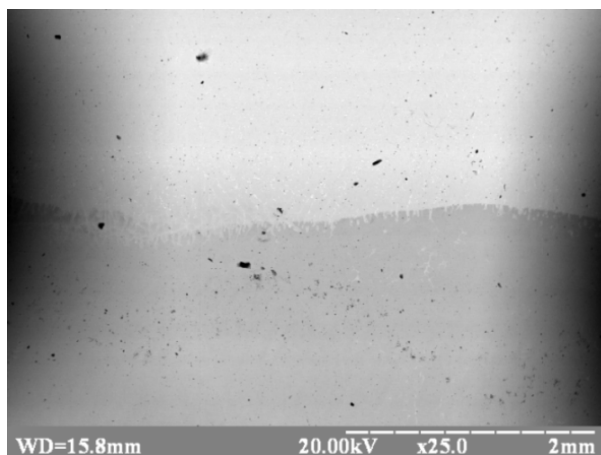


Рис. 3.18 - Дифрактограма перехідного шару біметалу «нікелевий сплав - сталь Ст.3» з макрорельєфом на поверхні сплаву $b \times h = (2 \times 1,5)$ мм

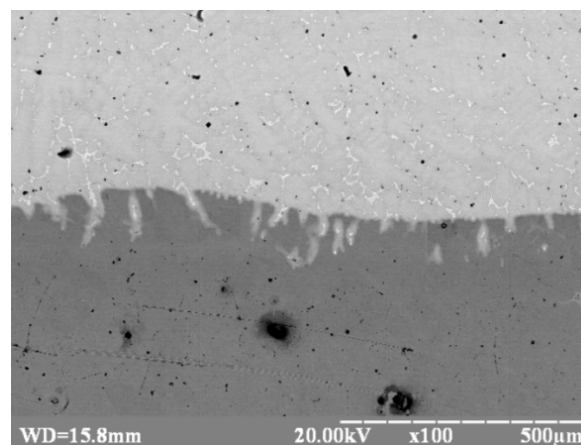
Фазовий склад визначався в зоні, в якій переважно був присутнім нікелевий сплав, при цьому частина ділянки, де відбулось сплавлення складових біметалу, становила лише 20-30%. Вміст фази Ni - Cr – Fe складає 89,1%, а фази Fe 0.507 Ni 0.493 (тетратаєніту) – 10,9%.



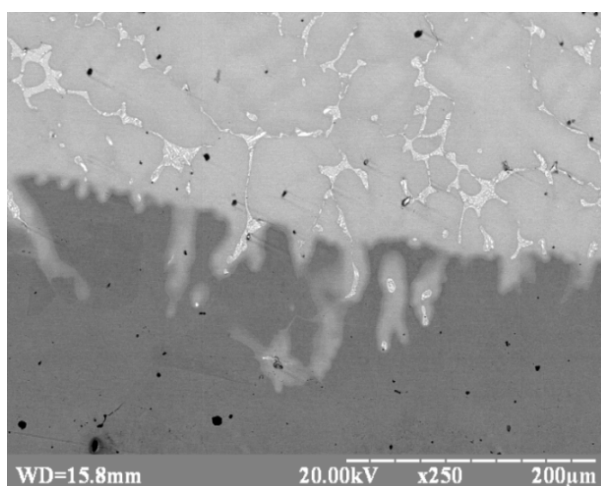
а



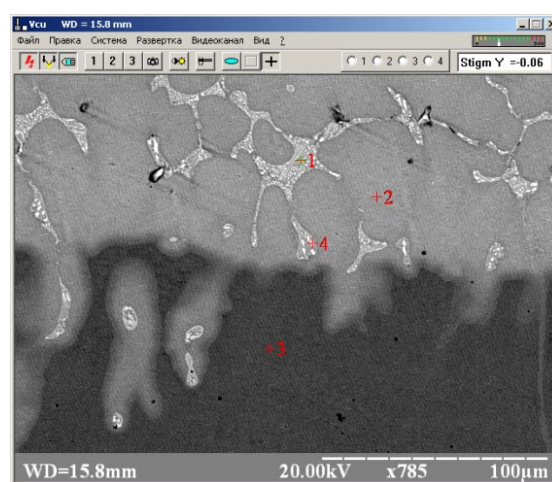
б



в



г



д

Рис. 3.19 - Фотографії шліфа поперечного перерізу зразка $b \times h = (1 \times 0,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – Ст.3, з висотою виступів 0,5 мм і кроком 1,0 мм (а) та мікроструктур зон сплавлення зі збільшенням $\times 25$ (б), $\times 100$ (в), $\times 250$ (г) і $\times 785$ (д)

Досліджувались зразки біметалів, функціональні складові яких мали інші параметри макровиступів: $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм і $(1,5 \times 1,0)$ мм.

На рисунку 3.19а представлено фотографію макроструктури шліфа зразка біметалу, функціональна складова якого мала регулярний макрорельєф, висота виступів якого становила 0,5 мм, крок між виступами - 1,5 мм.

Наведене свідчить, що виступи на функціональній складовій практично повністю розплавилась, внаслідок чого утворився розчин нікелевого сплаву у вуглецевій сталі. Границя розділу розмита і має хвилясту форму, що обумовлено геометрією виступів, які були на поверхні нікелевого сплаву до взаємодії з розплавом. На зразках з виступами, які мали більшу висоту (1 мм), хвилястість зон сплавлення має більшу амплітуду, у певній мірі відтворюючи профілі виступів.

Співвідношення площ контакту із зонами в яких мало місце металургійне з'єднання (на межі відсутня зона розділення) становить 100%.

На фотографіях мікроструктур чітко виділяються два шари. У верхній її частині розташований шар, мікроструктура якого практично не проявляється при обробці звичайними реактивами і належить вона нікелевому сплаву. Межує з ним ферито-перлітна структура вуглецевої сталі Ст.3 (рисунок 3.19 б, в, г). При збільшенні на межі зі структурою вуглецевої сталі і на окремих її ділянках проявляються скупчення зерен білого кольору і різних розмірів, які також погано піддаються травленню і містять підвищену кількість Cr, Ni і W (рисунок 3.19д, таблиця 3.3).

Значний інтерес представляють мікроструктури зон сплавлення при різних величинах збільшення, що представлені на рисунках 3.19б,в,г,д). Звертає на себе увагу наявність в світлих зонах структури ділянок білого кольору, які містять підвищену кількість Ni і W (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 - Вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм нікелевого сплаву - сталі Ст.3.

	Ti	Cr	Fe	Ni	W	Шар біметалу
1	0,89	22,62	9,29	46,46	18,16	Перехідний 2
2	0,31	22,60	11,01	60,64	4,93	Перехідний 1
3	0,0	0,12	99,36	0,19	0,21	Сталь Ст.3
4	0,63	21,26	7,35	23,45	42,99	Перехідний 3

На рисунку 3.20 наведено дифрактограму, яка, як і у попередньому випадку, знята з ділянки зразка, розташованої по центру зони з'єднання нікелевого сплаву з макрорельєфом $1,5 \times 0,5$ зі сталю Ст.3.

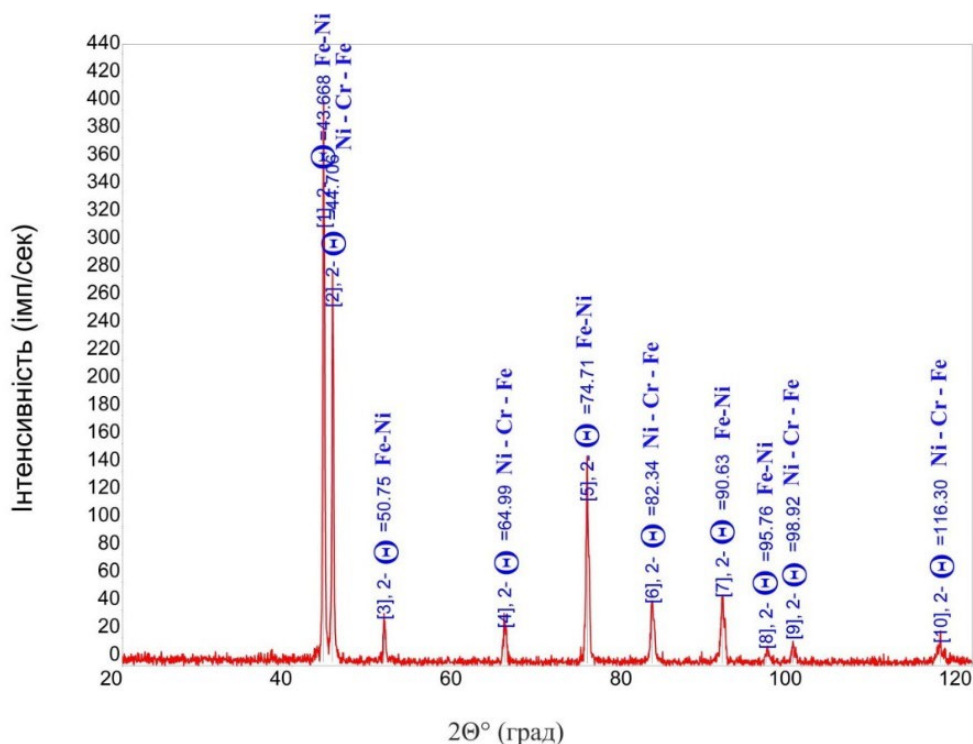


Рис. 3.20 - Дифрактограма перехідного шару біметалу «нікелевий сплав - сталь Ст.3» з макрорельєфом $(1,5 \times 0,5)$ мм на поверхні функціональної складової сплаву

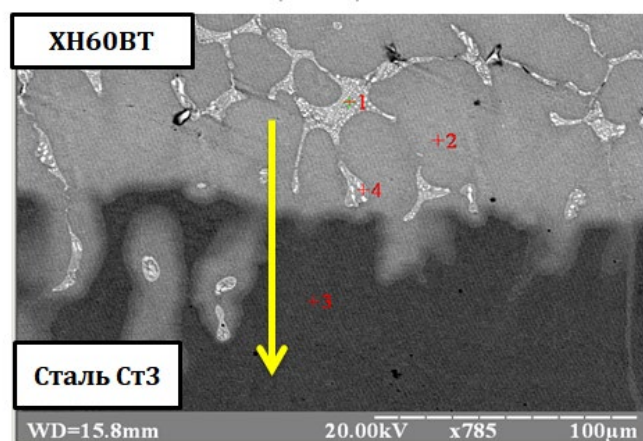
Слід відзначити, що вміст фази Ni - Cr - Fe у наплавленому шарі становить 86.4%, що обумовлено більшими розмірами і однорідністю

структури зон сплавлення. Цьому свідчить також підвищена кількість фази Fe 0.507 – Ni 0.493 (тетратаєніту) 13.6 %.

Наведені структурно-фазові зміни добре корелюють з результатами вимірюванні мікротвердості, яка в частині нікелевого сплаву, що розташована ближче до основи становить 4,5-5 ГПа, в перехідному повільно підвищується до 6,8-7 ГПа, а потім також повільно зменшується до 3 ГПа, тобто вихідної мікротвердості вуглецевої сталі.

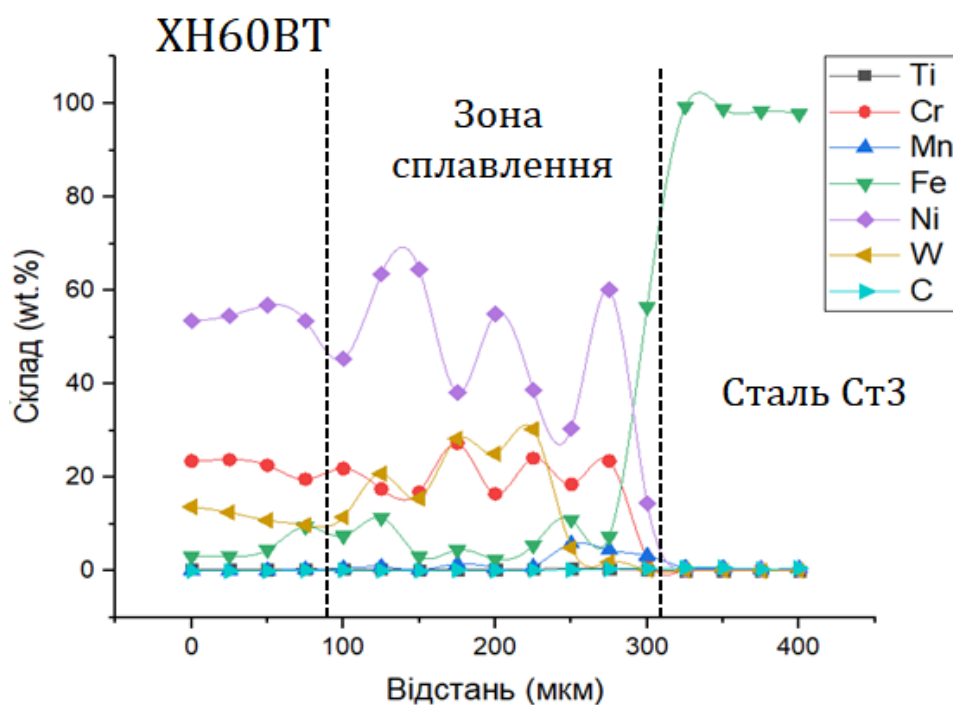
Проведений вище аналіз впливу висоти виступів на якість зони сплавлення (відсутність порожнин, тріщин, включень, різких границь між складовими структур і т. ін.) дозволяє зробити висновок, що вона повинна бути в межах (0,5-1,0) мм. Крок між виступами визначається у залежності від пріоритету (продуктивність - міцність зчеплення).

На шліфах зразків біметалів, функціональна складова яких мала макрорельєф (1,5x0,5) мм, визначалась мікроструктура (рисунок 3.21а) і розподіл хімічних елементів в перехідному шарі в напрямку перпендикулярному зоні з'єднання від поверхні до вуглецевої сталі (рисунок 3.21б). Як видно з наведених даних, в зоні з'єднання, тобто перехідному шарі, спостерігається суттєвий перерозподіл хімічних елементів, концентрація яких, за виключенням заліза, достатньо плавно зменшується в напрямку сталі Ст3, а концентрація вуглецю, навпаки зростає.



1,5x0,5h

а



б

Рисунок 3.21 - Мікроструктура (а) і розподіл хімічних елементів в перехідному шарі в напрямку перпендикулярному зоні з'єднання (б)

На рисунку 3.22 наведено макрофотографію структури і розподіл мікротвердості в напрямку перпендикулярному зоні з'єднання, визначеної при навантаженні 50г. Результати вимірювання мікротвердості свідчать, що

її значення достатньо плавно зменшуються від 5-7 ГПа в нікелевому сплаві до 4-5 ГПа в зоні сплавлення і 3-4 ГПа у вуглецевій сталі.

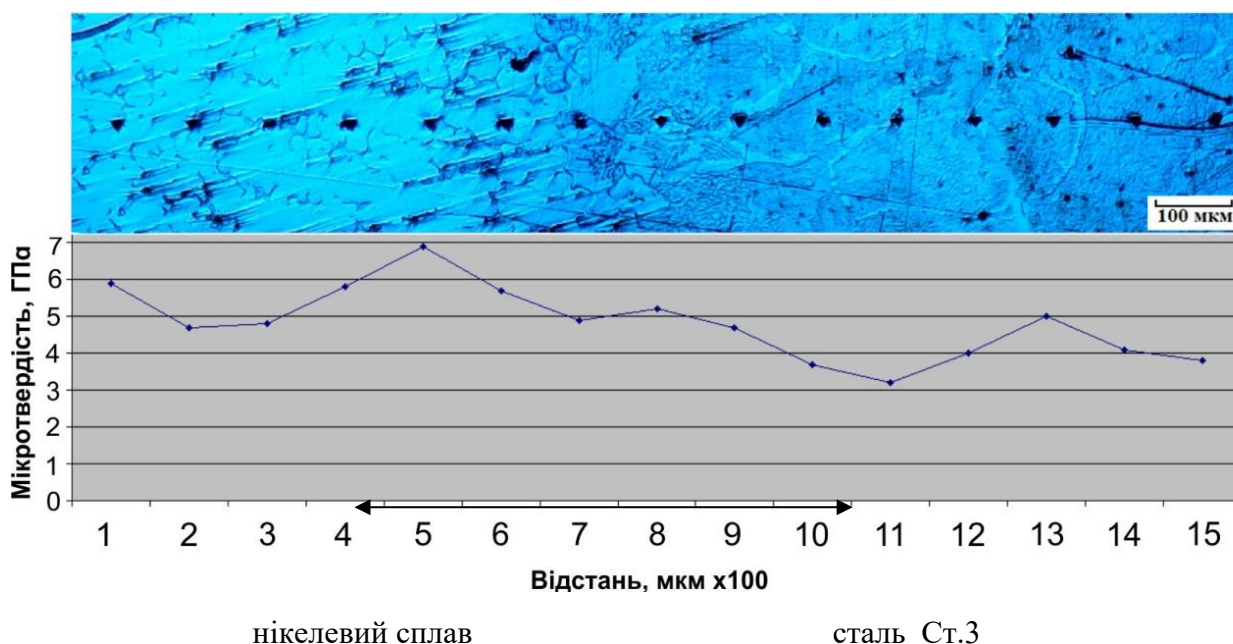


Рис. 3.22 - Розподіл мікротвердості поперек зони сплавлення нікелевого сплаву и вуглецевої сталі Ст.3

Даний спосіб належить до виготовлення біметалічних виливків за допомогою ливарного методу та може бути використаний для отримання біметалів з багатошаровими покриттями за допомогою технологій поверхневої лазерної чи механічної обробки пластини основи та ливарного процесу.

3.4. Можливості розширення меж використання механо – ливарного процесу виготовлення біметалів попередньою підготовкою поверхні основи

В запропонований метод покладено задачу вдосконалення способу ливарного виготовлення біметалів, у якому забезпечується необхідна глибина перехідного шару між основним та робочим металом, щоб отримати достатньо високий рівень міцності зчеплення шарів біметалу та

унеможливити відокремлення плакувального шару в процесі подальшого використання біметалу.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі ливарного виготовлення біметалів, що включає виливницю, в якій встановлена основа (плита із металічного матеріалу одного складу), засіб для подання розплавленого металічного матеріалу іншого складу (плакувального металу), що містить лоток з розплавом і жолоб для рівномірного нанесення на основу плакувального шару, згідно з даним способом новим є те, що на поверхню основи, що підлягає заливці плакувальним шаром, заздалегідь наносять рельєф потрібної структури та глибини, а розплавлений плакувальний матеріал перегрівають по відношенню до температури плавлення основи, причому величина перегріву плакувального розплаву залежить від виду та розмірів нанесеного рельєфу. Таким чином, спосіб стає придатним для забезпечення необхідної глибини перехідного шару між робочими шарами біметалу та, як результат, потрібної міцності їх зчеплення.

Сутність способу пояснюється рисунками, на яких зображено:

- на рисунку 3.23 – пристрій для ливарного виготовлення біметалів з високою міцністю зчеплення його шарів;
- на рисунку 3.24 – варіанти рельєфу (вид зверху), нанесеного на основі, при реалізації «острівної» (а) та смугастої (б) структури;
- на рисунку 3.25 – варіанти рельєфу по глибині.

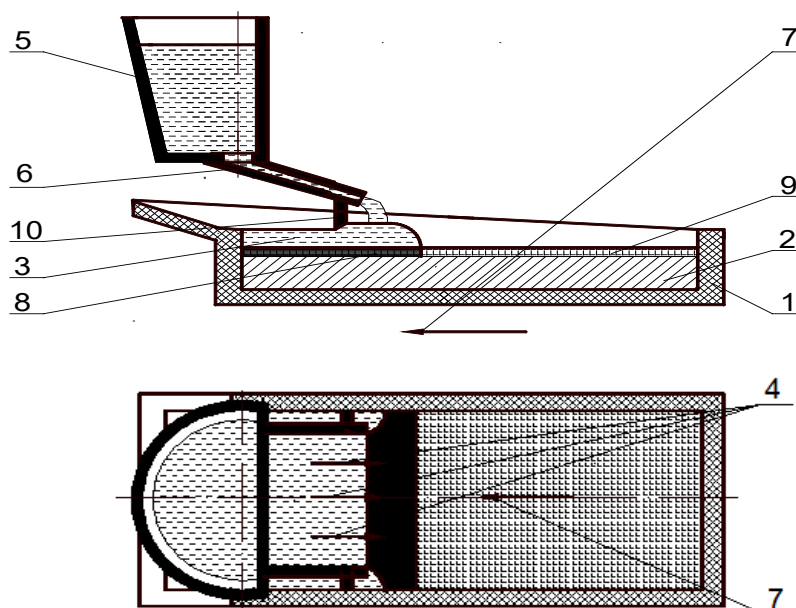


Рис. 3.23 - Спосіб виготовлення біметалів зі зчепленням його пластин при заливці рідким металом

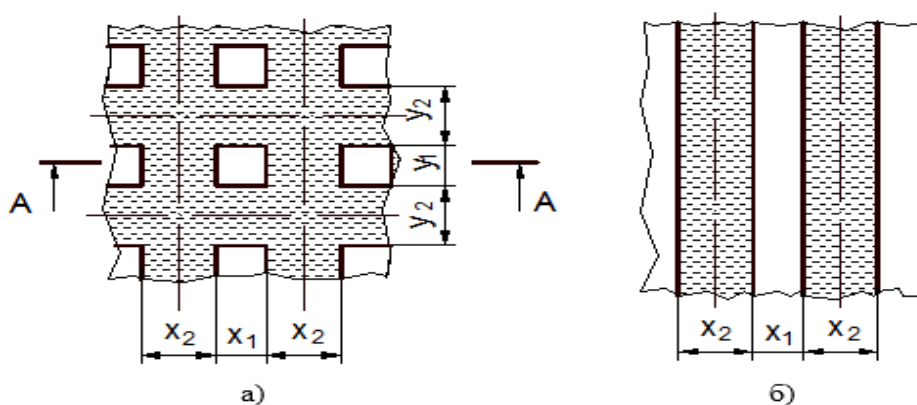


Рис. 3.24 - Варіанти реалізації рельєфу (вид зверху) нанесеного на пластинах біметалу:
а) «острівна» та б) «смугаста» структури

А-А

Варіант 1 ($K\phi = 1$) Варіант 2 ($K\phi = 1...2$) Варіант 3 ($K\phi = 2$)

$K\phi = 1,5$, если $X_{2.1} = 0,5X_2$

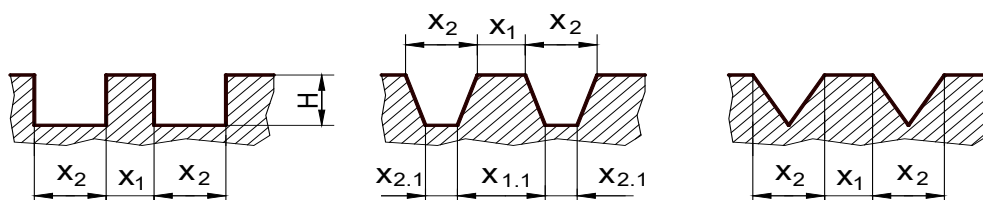


Рис. 3.25 - Варіанти рельєфу по глибині(нанесення): а) прямокутна форма; б) трапецієвидна форма; в) трикутна форма

Спосіб реалізується таким чином. Спочатку за допомогою лазерного променя на пластині основи 2 наноситься потрібна фактура. Після цього у виливницю 1 встановлюється основа 2 (плита із металічного матеріалу одного складу), яка заливається шаром розплавленого плакувального металу 3 іншого складу для створення (після охолодження) біметалу (рисунок 3.23). Для подання плакувального розплаву та рівномірного нанесення 4 його на основу 2 служить засіб для заливки, який включає в себе лоток 5 та жолоб 6. Для запобігання додаткового охолодження плакувального матеріалу в процесі заливки цей засіб може рухатися 7 зі швидкістю, як правило, рівною швидкості вільного розтікання плакувального металу 3 по основі 2. Оскільки глибина проникнення плакувального розплаву в основу за звичайних умов незначна, а в деяких випадках (коли температура плавлення основи вища за температуру плавлення плакувального металу) і зовсім відсутня, то потрібної міцності зчеплення шарів біметалу досягти не вдається. Тому потрібен попередній набір дій, який в подальшому (при заливці) приведе до створення перехідного шару 8 між основою та плакувальним металом потрібної глибини. Для цього заздалегідь на тій поверхні основи, що підлягає заливці, створюється спеціальний рельєф 9 у вигляді, наприклад, окремих «острівків» чи смуг та борозен між ними (рисунок 3.23), з розмірними параметрами, які підбираються, виходячи із наступних умов. По-перше, ширина борозни X_2 повинна бути достатньою, щоб в неї зміг затекти плакувальний розплав. Експериментальні дослідження показують, що борозни, шириною 0,3...1,0 мм задовольняють цій умові. По-друге, глибина борозни H - достатньою, щоб товщини створюваного перехідного шару 8 між основою та плакувальним металом вистачало для їх надійного зчеплення. Експериментально встановлено, що при $H = 0,2...0,7$ мм (не залежно від товщини основи та плакувального шару) таке зчеплення має місце. І насамкінець, ширина «острівку» чи смуги X_1 вибирається із

наступних міркувань: тепла плакувального матеріалу, що заповнив борозну X_2 повинно бути достатньо, щоб розплавити весь «острівок» чи смугу шириною X_1 . Очевидно, що при цьому плакувальний матеріал повинен бути декілька перегрітий по відношенню до температури плавлення основи. За рахунок механізму теплопровідності відбувається поступове розплавлення «островків» або смуг та, завдяки вільній тепловій конвекції і перемішуванню плакувального металу та розплаву основи, що створюється при плавленні «островків» або смуг, виникає перехідний сплав 8, який забезпечує високий рівень міцності зчеплення основних шарів біметалу.

Нескладні розрахунки показують, що залежність, яка зв'язує величину перегріву плакувального розплаву ΔT , та температуру плавлення основи T_m з розмірними параметрами «островків» та борозен, а також смуг та борозен, відповідно, має вигляд: $\Delta T = \frac{X_1}{X_2(2 + X_2/X_1)} T_m$ та $\Delta T = \frac{2X_1}{X_2(2 + X_2/X_1)} T_m$.

Так, при перегріві в 100°C (при температурі плавлення основи $\approx 1500^\circ\text{C}$) для «острівкової» структури маємо, що $X_1 = 1/3 X_2$, а для смугастої - $X_1 = 1/6 X_2$. При перегріві в 200°C : для «острівкової» - $X_1 \approx 1/2 X_2$, а смугастої - $X_1 \approx 1/4 X_2$.

Слід зазначити, що в залежності від методу виконання борозни, може бути отримана умовно її прямокутна, трапецієвидна чи трикутна форма (рисунок 3.25). Так, наприклад, прямокутна форма – при отриманні борозни фрезою чи шліфувальним кругом, трапецієвидна – токарним або стругальним різцем, а трикутна – лазерним променем. При цьому при розрахунках температури перегріву треба враховувати коефіцієнт форми K_ϕ , значення якого для кожної із форм борозни приведені на рисунку 3.24. Так, якщо для прямокутної форми ця температура складає 100°C , то для трикутної (при рівних умовах) – вже 200°C .

Щоб забезпечити потрібну висоту та рівномірність плакувального шару біметалу може бути використаний шкребок 10, який можна розмістити, наприклад, на лотку 5.

Пропонований спосіб ливарного виготовлення біметалів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок підвищення якості процесу в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення плакувального шару в процесі подальшого використання біметалу.

Окрім того, виріб можливо при отриманні біметалу ставити вертикально. Виготовлення біметалів зі зчепленням його пластин при заливці рідким металом, що включає виливницю, в якій вертикально по боках встановлені пластина основи та плакувальна пластина з потрібним зазором між ними, засіб для заливки розплавленого металу між цими пластинами, згідно з методикою на поверхню як пластини основи, так і плакувальної пластини заздалегідь наносять рельєф потрібної структури та глибини, пластини у виливниці орієнтують нанесеним рельєфом у бік заливки, а розплавлений метал перегрівають по відношенню до вищої із температур плавлення встановлених у виливницю пластин на величину, що залежить від виду та розмірів нанесеного рельєфу. Таким чином, спосіб стає придатним для забезпечення необхідної глибини перехідного шару між робочими пластинами біметалу і проміжним шаром розплаву та зчеплення пластин біметалу після кристалізації цього розплаву з потрібною міцністю.

Пристрій для заливки тонкого прошарку розплаву між вертикально встановленими пластинами біметалу представлений на рисунок 3.26.

Спосіб реалізується таким чином. У виливницю 1 вздовж її бокових поверхонь вертикально встановлюються пластина основи 2 та плакувальна пластина 3 (рисунок 3.26). При цьому ширина виливниці вибирається такою, щоб, з урахуванням товщини пластин 2 та 3, зазор 4 між пластинами

був досить вузьким (для отримання тонкого перехідного шару), але достатнім для легкого затікання рідкого металу в цей зазор.

Розплавлений метал 5 (наприклад, такого ж складу, як і пластина основи) зверху заливається в зазор 4 для створення тонкого прошарку, який після його охолодження та кристалізації забезпечить зчеплення між пластинами біметалу. Для подачі розплаву 5 та рівномірної його заливки між пластину 2 та 3 служить засіб для заливки, який включає в себе лоток 6 та жолоб 7. Щоб в процесі заливки рідкий метал не розтікався по боковим поверхням пластин біметалу ширина жолоба 7 повинна бути вужчою ширини зазору між пластинами. Для запобігання надмірного охолодження розплавленого матеріалу 5 в процесі заливки виливниця 1 повинна рухатися 8 відносно засобу для заливки зі швидкістю, як правило, рівною швидкості вільного розтікання рідкого металу 5 в зазорі 4.

Оскільки глибина проникнення розплаву 5 в тверде тіло металічної пластини 2 та 3 за звичайних умов незначна, то потрібної міцності зчеплення шарів біметалу досягти не вдається. Тому потрібен попередній набір дій, який при заливці приведе до створення перехідного шару 9 між кожною із пластин біметалу та прошарком розплавленого металу 5. Для цього заздалегідь на одній із поверхонь як пластини основи, так і плакувальної пластини створюється рельєф 10 у вигляді окремих «острівків» чи смуг виступів та впадин між ними з розмірними параметрами, які підбираються, виходячи із наведених вище умов.

Для видалення залишків рідкого металу з верхнього торця біметалу безпосередньо в процесі заливки може бути використаний шкребок 11, виконаний з тугоплавкого матеріалу, який можна розмістити, наприклад, на жолобі 7. Крім того, частки металу у вигляді ґрату, що виступили після заливки на торцевих поверхнях біметалу, можуть бути видалені після його охолодження (наприклад, шліфуванням обдирним абразивним кругом).

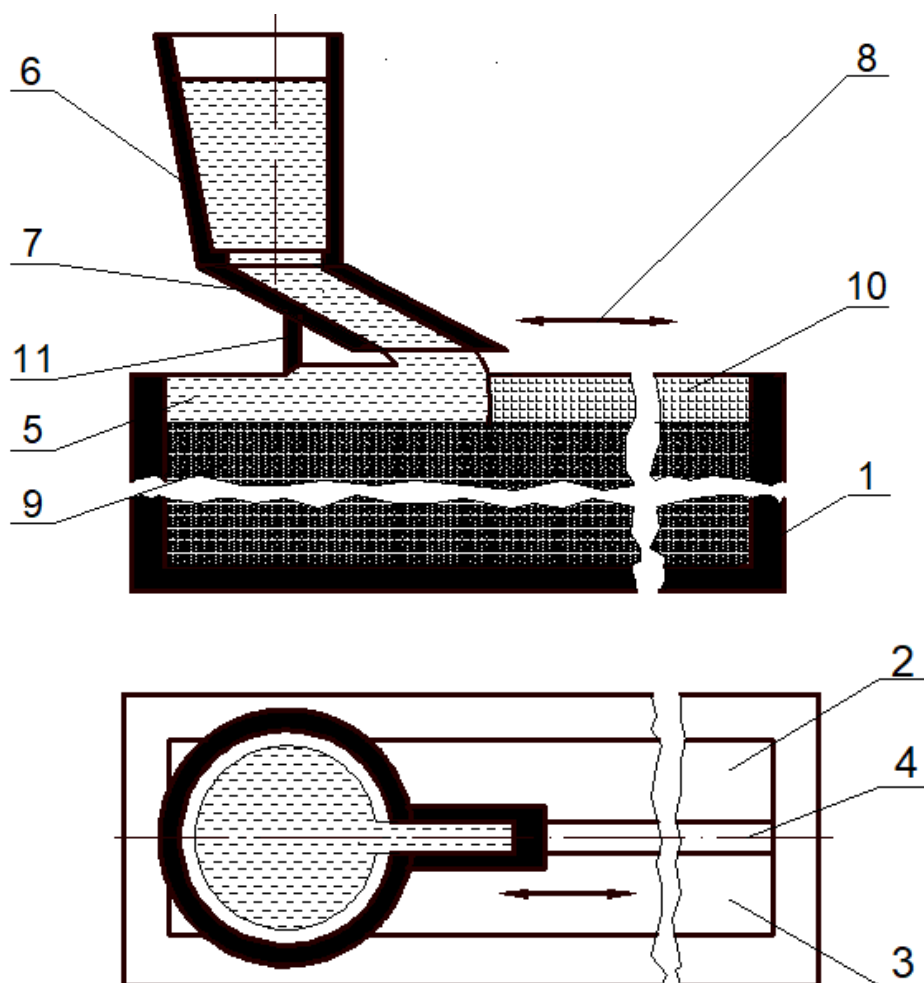


Рис. 3.26 - Спосіб виготовлення біметалів зі зчепленням його пластин при заливці рідким металом між вертикально встановленими пластинами біметалу

Пропонований спосіб виготовлення біметалів зі зчепленням його пластин при заливці рідким металом істотно розширює можливості свого застосування за рахунок високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що забезпечує низьку вірогідність його руйнування в процесі експлуатації.

Розроблений також спосіб виготовлення біметалів при зчепленні його пластин ливарним методом та подальшим стискуванням.

Сутність способу пояснюється кресленнями, на яких зображено пристрій для заливки прошарку розплаву між вертикально встановленими пластинами біметалу (рисунок 3.27, а) та пристрій для стискування пластин біметалу (рисунок 3.27, б).

Спосіб реалізується таким чином.

У виливницю 1 вповдовж її бокових поверхонь вертикально встановлюються пластина основи 2 та плакувальна пластина 3. При цьому ширина виливниці вибирається такою, щоб, з урахуванням товщини пластин 2 та 3, зазор 4 між пластинами був досить вузьким (для отримання тонкого перехідного шару), але достатнім для легкого затікання рідкого металу в цей зазор. Розплавлений метал 5 (наприклад, такого ж складу, як і пластина основи) зверху заливається в зазор 4 для створення тонкого прошарку, який після його охолодження та кристалізації забезпечить зчеплення між пластинами біметалу. Для подачі розплаву 5 та рівномірної його заливки між пластину 2 та 3 служить засіб для заливки, який включає в себе лоток 6 та жолоб 7. Щоб в процесі заливки рідкий метал не розтікався по боковим поверхням пластин біметалу ширина жолоба 7 повинна бути вужчою ширини зазору 4 між пластинами. Для запобігання надмірного охолодження розплавленого матеріалу 5 в процесі заливки виливниця 1 може рухатися 8 відносно засобу для заливки зі швидкістю, як правило, рівною швидкості вільного розтікання рідкого металу 5 в зазорі 4.

Оскільки глибина проникнення розплаву 5 в тверdotільні металічні пластини 2 та 3 за звичайних умов незначна, то потрібної міцності зчеплення шарів біметалу досягти не вдається. Тому потрібен попередній набір дій, який при заливці приведе до створення перехідного шару 9 між кожною із пластин біметалу та прошарком розплавленого металу 5. Для цього заздалегідь на одній із поверхонь як пластини основи 2, так і плакувальної пластини 3 створюється спеціальний рельєф 10 у вигляді, наприклад, окремих «острівків» чи смуг виступів та впадин між ними.

Через певний проміжок часу після закінчення заливки, достатній для початку кристалізації прошарку рідкого металу по краях біметалу (встановлюється експериментально), отриманий «сендвіч» із двох пластин та прошарку між ними виймають із виливниці та встановлюють в пристрій

для стискування, наприклад, під ручний або гідравлічний прес. Поступове стискування пластин біметалу дає можливість, з однієї сторони, рідкому металу прошарку повністю заповнити всі пори, які могли утворитися в перехідному шарі 9. З іншої сторони, враховуючи, що метал перехідного шару 9 ще розігрітий вище температури аустенізації, то в результаті стискання відбувається пластичне деформування цього шару, дифузійні процеси в ньому та, як результат, формування більш міцного шару зчеплення між пластинами біметалу. І насамкінець, стискування встановлює потрібну товщину прошарку зчеплення. Кінцева товщина перехідного шару 9 між пластинами біметалу встановлюється такою, щоб вона мала потрібні експлуатаційні показники, але не була достатньо великою (зазвичай, 1...3 мм в залежності від товщини пластин біметалу). Під тиском біметал деякий час охолоджується, щоб набрав міцності шар зчеплення. Для скорочення часу охолодження пристрій для стискування може мати спеціальні накладки 12, які можуть додатково охолоджуватись, наприклад, проточною водою 13. Частки рідкого металу, що виступають при стискуванні на бокових поверхнях пластин у вигляді ґрату 14, можуть бути видалені ще в рідкому стані спеціальним скребком. При необхідності після охолодження біметалу його бокові сторони можуть бути прошліфовані обдирним шліфувальним кругом.

Пропонований спосіб виготовлення біметалів при зчепленні його пластин ливарним методом та подальшим стискуванням істотно розширює можливості свого застосування за рахунок забезпечення заздалегідь потрібних властивостей поверхні плакувальної пластини біметалу та досягнення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що забезпечує низьку вірогідність його руйнування в процесі експлуатації.

Крім цього, представляє інтерес запропоновано та розроблено новий спосіб ливарного виготовлення біметалів при використанні технологічних отворів. При реалізації цього методу пластина основи та плакувальна

пластина, які установлені одна на одній, попередньо скріплюються між собою.

Згідно з пропонованим підходом в скріплених пластинах біметалу, зі сторони пластини основи, виконують технологічні отвори, причому в пластині основи – наскрізь, а в плакувальній пластині – не наскрізь, а розплавлений метал декілька перегрівують по відношенню до температури плавлення більш тугоплавкого із матеріалів пластин біметалу та заливають в кожний із технологічних отворів.

Таким чином, спосіб виготовлення біметалів набагато спрощується та стає придатним для надійного зчеплення пластин біметалу після кристалізації залитого в кожний технологічний отвір розплаву, а плакувальна пластина заздалегідь має необхідні властивості та якість лицьової поверхні.

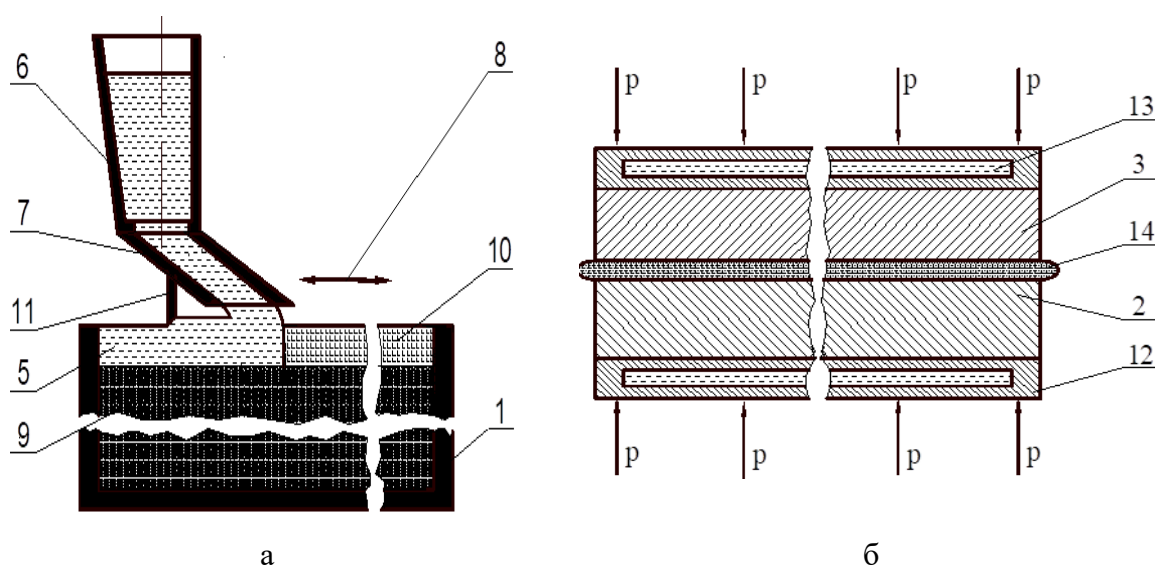


Рис. 3.27 - Пристрій для заливки прошарку розплаву між вертикально встановленими пластинами біметалу (а) та пристрій для стискування пластин біметалу (б)

Спосіб реалізується таким чином (рисунок 3.28). Пластина основи 1 встановлюється на плакувальній пластині 2 та попередньо закріплюється на ній, наприклад, двома штифтами 3. В скріплених між собою пластинах біметалу, зі сторони пластини основи 1, виконуються технологічні отвори 4.

При цьому пластина основи 1 просвердлюється наскрізь, а в плакувальній пластині 2 створюється глухий отвір. Глибина технологічного отвору в плакувальній пластині, з однієї сторони, має бути максимальною, щоб забезпечити високий рівень міцності зчеплення пластин біметалу. Однак, з іншої сторони, цей отвір не повинен підходити досить близько до лицьової сторони плакувальної пластини, так як це може призвести до жолоблення лицьової сторони в процесі охолодження та кристалізації залитого в отвір розплавленого металу. Залежно від товщини плакувальної пластини глибина глухої частини технологічного отвору 4 може складати 50...75 % товщини пластини 2. Кількість же технологічних отворів 4 та їх розміщення на пластинах біметалу визначається, виходячи із потреб міцності з'єднання цих пластин, і може бути підібрана в результаті експериментів.

Для заливки розплавленого металу 5 (наприклад, такого ж складу, як і пластина основи) в технологічні отвори 4 може бути використаний, наприклад, ківш 6, з якого по черзі заливають розплавлений метал в кожен із цих отворів. При необхідності процес розливки розплавленого металу 5 по технологічним отворах 4 може бути автоматизований.

Очевидно, що при цьому розплав 5 повинен бути декілька перегрітий по відношенню до температури плавлення більш тугоплавкого із матеріалів пластин біметалу. Так, наприклад, при використанні в якості розплаву 5 Сталі 10, температура плавлення якої дорівнює $\approx 1540^{\circ}\text{C}$, температура перегріву може складати $100...200^{\circ}\text{C}$. В подальшому механізм теплопровідності забезпечить часткове плавлення як металу пластини основи, так і металу плакувальної пластини по краях та на дні технологічного отвору за рахунок тепла залитого в технологічні отвори декілька перегрітого розплавленого металу 5.

Завдяки ж вільній тепловій конвекції і перемішуванню розплаву 5 та рідкого металу, що утворюється по краях та на дні отвору 4, виникає

перехідний шар 7, який разом з розплавом 5 після охолодження та кристалізації створить сполучний стрижень 8 між пластинами біметалу 1 та 2. Загальна ж кількість цих стрижнів і забезпечить високий рівень міцності зчеплення пластин біметалу. Частки рідкого металу, що можуть виплеснутися з технологічних отворів на пластину основи, можуть бути зчищені ще в рідкому стані спеціальним скребком. При необхідності після охолодження біметалу пластина основи для її вирівнювання може бути прошліфована обдирним шліфувальним кругом.

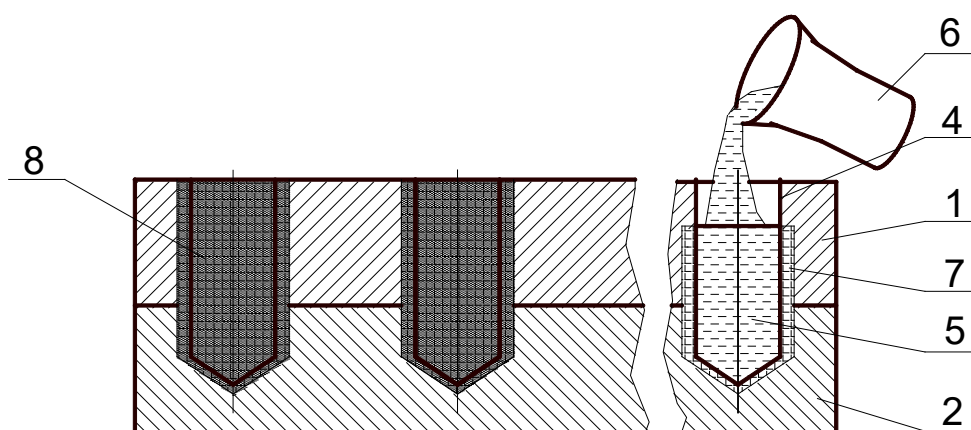


Рис. 3.28 - Спосіб ливарного виготовлення біметалів при використанні технологічних отворів

Пропонований спосіб виготовлення біметалів при зчепленні його пластин ливарним методом з використанням технологічних отворів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок спрощення і здешевлення технології, забезпечення заздалегідь потрібних властивостей поверхні плакувальної пластини біметалу та досягнення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що забезпечує низьку вірогідність його руйнування в процесі експлуатації.

Розроблений також спосіб ливарного виготовлення біметалів при заливці різьбових отворів розплавленим металом.

4. ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ ПРИ З'ЄДНАННІ ЙОГО ПЛАСТИН ПОТУЖНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕНЕРГІЇ

В основі даного методу полягає використання для надійного з'єднання пластин біметалу потужних джерел енергії, якими можуть виступати лазерний промінь, електрична дуга, плазма та ін. [19].

4.1 Теоретичний аналіз реалізації способу виготовлення біметалів при з'єднанні їх пластин потужним джерелом енергії

В подальшому для аналізу такого способу в якості потужного джерела енергії буде використовуватися, наприклад, електрична дуга. При цьому при підведенні плавкого електроду в зону з'єднання пластин біметалу формується зварний шов за участю металу плавкого електроду. Цей спосіб відрізняється хорошою контрольованістю процесу зварювання, малими капітальними затратами, проте його застосування для виготовлення біметалів проблематичне із-за неможливості виконання з'єднання внутрішніх поверхонь пластин біметалу по внутрішній площині дотику.

Тому нами запропоновано для отримання надійного з'єднання між пластинами біметалу використовувати технологічні отвори в пластині основи, в які в подальшому можливо заводити плавкий електрод. Внаслідок же горіння дуги та плавлення електроду утворюється металургійний зв'язок між пластинами біметалу. Поступове піднімання електроду дає можливість повністю заповнити весь об'єм технологічного отвору та створити надійне зчеплення пластин біметалу. Нерівності, що утворюються на поверхні пластини основи при необхідності можна зачистити механічним способом, наприклад, зішліфувати.

Суть реалізації такого методу представлена на рисунок 4.1.

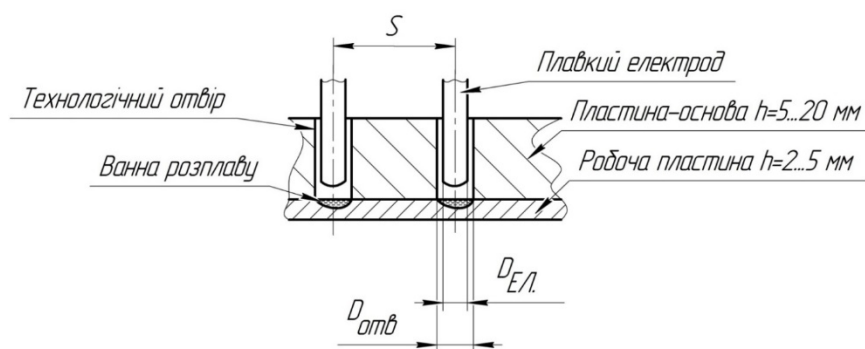


Рис. 4.1 - Схема реалізації способу виготовлення біметалів при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії: S - крок технологічних отворів, $D_{отв}$ - діаметр технологічного отвору; $D_{ел}$ - діаметр електроду; $T_{нов}$ - температура поверхні розплаву; $T_{меж}$ - температура межі розплав-твердий метал; z_{max} - максимальна товщина ванни розплаву; z_{opt} - оптимальна товщина ванни розплаву; $D_{отв} = 1,2 \dots 1,5 D_{ел}$.

При цьому теоретичний розгляд на основі теорії теплопровідності дає можливість оцінити глибину проплавлення в робочій пластині z_{max} .

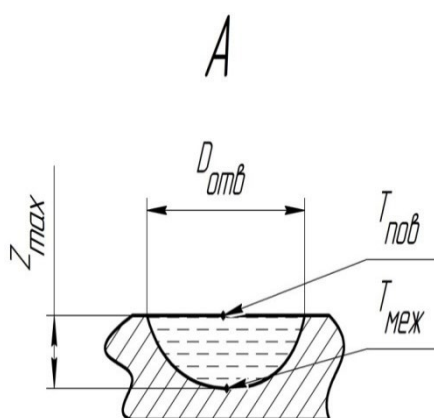


Рис. 4.2 - Розрахункові параметри технологічного процесу отримання біметалу

У точках, розташованих на осі кругового поверхневого джерела тепла радіусом r з рівномірно розподіленою щільністю теплового потоку, температура змінюється з часом згідно із законом:

$$T(x, t) = 2q\sqrt{at} / k \left\{ i\Phi^*(x/2\sqrt{at}) - i\Phi^*(\sqrt{x^2 + r^2} / 2\sqrt{at}) \right\}, \quad (4.1)$$

де q - потужність теплового джерела; Φ^* - додаткова функція інтегралу ймовірності; $i\Phi^*$ - інтеграл цієї функції.

Величину $Z_{\max}$ можна знайти, враховуючи, що при стаціонарному режимі метал нагрівається круговим джерелом енергії діаметром D , рівним діаметру технологічного отвору, по формулі:

$$Z_{\max} = \frac{D}{4} \left(\frac{T_{\text{нов.}}}{T_{\text{пл.}}} - \frac{T_{\text{пл.}}}{T_{\text{нов.}}} \right), \quad (4.2)$$

де $T_{\text{нов.}}$ - температура на поверхні нагріву джерелом енергії; $T_{\text{меж.}} = T_{\text{пл.}}$ - температура плавлення металу, що відповідає межі ванни розплаву.

При цьому слід враховувати, що температура на поверхні нагріву джерелом енергії не може перевищувати температуру випаровування металу, і, наприклад, при застосуванні електродугового зварювання ця температура відповідає температурі на поверхні електроду і лежить в інтервалі 2500...2800 °С. Тоді розрахунки по формулі (1) показують, що $Z_{\max} = 0,25...0,35D$. Так, наприклад, при використанні для з'єднання біметалічних пластин технологічних отворів діаметром 8...10 мм ми отримаємо глибину проварювання в робочій пластині 2...3,5 мм.

4.2 Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням технологічних отворів

Поставлена задача вирішується тим, що в способі виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням технологічних отворів, що включає формування зварного шва між пластиною підложки та плакувальною пластиною біметалу за участю металу плавкого електроду, згідно з пропонованою корисною моделлю новим є те, що в місцях зварювання в пластині підложки наскрізь свердлять технологічні отвори діаметром, більшим діаметра електрода для зварки, пластини тимчасово скріплюють та через технологічні отвори зварюють між собою. Таким чином, спосіб стає придатним для забезпечення

необхідної міцності зчеплення пластин біметалу при відсутності псування лицьової поверхні плакувальної пластини.

Спосіб реалізується таким чином (рисунок 4.3).

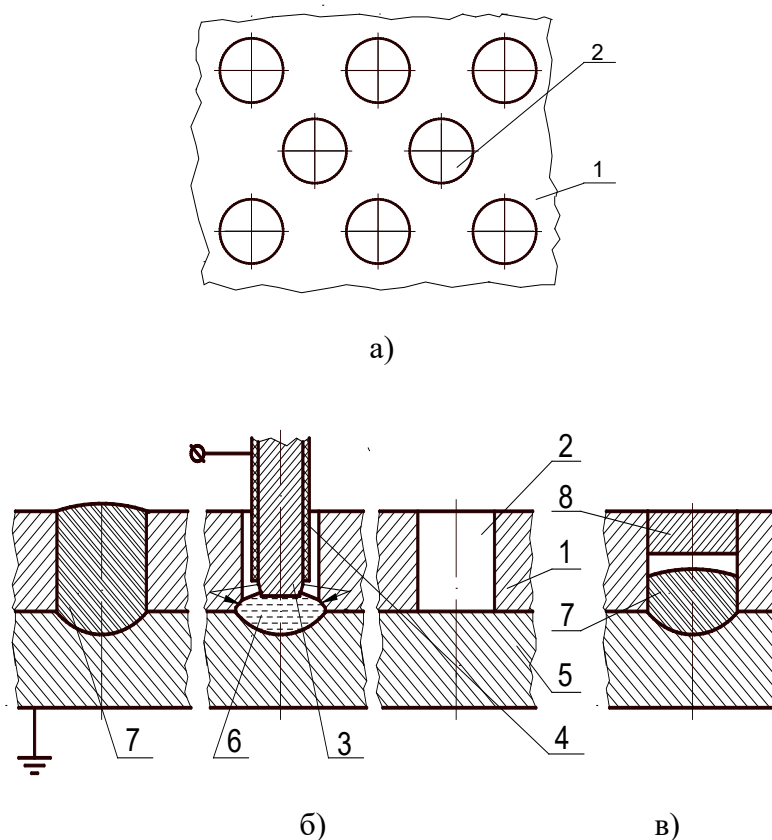


Рис. 4.3 - Варіанти нанесення технологічних отворів в пластині основи в місцях подальшого зварювання (а); процес формування зварювальної ванни та зварювальний шов при повному заповненні технологічного отвору (б) та зварювальний шов при частковому заповненні технологічного отвору та заглушка для отвору (в)

В пластині основи 1 завдяки попередній розмітці або використанню шаблонів в місцях подальшого зварювання виконуються технологічні отвори 2 (рисунок 4.3, а). При цьому пластину 1 свердлять наскрізь. Діаметр отвору 2 підбирають декілька більшим діаметра електрода 3 з обмазкою 4 так, щоб останній вільно заходив в отвір 2. Крім того, між електродом і стінками отвору повинен залишатися простір для виходу парів та газів, супроводжуючих процес зварювання. При цьому треба враховувати, що процес зварювання потрібно виконувати в порівняно вузькому отворі, що

потребує певної кваліфікації зварювальника. З іншої сторони, діаметр отвору 2 не повинен бути дуже великим, щоб забезпечити не надмірну витрату електродів. Як правило, діаметр технологічного отвору на 30...50% виконують більшим діаметра електрода з обмазкою. Кількість та спосіб розміщення отворів 2 на пластині підложки 1 можуть бути обрані, виходячи із потреб міцності з'єднання пластин біметалу, і це можна визначити в результаті експериментів.

В подальшому пластину основи 1 встановлюють на робочій пластині 5 та попередньо закріплюють на ній, наприклад, спеціальними затискачами або струбцинами. Для здійснення зварювання електрод 3 встановлюють в черговий технологічний отвір 2 (рисунок 4.3, б). Після початку електродугової зварки настає плавлення верхньої поверхні плакувальної пластини 5 та бокових сторін отвору 2 в пластині основи 1. Цей розплав змішується з розплавленим металом плавкого електрода 3, та відбувається утворення чергової зварної ванни 6. Процес зварювання може продовжуватися, поки ванна зварювання не заповнить весь технологічний отвір 2. Після охолодження та кристалізації зварної ванни отримуємо зварний шов 7 між пластинами біметалу 1 та 5. Загальна ж кількість зварних швів і забезпечить високий рівень міцності зчеплення пластин біметалу. Виступаючі над поверхнею пластини 1 напливи металу зварного шва бажано видалити (наприклад, зішліфувати у рівень з поверхнею цієї пластини).

При зчепленні пластин біметалу значної товщини для економії електродів зварним швом можна заповнити лише частину технологічного отвору. Тоді в незаповнені частини отворів 2 можуть бути запресовані заглушки 8 (рисунок 4.3, в).

Пропонований спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням технологічних отворів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок спрощення і

здешевлення технології, забезпечення заздалегідь потрібних властивостей поверхні плакувальної пластини біметалу та досягнення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що забезпечує низьку вірогідність його руйнування в процесі експлуатації.

4.3 Варіанти реалізації способу виготовлення біметалів незначної товщини при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії

Розрахунки показують (див. п.4.1), що глибина проварювання в робочій зоні складає 2...3,5 мм, що забагато, так як для виготовлення біметалу невеликої товщини використовуються робочі пластини товщиною 2...5 мм. Тому є небезпека наскрізного проплавлення робочої пластини і, як результат, ушкодження її зовнішньої поверхні. Достатньо отримати глибину проплавлення в 1...1,5 мм для забезпечення надійного зчеплення пластин біметалу.

Для цього нами запропонований новий підхід для отримання біметалів при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії, що включає формування зчеплення пластини основи та робочої пластини біметалу за рахунок ливарного процесу.

При цьому для отримання біметалів за рахунок з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії розроблено метод, який відрізняється тим, що в місцях з'єднання в пластині основи наскрізь свердлять технологічні отвори діаметром, що забезпечує підвід енергії до місця зчеплення пластин, та на краю цієї пластини, зі сторони контакту з робочою пластиною, поперек технологічних отворів вставляють штифти так, щоб вони міцно триматися в отворах, а енергію, що підводиться через технологічні отвори, спрямовують безпосередньо на штифти.

Можливий і інший варіант, коли в технологічні отвори вставляють шайби з зовнішнім діаметром, що забезпечує їм міцне утримування в

технологічних отворах, та внутрішнім, що дозволяє енергії потрапляти лише та безпосередньо на шайби.

Розроблені також ще два способи виготовлення біметалу по приведеній схемі. Перший з них полягає в тому, що в місцях з'єднання в пластині основи наскрізь свердлять ступінчаті технологічні отвори з більшим та меншим діаметрами, причому широка частина технологічного отвору розташована ззовні пластини основи, а вузька - зі сторони контакту з робочою пластиною, а енергію через широку частину технологічного отвору спрямовують безпосередньо на вузьку частину отвору. Інший передбачає виконання пластини основи збірною, яка набирається з тонких пластин, а в місцях з'єднання в тонких пластинах основи наскрізь свердлять технологічні отвори з більшим та меншим діаметрами, причому тонкі пластини основи встановлюють одна на одній так, щоб широка частина технологічного отвору була розташована ззовні пластини основи, а вузька - зі сторони контакту з робочою пластиною. При цьому енергію через широку частину технологічного отвору збірної пластини основи спрямовують безпосередньо на тонку пластину з вузьким отвором.

При використанні в якості джерела енергії електродугової сварки діаметр технологічного отвору підбирають декілька більшим діаметра зварювального електрода так, щоб останній вільно заходив в цей отвір. З іншої сторони, діаметр отвору не повинен бути дуже великим, щоб не надмірно витрачати електроди. Як правило, діаметр технологічного отвору на 50...75 % виконують більшим діаметра електрода. Кількість та спосіб розміщення технологічних отворів в пластині основи можуть бути обрані, виходячи із потреб міцності з'єднання пластин біметалу, що можна визначити експериментально. Встановлено, що оптимальний проміжок між центрами технологічних отворів складає 40...60 мм в центрі пластини. На краях пластини отвори краще розмістити як можна ближче до її країв (5...10

мм від краю пластини), щоб забезпечити мінімальні зазори на бокових поверхнях біметалу.

Для здійснення зварювання електрод встановлюють в широку частину чергового технологічного отвору до контакту з встановленою перепорою (штифт чи шайба), або до контакту з вузькою частиною цього отвору (рисунки 4.4). Відбувається утворення електричного розряду між електродами та перепорою чи вузькою частиною. В результаті плавлення електрода та перепори (чи вузької частини) розігрітий до високих температур рідкий метал стікає в напрямку поверхні робочої пластини. В результаті за рахунок ливарного процесу створюється ванна рідкого металу, яка частково підплавляє поверхню робочої пластини та бокових поверхонь технологічного отвору. Після заплавлення всього технологічного отвору та затвердіння рідкого металу отримуємо шов зчеплення робочої пластини та пластини основи біметалу, який надійно скріплює ці пластини. Режим зварювання та товщину перепори чи вузької частини підбирають такими, щоб зі сторони внутрішньої поверхні робоча пластина розплавлялась не більше, ніж на половину своєї товщини. При цьому зовнішня поверхня цієї пластини не повинна псуватись. Можлива лише поява кольорів мінливості. В кінці бажано поверхню швів з'єднання прошліфувати урівень з поверхнею пластини основи.

В якості потужного джерела енергії можливе також використання лазерного випромінювання. Подача випромінювання в місце контакту пластин біметалу при цьому буде здійснюватися через технологічні отвори в пластині основи, а концентруватися випромінювання буде на поверхні перепори чи вузької частини технологічного отвору.

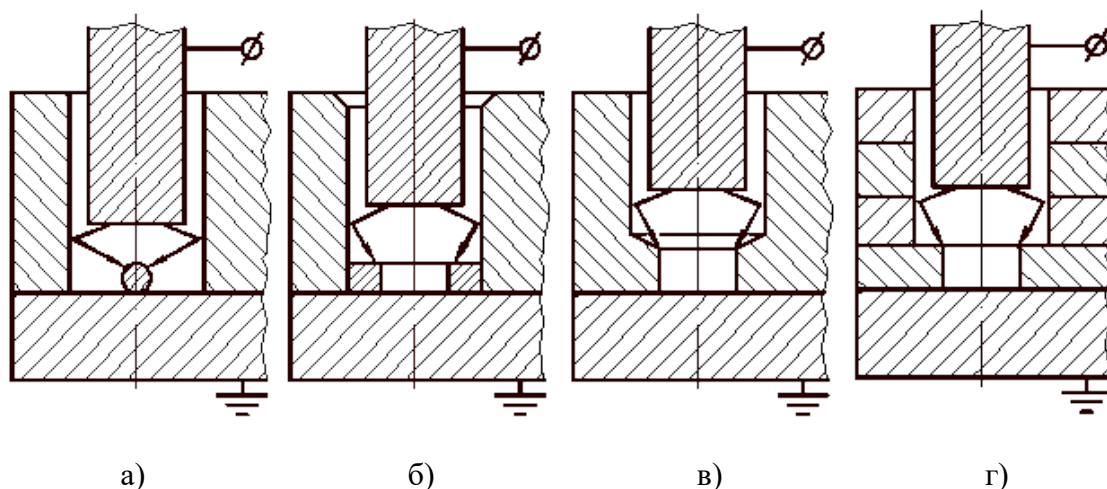


Рис. 4.4 - Способи з'єднання пластин біметалу за допомогою вставленого штифта (а), шайби (б), ступінчатого отвору (в) та збірної пластини основи (г)

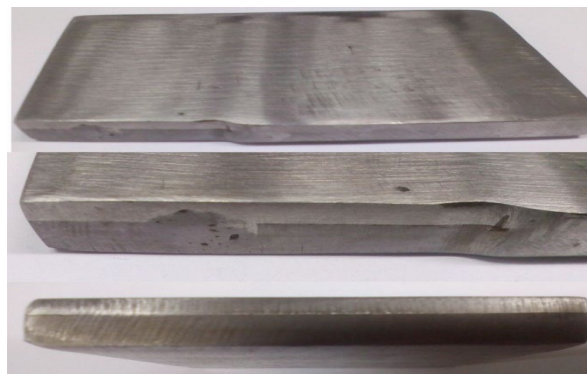
Таким чином, спосіб стає придатним для забезпечення необхідної глибини проварювання між пластинами біметалу та, як результат, потрібної міцності їх зчеплення при відсутності псування поверхні робочої пластини.

4.4 Приклади отримання біметалічних матеріалів при використанні потужних джерел енергії

Особливостями використання потужних джерел енергії при з'єднанні пластин біметалів є те, що таке зчеплення виконується через періодично розміщені технологічні отвори в пластині основи. В ці отвори підводиться енергія, наприклад, електричної дуги через плавкий електрод. Як результат, в місцях з'єднання можливе не повне заповнення технологічного отвору. Тому в наявності деякі пустоти, але добре видно зчеплення більш товстої основної пластин з робочою пластиною меншої товщини (рисунок 2.4.5 а, б).



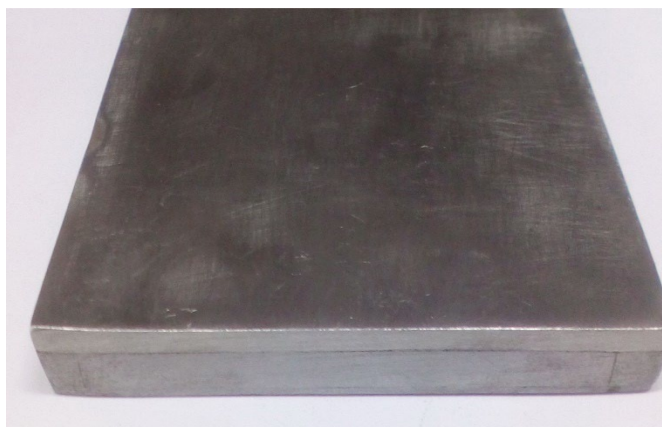
а)



б)

Рис. 4.5 - Приклади з'єднання пластин біметалів через періодично розміщені в пластині основи технологічні отвори та наявність деяких пустот в місцях зчеплення

Потрібна кількість таких технологічних отворів і місць зчеплення і забезпечує надійне з'єднання пластин біметалу (рисунок 2.4.6, а, б, в).



а)



б)

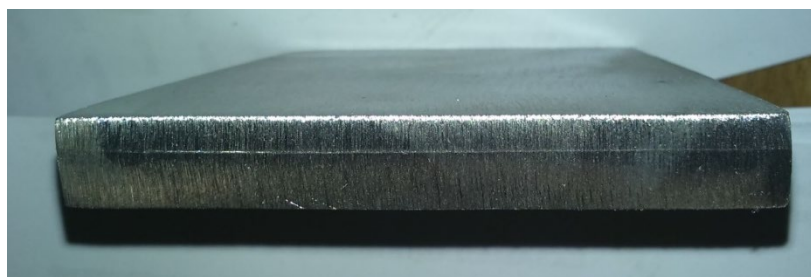


Рис. 4.6 - Приклади надійного з'єднання пластин біметалу при використанні потужних джерел енергії

4.5 Високоєфективний спосіб отримання алюмо-сталевих біметалів з застосуванням концентрованих потужних джерел енергії для з'єднання їх пластин

Особливого значення в деяких галузях промисловості набуває можливість отримання алюмо-сталевих біметалів, в яких міцність сталюї основи поєднується з експлуатаційними характеристиками алюмінію, як робочого шару.

Разом з тим, в останній час для отримання біметалів, щоб забезпечити надійне зчеплення між собою його складових пластин, ведуться інтенсивні роботи по використанню потужних джерел енергії. Однак виникає питання підводу енергії безпосередньо в місця зчеплення пластин біметалу для їх надійного з'єднання.

Розробка нового підходу до виготовлення алюмо-сталевих біметалів. Запропонована технологія отримання алюмо-сталевих біметалів при надійному зчепленні пластин енергією потужного джерела, коли енергію подають в зону контакту пластин біметалу через технологічні отвори в пластині його основи. Так, в пластині сталюї основи 1 в потрібних місцях виконують технологічні отвори 2 діаметром D (рисунок 4.7, а). Якщо в якості джерела енергії використовують електродугову зварку, то діаметр отвору 2 підбирають декілька більшим діаметра зварювального електрода так, щоб останній вільно заходив в цей отвір. На краю пластини 1, в рівень з її краєм, зі сторони контакту з робочою пластиною в отвір 2 вставляють дві заглушки: першу 3 із латуні чи бронзи - на краю, та в контакті із першою заглушкою - другу 4, сталю (рисунок 4.7, б). При цьому діаметри заглушок 3 та 4 повинні забезпечувати їх входження в отвір 2 з деяким натягом, щоб вони міцно тримався в цьому отворі.

Товщину сталюї заглушки 4 підбирають такою, щоб, при температурі на верхній її поверхні, рівній температурі в зоні дії потужного

джерела енергії, наприклад, електричної дуги (приблизно, $T_{\text{дуг.}} \approx 2500 \text{ }^{\circ}\text{C}$), температура на її нижній частині відповідала температурі плавлення $T_{\text{пл.1}}$ її матеріалу (сталі) (приблизно, $T_{\text{пл.1}} \approx 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Це забезпечить повне проплавлення цієї сталюї заглушки в процесі зварювання. Товщина заглушки 4 h_1 може бути розрахована по формулі:

$$h_1 = (D/4)(T_{\text{дуг.}}/T_{\text{пл.1}} - T_{\text{пл.1}}/T_{\text{дуг.}}). \quad (4.1)$$

Матеріал же заглушки 3 (наприклад, латунь чи бронза) вибирають з тих міркувань, що температура плавлення вибраного матеріалу $T_{\text{пл.2}}$ (в даному випадку $T_{\text{пл.2}} \approx 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$) була б в діапазоні між температурою плавлення сталі ($\approx 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) та температурою плавлення робочої пластини біметалу із алюмінію ($\approx 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$). При цьому товщина заглушки 3 h_2 повинна забезпечувати повне її плавлення і може бути розрахована по формулі:

$$h_2 = (D/4)(T_{\text{пл.1}}/T_{\text{пл.2}} - T_{\text{пл.2}}/T_{\text{пл.1}}). \quad (4.2)$$

В подальшому сталюу пластину основи 1 встановлюють на алюмінієву робочу пластину 5 біметалу, орієнтуючи її таким чином, щоб заглушка 3 виявилася зі сторони робочої пластини (рисунок 4.7, б).

Для здійснення зварювання електрод 6 встановлюють в черговий технологічний отвір 2 до контакту з загнушкою 4. Відбувається утворення електричного розряду між електродом 6 та загнушкою 4 (рисунок 2.4.7, б). В результаті плавлення електрода 6 та загнушки 4 розігрітий до температури плавлення сталі ($\approx 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) рідкий метал розігріває (за рахунок механізму теплопровідності) розміщену нижче загнушку 3 з латуні чи бронзи, призводячи теж до її плавлення. В результаті за рахунок ливарного процесу створюються дві ванни 7 та 8 рідкого металу, в яких сталюна та латунна (чи бронзова) компоненти перемішуються між собою. Ванна 8 за рахунок теплопровідності частково підплавляє поверхню алюмінієвої робочої

пластини 5, створюючи ванну розплаву 9, а ванна 7 – поверхню бокових сторін технологічного отвору 2 (рисунок 4.7, в).

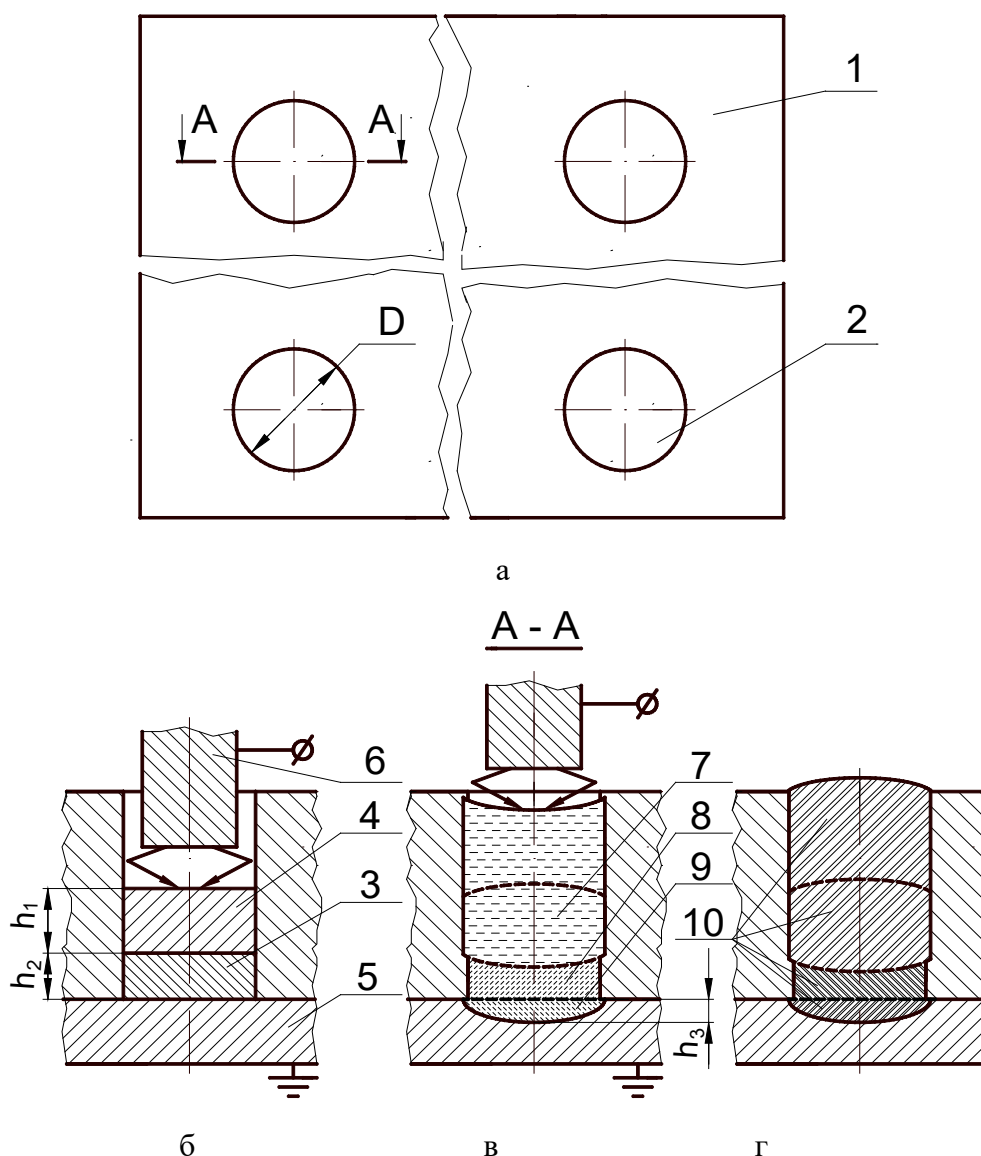


Рис. 4.7 - Варіант виконання технологічних отворів в сталій пластині основи (а), запалення електричної дуги між вставленим в технологічний отвір електродом та сталюю заглушкою (б), процес формування ванни рідкого металу в технологічному отворі (в) та перетин багатокомпонентного зварного шва зчеплення пластин біметалу (г)

Глибина підплавлення h_3 робочої пластини 5 може бути розрахована по формулі:

$$h_3 = (D/4)(T_{нл.2}/T_{нл.3} - T_{нл.3}/T_{нл.2}), \quad (4.3)$$

де $T_{пл.3}$ - температура плавлення матеріалу алюмінієвої робочої пластини біметалу.

Розрахунки показують, що глибина проплавлення в алюмінієвій робочій пластині складає значення $h_3 = 0,88...1,75$ мм, що забезпечують надійне зчеплення пластин біметалу.

Після заплавлення всього технологічного отвору 2 та затвердіння всіх складових рідкого металу 7, 8 та 9 отримуємо багатокомпонентний зварний шов 10, який надійно скріплює пластини біметалу 1 та 5 (рисунок 2.4.7, г). Загальна ж кількість зварних швів 10 і забезпечить потрібний рівень міцності зчеплення пластин біметалу. В кінці бажано поверхню зварних швів 10 прошліфувати урівень з сталюю поверхнею пластини основи 1.

В якості потужного джерела енергії можливе також використання іншого виду енергії, наприклад, лазерного випромінювання.

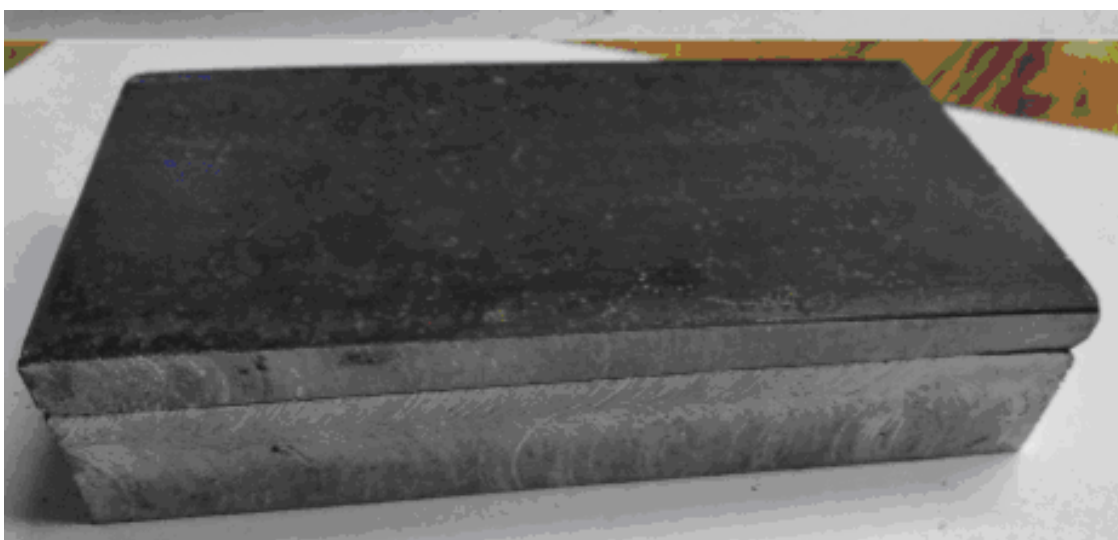


Рис. 4.8 - Алюмо-стальний біметал, отриманий за розробленою технологією, при розташуванні алюмінієвого шару знизу

Таким чином, запропонований спосіб виготовлення алюмо-сталевих біметалів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок

спрощення і здешевлення технології отримання біметалу, забезпечує надійне з'єднання його пластин.

4.6 Виготовлення гнутих біметалів та біметалічних виробів кутового типу

В основному біметали отримуються в вигляді листових матеріалів різних розмірів. Якщо із біметалів виготовляються конструкції замкнутого контуру є потреба в гнутих біметалах, та біметалах кутового типу, що спрощує отримання виробів такого контуру.

Розробка нового підходу до виготовлення гнутих біметалів при використанні для з'єднання пластин потужного джерела енергії.

Нами запропонований оригінальний спосіб виготовлення гнутих біметалів при з'єднанні їх пластин потужним джерелом енергії, при якому забезпечується достатньо високий рівень міцності зчеплення цих пластин та значне здешевлення технології отримання цих біметалів.

В нашому випадку при виготовленні гнутих біметалів з'єднання пластини основи та робочої пластини біметалу відбувається за рахунок енергії електричної дуги. Для потрапляння енергії дуги в місце контакту пластин заздалегідь в пластині основи 1 в потрібних місцях виконують наскрізні технологічні отвори 2 (рисунок 4.9, а). При використанні в якості джерела енергії електродугової сварки діаметр отвору 2 підбирають декілька більшим діаметра зварювального електрода так, щоб останній вільно заходив в цей отвір. З іншої сторони, діаметр отвору 2 не повинен бути дуже великим, щоб не надмірно витрачати електроди. Як правило, діаметр технологічного отвору на 50...75 % виконують більшим діаметра електрода. Кількість та спосіб розміщення отворів 2 на пластині основи 1 можуть бути обрані, виходячи із потреб міцності з'єднання пластин біметалу, що можна визначити експериментально. Технологічні отвори 2

розміщують по можливості симетрично відносно лінії згинання 3 біметалу. В подальшому пластину основи 1 встановлюють на робочу пластину 4 біметалу. При цьому робоча пластина 4 в напрямку перпендикулярному лінії згинання 3 повинна бути дещо довшою пластини основи 1 з урахуванням різного діаметру заокруглення цих пластин при спільному їх згинанні. Різниця в довжині цих пластин може бути легко розрахована. Пластини 1 та 4 тимчасово скріплюють між собою, використовуючи, наприклад, механічні затискачі або спеціально розроблене пристосування.

Для здійснення зварювання електрод 5 встановлюють в черговий технологічний отвір 2 до контакту з робочою пластиною 4. Відбувається утворення електричного розряду між електродом 5 та пластиною 4. В результаті ливарного процесу створюється ванна 6 рідкого металу, яка частково підплавляє поверхню робочої пластини 4 та бокових поверхонь технологічного отвору 2. Після заплавлення всього отвору 2 та затвердіння рідкого металу отримуємо зварний шов 7, який надійно скріплює пластини біметалу 1 та 4 (рисунок 4.9, а). Таке з'єднання пластин біметалу виконують тільки з одного краю пластин біметалу, лише до лінії його згинання. Це забезпечить при подальшому процесі згинання переміщення робочої пластини 4 відносно пластини основи 1 за рахунок різних радіусів заокруглення цих пластин при згинанні. Якщо ж пластини біметалу були б скріплені повністю, то при згинанні це призвело б до руйнування місць скріплення.

При необхідності згинання може бути виконане, коли потрібно, щоб пластина основи розташовувалась би ззовні зігнутого біметалу. При цьому треба враховувати, що довжина вже цієї пластини повинні бути більшою довжини робочої пластини.

Процес згинання пластин біметалу при їх скріпленні по одній стороні на згинальному пресі представлений на рисунок 4.9, б. Показано, що переміщення робочої пластини 4 відносно пластини основи 1 відбувається

лише по другій (незакріпленій) стороні біметалу (по стрілці 8). Після завершення згинання на потрібний кут пластини біметалу знову тимчасово скріплюються між собою механічними затискачами, і виконується з'єднання другої сторони біметалу за допомогою електродугового зварювання (рисунок 4.9, в). В кінці бажано поверхню зварних швів 7 прошліфувати урівень з поверхнею пластини основи 1.

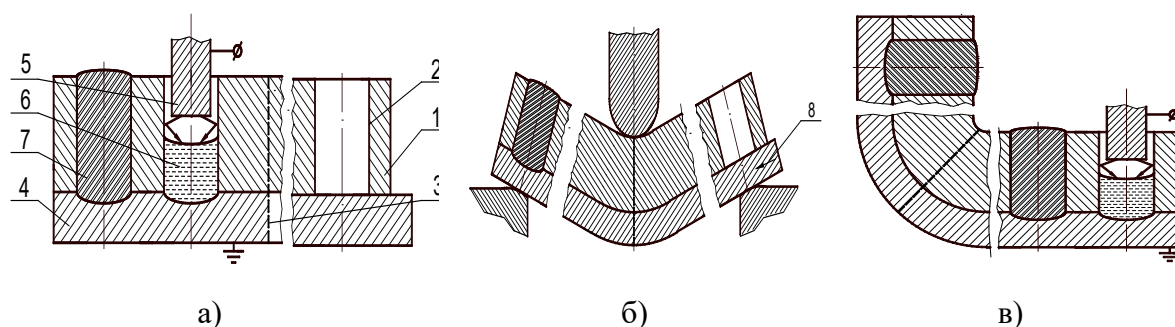


Рис. 4.9 - Зчеплення пластин біметалу на одному з його країв (до лінії згинання) за рахунок запалення електричної дуги (а), процес згинання біметалу по лінії згинання при зміщенні робочої платини відносно пластини основи на не скріпленому краї біметалу (б) та зчеплення пластин зігнутої заготовки з біметалу на другому його краю (в)

В якості потужного джерела енергії можливе також використання іншого виду енергії, наприклад, лазерного випромінювання. Подача випромінювання в місце контакту пластин біметалу при цьому буде здійснюватися через технологічні отвори в пластині основи, а концентруватися випромінювання буде на поверхні робочої пластини.

Пропонований спосіб виготовлення гнутих біметалів при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії істотно розширює можливості свого застосування за рахунок спрощення і здешевлення технології отримання таких біметалу, забезпечує надійне з'єднання його пластин.

Приклади отримання гнутих біметалів при використанні для з'єднання пластин потужного джерела енергії.

Застосування розробленого підходу для отримання гнутих біметалів забезпечує потрібний кут їх згинання та надійне з'єднання пластин між собою (рисунок 4.10).



Рис. 4.10 - Приклад згинання біметалу на кут в 90° при надійному зчепленні його пластин



Рис. 4.11 - Приклад можливості отримання замкнутих контурів при використанні гнутих під кутом в 90° біметалів

При цьому використання, наприклад, двох зігнутих на кут в 90° пластин дозволяє отримати замкнутий контур та зменшити затрати на виготовлення такого контуру при використанні зварних з'єднань (рисунок 4.11).

4.7 Виготовлення полегшених біметалів при використанні потужних джерел енергії

Суть цих методів полягає в тому, що пластину основи виготовляють збірною або полегшеною, що дає можливість набагато зменшити у вазі отриманий біметал при збереженні його міцності та значно зекономити витрати металу, який йде на отримання пластини основи.

Так, наприклад, поставлена задача вирішується тим, що в способі виготовлення полегшених біметалів електродуговим зварюванням, що включає формування зварного шва між пластиною основи (підкладкою) та робочою (плакувальною) пластиною пластину основи виготовляють збіркою, і вона складається із зовнішньої рами, внутрішніх перемичок та облицювальної пластини з забезпеченням в останній крізних технологічних отворів діаметром, більшим діаметра електрода для зварки. При цьому робочу пластину приварюють до внутрішніх перемичок пластини основи в звичайний спосіб, а облицювальну пластину - через технологічні отвори. Крім того, зазори між плакувальною пластиною та зовнішньою рамою пластини (підкладки) і зовнішньою рамою та облицювальною пластиною в пластині (підкладці) заварюють по всьому периметру біметалу. Таким чином, спосіб стає придатним для забезпечення необхідної міцності зчеплення пластин біметалу, герметичності їх з'єднання та зменшення ваги біметалу.

Спосіб реалізується таким чином (рисунок 4.12). Як правило, в біметалі пластина підкладки (наприклад, із звичайної конструкційної сталі)

товща плакувальної пластини (наприклад, із неіржавіючої сталі). Пластина підкладки призначена для кріплення до неї плакувальної пластини та подальшого з'єднання пластин біметалу між собою для створення необхідних виробів. Для зменшення ваги біметалу пластина підложки може бути виготовлена порожнистою. При цьому співвідношення пустот та смуг металу, що несуть на собі навантаження від плакувальної пластини, підбираються в залежності від товщини цієї пластини та функцій біметалу. Так, для товщини плакувальної пластини 3 мм розміри пустот можуть досягати площі 50x50 мм при товщині внутрішніх перемичок металу 5...15 мм.

Для виготовлення полегшеної пластини підложки може бути запропонована, наприклад, така її конструкція. Спочатку виготовляють (наприклад, зварюють із окремих смуг металу) раму 1 розмірами, які відповідають розмірам пластини біметалу, та товщиною, меншою товщини пластини біметалу на товщину плакувальної пластини 2 та облицювальної пластини 3 для пластини підложки (рисунки 4.12, а). Для цього смуги металу рами 1 зварюють, наприклад, по зовнішнім стикам зварним швом 4, заздалегідь підготувавши кромки стиків під зварку. Ширину смуг рами 1 підбирають такою, щоб вона забезпечувала міцність конструкції біметалу та до неї легко було б в подальшому кріпити (наприклад, приварювати) інші пластини біметалу. Так, ширина 8...20 мм (в залежності від розмірів пластини біметалу) задовольняє цим вимогам. В середині рами 1 встановлюють (як уподовж, так і упоперек) та приварюють до неї зварними швами 5 додаткові смуги металу, створюючи внутрішні перемички 6, з урахуванням наведених вище міркувань.

Створену в такий спосіб полегшену пластину підложки встановлюють на плакувальну пластину 2 та тимчасово прикріплюють до неї за допомогою спеціального затискача або струбцин. Плакувальну пластину 2 приварюють в звичайний спосіб до внутрішніх перемичок 6 зварними швами 7. Місця

зварювання та кількість зварних швів 7 повинні забезпечувати надійне скріплення плакувальної пластини з пластиною підложки. Після цього плакувальна пластина 2 приварюється по всьому периметру до зовнішньої рами 1 зварним швом 8 для герметизації незначного зазору між плакувальною пластиною та пластиною підложки. Зварний шов 8, разом з тим, підвищує міцність зчеплення пластин біметалу. Верхні і нижні кромки рами 1 та внутрішні кромки плакувальної 2 і облицювальної 3 пластин заздалегідь відповідним чином підготовлюють (наприклад, знімають фаску 9) для зварювання.

Для закриття внутрішніх порожнин та герметизації пластини підложки може бути використана облицювальна пластина 3. Для її приварювання до внутрішніх перемичок 6 на пластині 3 в місцях зварювання заздалегідь виготовляють крізні технологічні отвори 10 (рисунок 4.12, б). Діаметр отвору 10 підбирають декілька більшим діаметра електрода 11 з обмазкою 12 так, щоб останній вільно заходив в отвір 10 (рисунок 4.12, в).

Крім того, між електродом і стінками отвору повинен залишатися простір для виходу парів та газів, супроводжуючих процес зварювання. З іншої сторони, діаметр отвору 10 не повинен бути дуже великим, щоб забезпечити не надмірну витрату електродів. Як правило, діаметр технологічного отвору на 5...10 % виконують більшим діаметра електрода з обмазкою.

Враховуючи, що облицювальна пластина не несе на собі такого навантаження, як плакувальна пластина, таких місць зварювання може бути набагато менше, ніж при прикріпленні плакувальної пластини. Наприклад, їх можна передбачити одне на площу 150x150 мм. Положення отворів 10 розмічають так, щоб їх центр припадав на середину внутрішньої перемички 6. З наведених вище причин товщина облицювальної пластини може бути набагато меншою товщини плакувальної пластини та складати 1...2 мм. При

цьому невелика товщина цих пластин зменшує загальну вагу біметалу та собівартість його виготовлення.

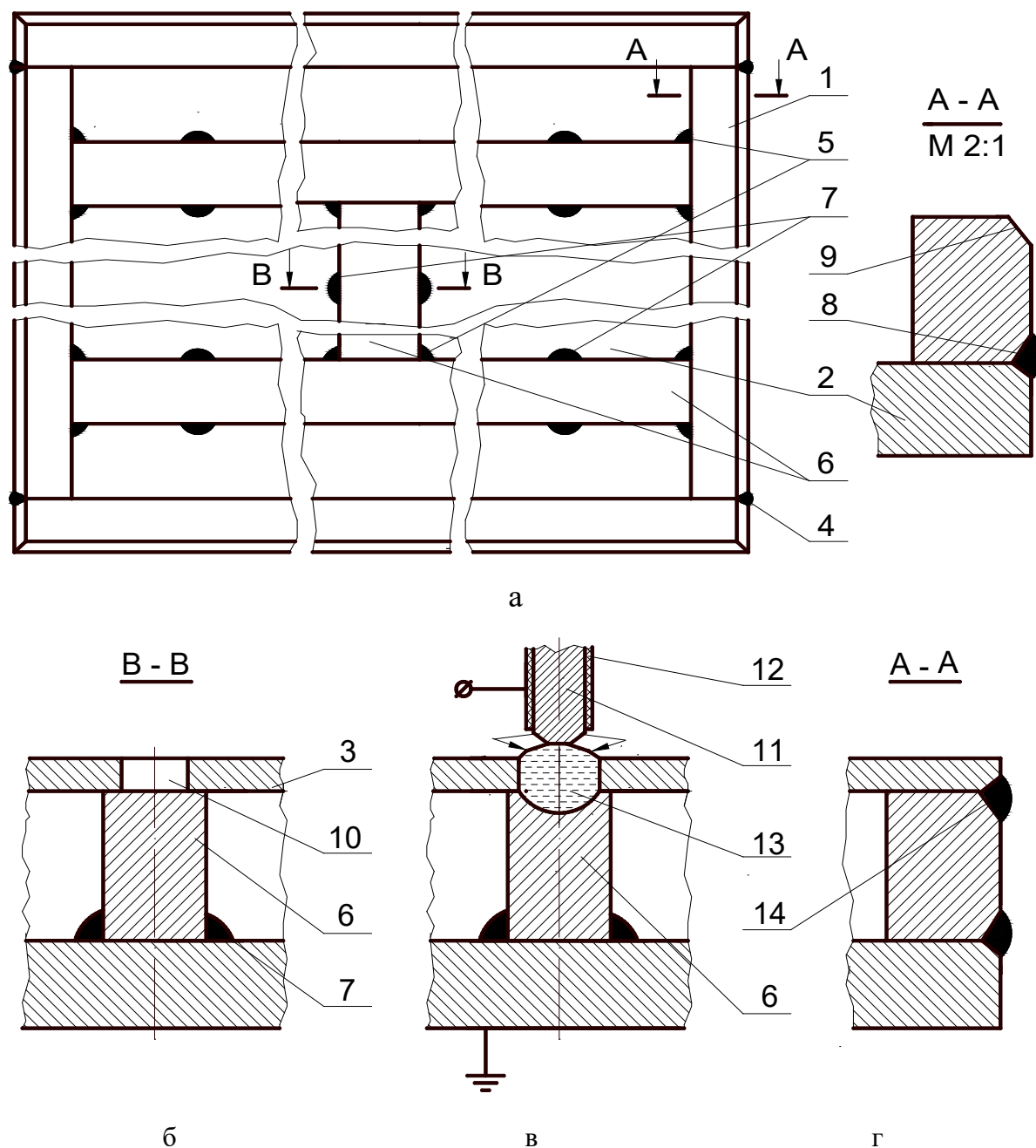


Рис. 4.12 - Процес виготовлення полегшеного біметалу зі звареною пластиною основи

Облицювальну пластину 3 встановлюють на збірну пластину біметалу та тимчасово закріплюють на ній. Для здійснення зварювання електрод 11 встановлюють в черговий технологічний отвір 10. Після початку електродугової зварки настає плавлення перемички 6 та бокових сторін

отвору 10 в облицювальній пластині 3. Цей розплав змішується з розплавленим металом плавкого електроду 11, та відбувається утворення зварної ванни 13. Процес зварювання продовжують, поки ванна зварювання не заповнить весь технологічний отвір 10 та декілька не вийде над поверхнею пластини 3. Після охолодження та кристалізації зварювальної ванни 13 отримуємо зварний шов між внутрішньою перемичкою 6 пластини підложки та облицювальною пластиною 3. І врешті-решт, облицювальну пластину 3 по контуру зварюють з зовнішньою рамою 1 зварним швом 14.

В кінці бажано облицювальну пластину та бокові кромки біметалу очистити від зварних напливів (наприклад, зішліфувати).

Пропонований спосіб виготовлення полегшених біметалів електродуговим зварюванням істотно розширює можливості свого застосування за рахунок зменшення ваги біметалу, спрощення і здешевлення технології його виготовлення, забезпечення герметичності з'єднання пластин біметалу та обумовлює досягнення високого рівня міцності зчеплення його пластин, що забезпечує низьку вірогідність руйнування біметалу в процесі його зберігання та експлуатації.

Приклад отримання полегшених біметалів при використанні для з'єднання пластин потужного джерела енергії. Після виготовлення та зачистки полегшений біметал має такий само вигляд, як і біметал з суцільною пластиною основи. При цьому на бокових поверхнях основи інколи видно місця з'єднання (рисунок 4.13).

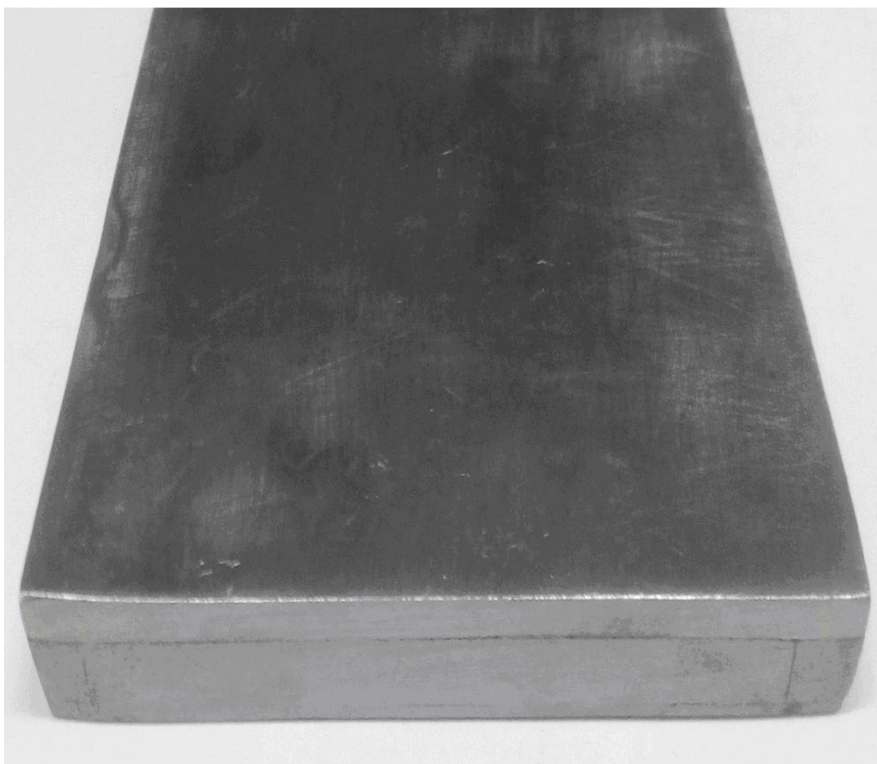


Рис. 4.13 - Приклад біметалу полегшеної конструкції (на бокових гранях пластини основи можна бачити місця з'єднання)

4.8 Розробка комплексного підходу до виготовлення біметалів з використанням ливарного процесу та закріплення утримуючих елементів застосуванням потужних джерел енергії

Такий підхід базується на тій ідеї, що перед заливкою робочим шаром пластини основи біметалу на останній за допомогою потужного джерела енергії закріплюються спеціальні утримуючі елементи.

Розроблено пристрій для отримання біметалів з метою забезпечення достатньо високого рівня міцності зчеплення пластин біметалу, щоб унеможливити відокремлення робочої пластини в процесі подальшого використання біметалічних виробів. Для реалізації запропонованого пристрою для ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів в пластині основи 1 завдяки попередній розмітці або використанню шаблонів виконують ступінчасті технологічні отвори 2 (рисунок 4.14, а). Діаметр вузької частини технологічного отвору повинен бути достатнім для вільного затікання рідкого металу по всій глибині цього отвору. Діаметр же ширшої частини отвору 2 повинен бути більшим вузької частини, наприклад, в 1,5 рази, а глибина широкої частини може складати 30...50 % глибини технологічного отвору в залежності від товщини пластини основи.

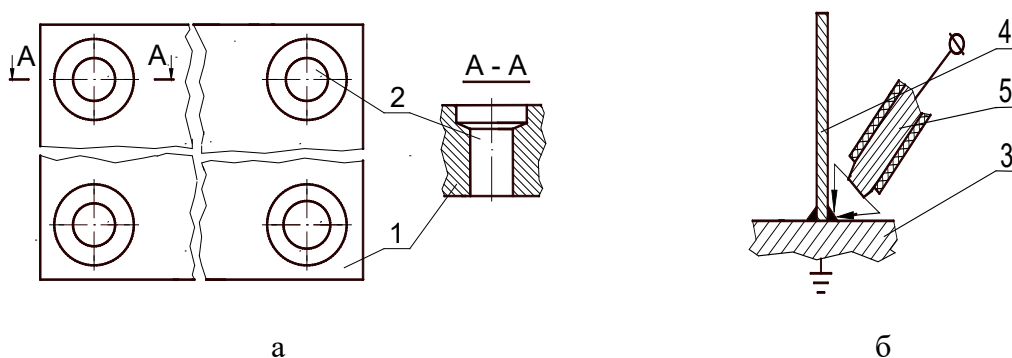


Рис. 4.14 - Виконання ступінчатих технологічних отворів в пластині основи (а) та приєднання утримуючого елемента до робочої пластини за допомогою електродугового зварювання (б)

Пластину основи кладуть на робочу пластину та маркують центри технологічних отворів. Знімають пластину основи та до робочої пластини 3 в місцях маркування вертикально встановлюють та кріплять утримувачі 4, які можуть бути виготовлені, наприклад, з дроту (рисунок 4.14, б). Діаметр дроту вибирається з тих міркувань, що дріт не повинен повністю розплавлятися при заливці та подальшій кристалізації рідкого металу основи.

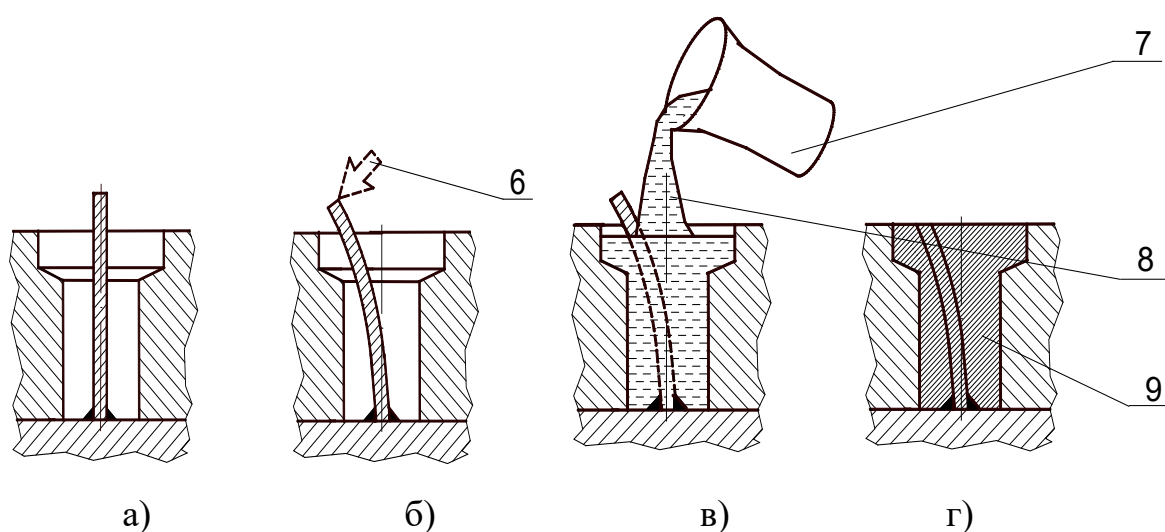


Рис. 4.15 - Встановлення пластини основи на робочу пластину (а), згинання кожного утримуючого елемента у межах технологічного отвору (б), заливка металу основи в кожний технологічний отвір (в) та створення монолітної пластини основи після затвердіння залитого розплаву і зачищення цієї пластини (г)

При цьому допускається часткове оплавлення цього елемента. Експериментальні дослідження показують, що дріт діаметром 1,5...4,0 мм (в залежності від товщини пластини основи) відповідає таким вимогам. По довжині ж утримуючі елементи можуть бути декілька довшими товщини пластини основи (для зручності їх подальшого згинання). Прикріплення утримуючого елемента 4 до поверхні робочої пластини 3 може бути виконане за допомогою, наприклад, електродугової зварки плавким електродом 5. Для цього нижні частини утримувачів надійно приварюються до поверхні робочої пластини 3. Режими зварювання підбирають такими,

щоб внутрішня поверхня робочої пластини розплавлялась не більше, ніж на половину її товщини. Це необхідно, щоб протилежна (експлуатаційна) поверхня робочої пластини не псувалась. Можлива лише поява на ній кольорів мінливості.

Пластину основи 1 встановлюють на робочу пластину 3 ширшою частиною технологічного отвору 2 назовні так, щоб утримуючі елементи зайшли в технологічні отвори та тимчасово скріплюють пластини 1 та 3 між собою, наприклад, за допомогою струбцин (рисунок 4.15, а). Для забезпечення неможливості виходу утримувачів з технологічних отворів після заливки, кристалізації та твердіння рідкого металу основи, до утримуючих елементів потрібно прикласти зусилля б для їх згинання в межах технологічних отворів 2 (рисунок 4.15, б). Це можна здійснити, наприклад, за допомогою молотка. При цьому форма зігнутого утримувача не повинна заважати переміщенню рідкого металу основи по всьому об'єму технологічного отвору при заливці.

За допомогою засобу для заливки розплавленого металу 7 (наприклад, невеликого тигля) рідкий метал основи 8 заливають в кожний технологічний отвір 2 так, щоб цей метал заповнював отвір 2 врівень з поверхнею пластини основи 1 (рисунок 4.15, в). Після кристалізації та затвердіння рідкого металу в кожному технологічному отворі отримують надійне з'єднання 9 пластин біметалу (рисунок 4.15, г). Дійсно, приварені до робочої пластини та закристалізовані в пластині основи утримуючі елементи разом зі ступінчатою формою технологічних отворів забезпечують це. В кінці напливи металу в місцях технологічних отворів можна зачистити, наприклад, шліфуванням.

Кількість потрібних утримуючих елементів визначається розмірами біметалу, що виготовляється. При цьому було встановлено, що утримувачі потрібно закріпляти на поверхні робочої пластини на відстані 50...100 мм один від одного.

Таким чином, пристрій для ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів істотно розширює можливості свого застосування в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення робочої пластини в процесі подальшого використання біметалів.

Приклад отримання алюмо-сталевих біметалів з використанням ливарного процесу та закріплення утримуючих елементів при використанні потужних джерел енергії. Після заливки та зачищення такий біметал має привабливий вигляд при надійному зчепленні його пластин (рисунок 2.4.16).

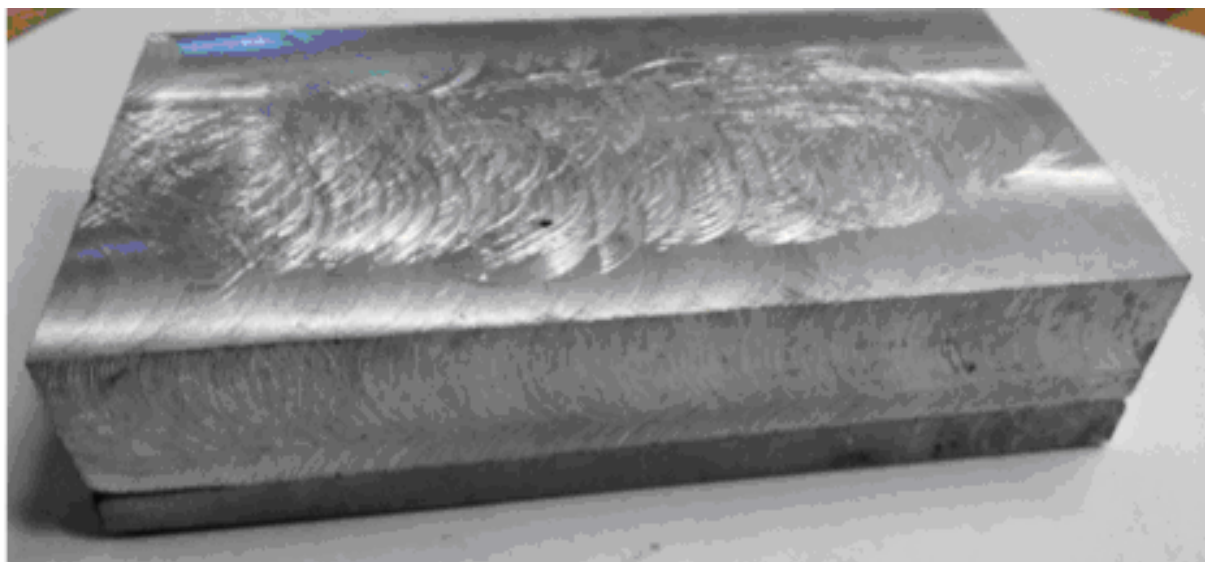


Рис. 4.16 - Пластина алюмо-сталевого біметалу, отриманого з використанням ливарного процесу та закріплення утримуючих елементів при використанні потужних джерел енергії

5. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ ЗГІДНО ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБОК У ВИРОБНИЦТВО

5.1 Складові для ефективності розробки проектів виготовлення біметалів

Найбільшої потреби для різних галузей промисловості знаходять біметали, в яких робоча поверхня виконана із неіржавіючої сталі, а підложка для кріплення біметалів для отримання виробів потрібних розмірів та форми – із звичайної конструкційної сталі. Нижче приведена табл. 5.1 техніко-економічних показників при виготовленні 1 кв.м біметалів (неіржавіюча –

Таблиця 5.1 - Техніко-економічні показники виготовленні 1 кв.м біметалів

Метал	Товщина	Вартість 1 кв.м сталі, грн.		
		Україна	Польща	Німеччина
Неірж. шар	2	858	3900	5616
Констр.шар	8	561,6	561,6	561,6
Біметал	10	1428,6	4470,6	6186,6
Еквів.неірж.	10	4290	19500	28080
Екон.ефект		2861,4	15094,4	21893,4
Неірж. шар	3	1287	5850	8424
Констр.шар	10	702	702	702
Біметал	13	1998	6552	9126
Еквів.неірж.	13	5577	25350	36504
Екон.ефект		3579	18798	27378
Неірж. шар	4	1716	7800	11232
Констр.шар	20	1404	1404	1404
Біметал	24	3120	9204	12636
Еквів.неірж.	25	10296	46800	67392
Екон.ефект		7176	37596	54756

конструкційна сталь) різної товщини в порівнянні з застосуванням неіржавіючої сталі еквівалентної товщини для різноманітних країн – виробників таких матеріалів.

Із приведеної таблиці видно, що, наприклад, для виготовлення біметалу товщиною 10 мм економія складає від майже 4,5 тис. грн. до 28 тис. грн. в залежності від країни-виробника металів. Якщо ж товщина біметалу становитиме 25 мм, то такі показники зростуть відповідно від 7 тис. до майже 55 тис. при виготовленні всього 1 м² біметалу. Зрозуміло, що при виготовленні значних по розмірам біметалів (в промисловості є велика потреба в біметалах 1х2,5 м, 2х3 м і, навіть 3х5 м) великих партій економічна ефективність може складати мільйони гривень.

5.2 Реалізація проекту виготовлення біметалів на ринку «Startup»

Проект по відкриттю підприємства по виготовленню біметалічних листів з попередньою підготовкою поверхні основи біметалу

Постановка проблеми: відкрити підприємство, яке буде виготовляти біметалічні листи великих розмірів, за технологією : спосіб виготовлення біметалів лазерно-ливарним методом з попередньою підготовкою поверхні основи біметалу.

Маркетингове дослідження.

- Так як технологія є новаторською, тому на ринку поки нема пропозицій продажу зразків даної продукції.
- Можна оцінити економічну вигоду при закупці матеріалів (без врахування витрат на сам процес виготовлення біметалу) у порівнянні із листами нержавіючої сталі тієї ж товщини, що і листи отриманого біметалу.
- Для виготовлення біметалевих листів одного метру в довжину і півтора в ширину треба один верстат потужністю 0,5 – 1 кВт вартістю до 50

000\$, укомплектований додатково ванною для розливки рідкого металу та іншими матеріалами, що необхідні для виробництва.

- При цьому бачимо, що затрати у порівнянні з лазерними верстатами потужністю від 2 до 5 кВт вартістю майже 500 000 \$, які використовуються для реалізації традиційної технології лазерно-ливарного виготовлення біметалів, на порядок менші.

Оцінка прибуткової вигоди

Для оцінки проводились розрахунки вартості виготовлення одного листа біметалу. Для виготовлення одного модернізованого комплексу, потрібен один лазерний верстат потужністю 0,5 – 1 кВт вартістю до 50 000\$ та ківш чайникової форми до ~1000\$ та інші розхідні матеріали для виробництва листів біметалу.

Для установки обладнання та керуванням комплексом потрібен один спеціаліст, заробітня плата якого без оподаткування 63 грн. за годину, а з урахуванням податку (+22%), приблизно матимемо 90 грн. 8 годинний робочий день дає: 720 гривень.

Додаткові матеріали для виробництва: ~ 3000 грн.

Транспортні послуги (наприклад, автомобіль «Газель»): ~ 400 грн.

Один вантажник: ~ 80 грн/год.

Бізнес план (табл. 5.2).

Спочатку приміщення буде орендуватись, а з часом вивільнення грошей повністю викупиться.

Команда проекту: керівник підприємства, інженер по обладнанню, бухгалтер, завгосп, робітник.

Таблиця 5.2 – Час виконання по тижням

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1				Час на виконання, тижні										
2	Вид роботи	Відповідальний		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	Реєстрація юр. особи	Хаєцька												
4	Оренда приміщення	Хаєцька												
5	Ремонт приміщення	Хаєцька												
6	Закупка устаткування	Хаєцька												
7	Закупка матеріалів	Хаєцька												
8	Налаштування виробництва	Хаєцька												
9	Пробний період випуску продкції	Хаєцька												
10														
11														
12														
13		Сума, USD		80	820	800	1000	500	800	1150	600	600	200	100
14														
15														

Кошторис і час початку роботи.

По приблизним підрахункам кошторис складає $51000\$ + 30\%$ (накладні затрати) = 66 300 \$.

Орієнтовний час запуску підприємства: 11 тижнів.

Проект по відкриттю підприємства по виготовленню біметалічних листів при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії.

Постановка проблеми.

Відкрити підприємство по виготовленню біметалічних листів, які будуть складатись із х/к або г/к листів сталей основи та листами нержавіючих сталей в якості робочого шару за технологією : спосіб виготовлення біметалів при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії.

Маркетингове дослідження.

- Так як технологія є новаторською, тому на ринку поки нема пропозицій продажу зразків даної продукції.
- Можна оцінити економічну вигоду при закупці матеріалів (без врахування витрат на сам процес виготовлення біметалу) у порівнянні із листами нержавіючої сталі тієї ж товщини, що і листи отриманого біметалу.

- Найбільш економічно і технічно доцільно виготовляти біметали товщиною 4 мм і більше.

- Так для виготовлення біметалу товщиною 4 мм, треба лист х/к або г/к чорнових сталей товщиною 2 мм розмірами 1250*2500, ціна - 980 грн. Лист нержавійки 2*1250*2500, ціна - 4200.

- Лист нержавіючої сталі 4*1250*2500 , ціна 9900.

- Прибуток на матеріалах $9900 - (4200 + 980) = 4720$ грн!

Оцінка прибуткової вигоди.

Для оцінки будуть проводились розрахунки для виготовлення одного листа біметалу.

Один лист х/к або г/к сталей повинен мати отвори діаметром 6 мм із кроком 50 мм тоді на один лист розмірами 1250*2500*2 припадає 1250 отворів довжина їх окружності $6\pi \cdot 10^{-3}$ м, загальна погонна довжина оброблюваних отворів 24 м. Різка лазером 1 пог. м в Києві - 15 грн. В результаті маємо: $24 \cdot 15 = 360$ грн. (за обробку одного листа основи).

Для з'єднання листів треба один зварювальник, його оплата складає 63 грн/год + 22% податків. В результаті отримуємо ≈ 90 грн.

Для кінцевої обробки потрібен слюсар з оплатою ~ 80 грн/год.

Витратні матеріали (електроди, шліфувальні круги, засоби індивідуального захисту працівників (2 пари рукавиць) – 40 грн , 2 пари біруш – 30 грн , 1,5 кг електродів – 40 грн , 5 шліфувальних кругів - 100 грн.

Транспортні послуги 400 грн («Газель»).

Один вантажник ~ 80 грн.

Разом будемо мати такі витрати на виготовлення одного листа біметалу – $360 + 90 + 80 + 40 + 30 + 40 + 100 + 14 + 400 + 80 = 1230$ грн.

Оскільки прибуток на матеріалах складає 4720 грн , то $4720 - 1150 = 3486$ грн – орієнтовний прибуток. Щоб отримати попит на нашу продукцію можна пожертвувати часткою прибутку для здешевлення кінцевої продукції

на ~400...500 грн. Тоді чистий прибуток буде складати ~3000 грн. при виготовленні одного листа біметалу.

Бізнес план

Спочатку приміщення буде орендуватись, а з часом вивільнення грошей повністю викупиться (табл. 5.3).

Команда проекту: керівник підприємства, інженер по обладнанню, бухгалтер, завгосп, робітник.

Таблиця 5.3 – Час на виконання по тижням

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1			Час на виконання по порядку, тижні										
2	Вид роботи	Відповідальний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	Реєстрація юр. Особи	Корнійчук											
4	Оренда приміщення	Корнійчук											
5	Ремонт приміщення	Осипенко, ф.підрядник											
6	Закупка обладнання	Осипенко											
7	Закупка матеріалів	Осипенко											
8	Настройка виробництва	Осипенко											
9	Пробний період випуску продукції	Осипенко											
10													
11													
12													
13		Сума, USD	75	825	750	1000	500	800	1100	600	600	200	100
14													
15													
16													
17													
18													

Кошторис і час початку роботи.

По приблизним підрахункам кошторис складає 6550 USD + 30 % (непередбачувані затрати) = 8515 USD.

Орієнтовний час запуску підприємства: 11 тижнів.

5.3 Рекомендації по впровадженню технології виготовлення біметалів з використанням лазерного випромінювання та інших потужних джерел енергії

Для впровадження розроблених технологій в різноманітних галузях виробництва необхідно здійснити наступні підготовчі техніко-економічні дії, а саме:

- враховуючи, що реалізація процесу отримання біметалів лазерно-ливарним способом по традиційній схемі потребує значних коштів на придбання потужного лазерного устаткування, необхідно ретельно провести аналіз існуючих лазерних комплексів з метою встановлення оптимального співвідношення «потужність – ціна»;
- необхідна розробка або придбання вже існуючої оснастки для реалізації сканування лазерного випромінювання по досить великих площах обробки;
- потрібне проектування або підбір компактної ливарної системи для реалізації технології лазерно-ливарного виготовлення біметалів;
- слід виконати необхідні конструкторські розробки по інтегруванню ливарної системи в лазерний технологічний комплекс;
- виходячи з необхідності синхронізації переміщень лазерного променя та заготовки під заливку, потрібно зробити необхідне корегування програми руху координатного столу комплексу;
- необхідний підбір допоміжного обладнання (наприклад, відрубного, шліфувального та ін.) та персоналу для отримання листів біметалу з потрібними споживчими характеристиками;
- при реалізації концепції отримання біметалів лазерно-ливарним методом з попередньою підготовкою поверхні основи біметалу необхідне корегування оптимального співвідношення «потужність –

ціна» в сторону значного зменшення потужності лазерного обладнання та як результат – його ціни;

- при реалізації методу виготовлення біметалів при з'єднанні їх пластин потужним джерелом енергії виникає потреба в придбанні стандартного обладнання для електродугового зварювання, контактного зварювання та розробка спеціальних джерел для допоміжного розігріву складових пластин біметалу;
- для виготовлення гнутих біметалів необхідний відповідний підбір потрібного пресового обладнання для забезпечення необхідних зусиль по згинанню заготовок під біметал;
- виготовлення полегшених біметалів має потребу в підборі та попередній обробці складових пластини основи. Це можуть бути, навіть, відходи пресового виробництва або відрізані від труби кільцеві заготовки;
- необхідно провести попередню економічну оцінку вибраного методу виробництва біметалічних матеріалів по встановленню економії впровадження біметалу замість суцільного металу з тими ж експлуатаційними параметрами та відносно економічну вигоду між різними іншими способами отримання цих матеріалів. При цьому важливо встановити не тільки самоокупність витрат, але й час на реалізацію технології «під ключ».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз способів виготовлення біметалів показав, що на сьогодні найбільше розповсюдження у промисловості набули способи обробки тиском, зварювання вибухом, електрошлакового наплавлення, технології виготовлення SWIP листів, які мають ряд недоліків стосовно якості з'єднань та відтворюваності результатів, продуктивності, собівартості, автоматизації й таке інше.

2. Вперше розроблено новий високоефективний процес виготовлення біметалів, який базується на комплексному використанні енергії лазерного випромінювання і енергії індуковано електромагнітного поля. Запропоновано оригінальні схеми його організації, відповідно з якими лазерне випромінювання застосовується для розплавлення поверхневого шару функціональної складової біметалу на глибину 30-50 мкм, одночасно з чим на його поверхню з певною витратою із індукційного нагрівача спрямовується розплав другої конструктивної складової, або навпаки (патент України №96621, 96622).

3. Теоретичний аналіз лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів показав, що умова існування постійної зони розплаву і її розмірів залежить від теплофізичних характеристик матеріалу і саме вона є головним чинником, що визначає швидкість і закон переміщення лазерного пучка, його потужність, геометричні розміри і розподіл інтенсивності випромінювання в зоні фокусування. Управління процесом доцільно здійснювати комплексною зміною параметрів сканування, потужності лазерного випромінювання та висоти напірного стовпа розплаву.

4. Керування лазерно-ливарним процесом доцільно здійснювати комплексною зміною параметрів процесу. Отримані математичні залежності, що дозволяють їх визначити у залежності від заданих розмірних характеристик біметалу. Для виготовлення біметалу «нержавіюча сталь

12X18H10T, 2 мм – сталь Ст.3, 15 мм» шириною 50 мм: потужність випромінювання $P=8.5\text{кВт}$, амплітуда сканування $A=50\text{мм}$, частота сканування $f=200\text{Гц}$, швидкість переміщення основи $V_x=1\text{м/хв}$, товщина наплавленого шару $k=2\text{мм}$, висоті стовпа розплаву $h=7.6\text{мм}$.

5. Головним напрямком удосконалення лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів є створення надійних оптичних систем, які дозволяють концентрувати потужні лазерні пучки й отримувати в площині фокусування прямокутно - Гаусовий розподіл інтенсивності випромінювання, параметри якого можна змінювати в широкому діапазоні значень.

6. Теоретичне та експериментальне вивчення процесу отримання біметалів лазерно-ливарним способом по розробленій і дослідженій схемі показало цілковиту можливість реалізації такої технології для забезпечення надійного з'єднання між шарами біметалів. Однак реалізація такого підходу потребує значних коштів на придбання потужного лазерного устаткування.

7. Доведено, що при створенні на поверхні функціональної складової біметалу виступів певної форми, площі у поперечному перерізі та висоти і наступному одночасному нагріванні їх поверхонь розплавом конструкційної складової, внаслідок зміни коефіцієнту теплопровідності по висоті виступів і обумовленого цим накопиченням теплової енергії у вершин, відбувається їх розплавлення. Внаслідок цього утворюється розчин функціональної і конструкційної складових біметалу, забезпечуючи між ними металургійний зв'язок. Спосіб дозволяє отримувати листи великих розмірів (патент України № 97980).

8. Моделюванням і комплексом експериментальних досліджень було визначено області зміни параметрів макрорельєфу, при якому в процесі заливання другого компонента біметалу можна отримувати стабільне з'єднання двох складових, та можливість управління для вибраних матеріалів механізмом з'єднання і його міцністю, продуктивністю і

собівартістю процесу. Розроблено методику розрахунку конструкції і параметрів ливарної системи.

9. Встановлено, що при реалізації способу заливки конструктивної складової біметалу на поверхню функціональної, що має спеціальний макрорельєф, для забезпечення гарантованого їх сплавлення і утворення між ними металургійного зв'язку заливку потрібно здійснювати одночасно по всій ширині функціональної складової через щілину відповідної ширини і певного розміру в напрямку переміщенні функціональної складової.

10. Розроблено новий спосіб виготовлення гнутих біметалів при використанні для з'єднання пластин потужного джерела енергії. Це дає можливість не тільки створювати гнуті біметали, але й отримувати замкнуті контури при значному зменшенні витрат на їх виготовлення у порівнянні зі з'єднаннями отриманих зварюванням.

11. Розроблено і реалізовано ряд оригінальних способів виготовлення біметалів шляхом з'єднання окремих ділянок їх складових зварюванням з використанням потужних джерел енергії, або виготовленням спеціальних утримуючих елементів і заливкою розплавом другої складової біметалу. Розроблені процеси дозволяють забезпечувати потрібну силу зчеплення між складовими біметалу при мінімальній собівартості процесу.

12. Теоретично обґрунтовано та практично перевірено можливість отримання надійного з'єднання при реалізації технології виготовлення алюмо-стальних біметалів, на які є висока потреба в специфічних виробництвах. Розроблено декілька варіантів реалізації технології: при використанні як лазерно-ливарних процесів так і комбінованих – зварювання і ливарних.

13. Розроблено ряд технологій виготовлення полегшених біметалів, що забезпечують значну економію матеріалів, суттєве зменшення собівартості їх виготовлення при забезпеченні потрібної міцності зчеплення складових.

14. Економічна доцільність застосування запропонованих методів виробництва біметалічних матеріалів полягає в значній і раціональній економії матеріальних і енергетичних ресурсів, зменшенні питомої вартості використаних виробничих площ і трудовитрат, можливості оптимізаційного вибору найбільш ефективного способу виготовлення біметалів. Показано, що витрати часу на реалізацію згаданих технологій у залежності від складності становлять від 3-х до 12 місяців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горынин, И. В. Биметаллические материалы: / за ред. И. В. Г. В. Я. Остренко. Ленинград: Судостроение, 1984. 272с.
2. Т.И. Титова, И.Ф. Семернина, С. А. Б. Биметалл 2,25Сг-1Мо + 08Х18Н10Т для сосудов давления, эксплуатируемых в условиях климатического холода: *Сборник докладов 6 международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике»*, СПб, 04. С. 103–104.
3. Е.Х. Шахпазов, Родионова И.Г. А.И. Зайцев, А. А. П. Двухслойные стали нового поколения для сосудов и аппаратов нефтехимических производств. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. Vol. №11. С. 42–53.
4. Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., А. Т. Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении. Современные проблемы науки и образования. 2015. Vol. № 2-1.
5. Еремичев, А. А. Кинетика коррозионно-усталостного разрушения сварных соединений биметаллических котлов для варки целлюлозы. Сварочное производство. 1992. No. 4. С. 12.
6. Гудремон, Э. Специальные стали: Рипол Классик, 2013.
7. Сидоров И.И. Биметаллы, изготовленные сваркой взрывом для судостроения и морской техники / 2001. 288–302 р.
8. Зайцев, А. И., Родионова, И. Г., Амежнов, А. В., та ін. Современные направления развития производства и применения двухслойных сталей. Технология колесных и гусеничных машин. 2013. No. 3. С. 17–22.
9. Родионова, И. Г. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей. 2011.
10. Реформатская, И. И., Завьялов, В. В., Родионова, И. Г. Перспективы

- использования биметаллических труб на промысловых нефтегазопроводах Западной Сибири. Защита металлов. 2000. Vol. 36, No. 1. С. 51.
11. Зайцев, А. И., Родионова, И. Г., Быков, А. А., та ін. Исследование свойств и служебных характеристик биметаллических материалов с наноструктурированным износостойким плакирующим слоем. Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. No. 2. С. 70–75.
 12. Л.Г. Качурин, В.Я. Андросенко, В.Б. Логинов, В.Ф. Псаломщиков, К.К. Ованесьян, А. А. Х. Генерация электромагнитного поля при разломе ледя-ных покровов акваторий. Физика атмосферы и океана. Изв. АН СССР. 1988. Vol. №10 (Т.24). С. 1113–1116.
 13. Герасименко, Ю. С. Учет структуры двойного электрического слоя в методе поляризационного сопротивления. Защита металлов. 1984. Vol. 20. С. 898–907.
 14. Герасименко, Ю. С., Білоусова, Н. А., Васильєв, Г. С., та ін. Развитие электрохимических методов измерения скорости коррозии металлов научной школы профессора ЛИ Антропова. Наукові вісті Національного технічного університету України" Київський політехнічний інститут". 2013. No. 6. С. 89–102.
 15. Л.Г. Качурин, В.Я. Андросенко, В.Б. Логинов, К.К. Ованесьян, В.Ф. Псаломщиков, А. А. Х. Физико-химические процессы при механическом взаимодействии металла со льдом. Технология судостроения. 1990. Vol. №3. С. 22–24.
 16. Голованенко, С. А. Сварка прокаткой биметаллов. М.: Металлургия. 1977. Vol. 160. С. 88.
 17. Макаров, А. В., Коршунов, Л. Г., Солодова, И. Л., та ін. Твердость, теплостойкость и трибологические свойства закаленных углеродистых сталей, упрочненных в условиях трения скольжения. Деформация и

- разрушение материалов. 2006. No. 4. С. 26–33.
18. В.М.Счастливцев, А.В. Макаров, Т. . Т. Влияние структуры на износостойкость заэвтектоидных углеродистых сталей после изотермического γ - α -превращения. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. 2004. Vol. №4(8). С. 73–81.
 19. О.Г. Соколов, В.А. Малышевский, Ю.Л. Легостаев, Л. В. Г. Высокопрочные плакированные стали, стойкие к коррозионно-эрозионному износу. Прогрессивные материалы и технологии. 1993. Vol. №1. С. 12–13.
 20. Ю.Л. Легостаев, Г.Д. Мотовилина и др. Особенности структуры высокопрочной плакированной стали. Вопросы материаловедения. 1998. Vol. Выпуск 2(1). С. 5–11.
 21. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов. Справочник. — 5-е изд. перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1990. — 320 с.
 22. Дятлов В.Н. Коррозионная стойкость металлов и сплавов / справочник В. Н. Дятлова. // - Изд. 2-е, переработанное и дополненное. - Москва: Машиностроение. - 1964. – 350 с.
 23. Хрущов М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. М.Л.: Изд. АН СССР, 1946. 160 с.
 24. Хрущев, М. М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин / М. М. Хрущев // Трение и износ в машинах. Вып. 3. - М. : Изд-во АН СССР, 1953.-С. 5-17.
 25. Голованенко С.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов. — «Металлургия», М., 1966. — 304 с.
 26. Тарнавский А.Л. и др. Биметаллическая проволока, Metallurg-издат., 1963 - 124 с.
 27. Раков, К. М. Новые биметаллы для подшипников скольжения / К. М.

- Раков, Н. А. Буше, А. С. Гуляев // Достижения науки в производстве. М. : Транспорт, 1967.- С. 19-27.
28. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов: (локальные коррозионные процессы): Контактная коррозия. Щелевая коррозия. Питтинговая коррозия. / И. Л. Розенфельд. // - Москва: Металлургия. - 1969. - 448 с.
 29. Шмидт, М., Курынцев, С. В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом. Автоматическая сварка. 2014. No. 4. С. 47–51.
 30. Влияние основных технологических параметров на прочность соединения слоев биметалла алюминий-медь / Загорянский В.Г. // Металл и литье Украины. — 2014. — № 11. — С. 30-35.
 31. А. П. Суровцев, О. Н. Б. Оценка качества соединения слоев в биметалле. Автоматическая сварка. 1989. Vol. № 3. С. 27–32.
 32. Смирнов, С. В., Веретенникова, И. А., Вичужанин, Д. И. Моделирование расслоения при пластической деформации биметаллического материала, полученного сваркой взрывом. Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Vol. 7, No. 4. С. 398–411.
 33. ДСТУ EN 12668-2:2015 Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2.
 34. Красулин, Ю. Л., Шоршоров, М. Х. О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии. Физика и химия обработки материалов. 1967. No. 1. С. 89–97.
 35. Калинин, Г. Ю., Легостаев, Ю. Л., Малышевский, В. А., та ін. Новая коррозионностойкая азотсодержащая аустенитная сталь НС– 5Т. Вопросы материаловедения. 1996. No. 3. С. 5.
 36. Красулин, Ю. Л. Дислокации как активные центры в топокхимических реакциях. Теоретическая и экспериментальная химия. 1967. Vol. 3, No. 1. С. 58–62.

37. Ю.Л. Легостаев, В.А. Малышевский, Г.Д. Мотовилина, Т. Г. С. Высокопрочная плакированная сталь для работы в экстремальных условиях. Особенности строения переходной зоны. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2004. Vol. Вып.21. С. 98–109.
38. Колмаков, А. В., et al. "Изготовление сталебронзового биметалла холодным плакированием." // Вестник Тамбовского государственного технического университета 9.4 (2003). С. 698- 703.
39. Лехов, Олег Степанович, et al. "Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос." Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова 4 (48) (2014) – С. 69 -73.
40. Громов Н.П, Новые термобиметаллы // II Вестник электропромышленности.1956,-№8.-С. 23-26.
41. Астров, Е.И. Новые методы производства биметаллов / Е.И.Астров, Ю.Ф.Дорошев // Научно-технический сборник (тр. ин-та) / Горьк. совнархоз; ПТНИИ.- Горький, 1960.- Вып. 3 (5).- С.44-47.
42. Астров, Е.И. Получение биметаллов методом непрерывной разливки / Е.И.Астров, Ю.Ф.Дорошев // Научно-технический сборник (тр. ин-та) / Горьк. совнархоз ; ПТНИИ.- Горький, 1960.- Вып. 2 (4).- С.76-80.
43. Астров, Е.И. Физико-химические основы процесса схватывания при производстве плакированных металлов // Производство и применение биметаллов и листов с защитными покрытиями (по материалам науч.-техн. конф.) / Центр. ин-т информации черной металлургии.- М., 1962.- С.8-18.
44. Нехендзи Ю. А. Стальное литьё / – М: Металлургиздат, 1948. – 766 с..
45. Патон Б. Е., (под ред.) Электрошлаковая сварка и наплавка / Москва: Машиностроение, 1980. 511с.
46. Меандров Л.В. Двухслойные коррозионно-стойкие стали за рубежом:

Москва: Металлургия, 1970. 232с.

47. Шаповалов, К. П., Белинский, В. А., Мерзляков, А. Е., та ін. Электрошлаковая сварка крупногабаритной станины прессы. Автоматическая сварка. 2016. — № 8 (755). — С. 43-46.
48. Патент 108178 UA, МПК: B23K 9/04, B22D 19/00, B23K 26/00 Пристрій для плазмового наплавлення циліндричних деталей сільськогосподарської техніки / Слинько, В. Г., Горб, О. О., Аранчій, В. І., та ін. - № u 2015 12251; заявл. 10.12.2015; опубл. 11.07.2016, Бюл.№ 13, 2016 р.
49. Дьяченко, И. О. Анализ способов наплавки. Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2015. No. 3. С. 92–96.
50. Прасолов, Є. Я., Беловол, С. А., Багмет, С. О., та ін. Підвищення зносостійкості деталей шнека шляхом плазмового наплавлення порошковими матеріалами. Технологический аудит и резервы производства. 2015. No. 5 (7). С. 54–57.
51. Крохалёв, А. В., Харламов, В. О., Кузьмин, С. В., та ін. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Vol. 4, No. 5. С. 117–122.
52. Кузьмин, С. В., Лысак, В. И., Хаустов, С. В., та ін. Об основных принципах проектирования режимов сварки взрывом металлических слоистых композитов. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2006. No. 9. С. 4–15.
53. В.И. Лысак, С. В. К. Сварка взрывом: М.: Машиностроение, 2005. 544с.
54. Шленский, П. С., Добрушин, Л. Д., Фадеев, Ю. И., та ін. Камеры для сварки металлов взрывом (Обзор). Автоматическая сварка. 2011. No. 5. С. 57–61.

55. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением // М.: Машиностроение. – 1986. – С. 280.
56. ДСТУ EN ISO 16810:2016 Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Загальні вимоги (EN ISO 16810:2014, IDT; ISO 16810:2012, IDT): ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2016.
57. Меркин, Б. В., Штернин, Л. А. Особенности формирования соединения при сварке трением материалов с резко отличающимися свойствами / Б.В. Меркин, Л.А. Штернин // ФизХОМ. – 1972. – №5. – С. 101–104.
58. Лебедев, В. К., Черненко, И. А., Михальски, Р. Сварка трением: справочник. // Л.: Машиностроение. 1987. С. 27–42.
59. Зяхор, И. В., Кучук-Яценко, С. И. Особенности формирования соединений меди с алюминием при сварке трением / И.В. Зяхор, С.И. Кучук-Яценко // Автоматическая сварка. — 2001. — № 9 (582). — С. 27-32.
60. Зяхор, И. В. Современное оборудование для сварки трением / И.В. Зяхор // Автоматическая сварка. — 2001. — № 7 (580). — С. 48-52.
61. Белый, А. И. Влияние основных технологических параметров плазменной наплавки на свойства композиционного наплавленного металла. Автоматическая сварка. 2010. № 6. С. 30–32.
62. Рябцев, И. А., Кондратьев, И. А., Васильев, В. Г., та ін. Исследование структуры и эксплуатационных свойств наплавленного металла для восстановления и упрочнения прокатных валков / И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, В.Г. Васильев, В.А. Жданов, А.А. Бабинец // Автоматическая сварка. — 2010. — № 7 (687). — С. 14-18.
63. Göbel, G., Kaspar, J., Herrmannsdörfer, T., та ін. Insights into intermetallic phases on pulse welded dissimilar metal joints // Proceedings 4th International Conference on High Speed Forming. 2010. Columbus, Ohio, USA. – pp. 127 – 136.

64. Demonie, W., Faes, K., Waele, W. De. Influence of process parameters on the weld quality of dissimilar Cu-Al magnetic pulse welded sheets. *International Journal Sustainable Construction & Design*. 2016. Vol. 7, No. 1. С. 8.
65. Wang, P., Chen, X., Pan, Q., та ін. Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87, No. 9–12. С. 3081–3090.
66. Рыкалин, Н. Н., Углов, А. А., Зуев, И. В., та ін. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. м.: Машиностроение. 1985. Vol. 496. С. 3.
67. Григорьянц, А. Г., Шиганов, И. Н., Мисюров, А. И. Технологические процессы лазерной обработки: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего , 2008. С. 663.
68. Khan, U., Khan, N. Z., Gulati, J. Ultrasonic Welding of Bi-Metals: Optimizing Process Parameters for Maximum Tensile-Shear Strength and Plasticity of Welds. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 173. С. 1447–1454.
69. Obielodan, J. O. Fabrication of multi-material structures using ultrasonic consolidation and laser-engineered net shaping / Dissertation, Utah State University. Logan, Utah, USA. 2010, - P. 216.
70. Шмидт, М., Курынцев, С. В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом. *Автоматическая сварка*. 2014. No. 4. С. 47–51.
71. Астров Е.И., Скворцов А.А., Сидоров С.П., Дорошев Ю.Ф. Получение биметаллических заготовок из жидких компонентов на установке непрерывной разливки. - Бюллетень института. Черметинформация 1967, №8, с.18-20.
72. Астров, Е.И. Физико-химические основы процесса схватывания при производстве плакированных металлов // Производство и применение биметаллов и листов с защитными покрытиями (по материалам науч.-техн. конф.) / Центр. ин-т информации черной металлургии.- М., 1962.-

С.8-18.

73. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко и др. // Л.: «Судостроение», 1984.-272 с.
74. Голованенко, С.А. Сварка прокаткой биметаллов / С.А. Голованенко. - М.: «Металлургия», 1977. 160 с.
75. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов- М.: Машиностроение. 1989.-300 с.
76. Григорьянц А.Г., Сафронов А.Н. Лазерная техника и технология.-Кн.6: Методы поверхностной лазерной обработки. – М.:Высшая школа, 1988. – 159 с.
77. Дмитриев, Л.Н., Кузнецов Е.В. Биметаллы // Пермь: Звезда.–1991.–414 с.
78. Дорошев Ю.Ф.Исследование и разработка основных параметров процесса получения биметаллов методом непрерывной разливки. - Автореферат диссертации» Москва, 1968, 8с.
79. Каган, Э.С. Производство и исследование биметаллических листов / Э.С. Каган, Л.П. Белова // Тяжелое машиностроение. 1997. №4. - С. 66-67.
80. Крюков, Д.Б. Получение тонколистовых биметаллических материалов сваркой взрывом / Д.Б. Крюков, О.А. Беляев // -М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
81. Производство биметаллических труб и прутков / Под ред. В. Я. Остренко М.: Metallurgy, 1986. 240 с.
82. Производство биметаллов // Сборник трудов, выпуск 42. М.: Metallurgy, 1965. - 40 с.
83. Рыкалин Н.Н., Углов А.А.,Зуев И.В., Кокора А.Н., Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов М: Машиностроение, 1985., 496с.
84. Справочник по охране труда на промышленном предприятии / К. Я. Ткачук, Ф. И. Иванчук, Р. С. Сбарно, Л. Г. Степанов. // — К.: Техника,

1991. — 285 с.
85. Степанов А.Г., Сабарно Р.В. Техника безопасности при эксплуатации лазерных установок., К., Техника, 1989г., 109с.
 86. Чарухина, К.Е., Голованенко, С.А., Мастеров, В.А., Казаков, Н.Ф. Биметаллические соединения Текст. / К.Е. Чарухина, С.А. Голованенко, В.А. Мастеров, Н.Ф. Казаков.-М.:Металлургия. 1990.175с.
 - 87, Дорошев, Ю.Ф. Исследование технологического процесса и качества биметаллов, полученных методом непрерывного литья / Ю.Ф.Дорошев, Е.И.Астров / Труды института / ПТНИИ.- Горький, 1967.- Вып. 3 (22).- 23-32.
 88. Шаповалов В.М. Математическое моделирования процессов переноса / РПК «Политехник», 2005., 103с
 89. Штенников В.С. Центробежная электрошлаковая наплавка заготовок биметаллических подшипников скольжения. Сварочное производство Удмуртии / Под ред. В.С. Штенникова, В.П. Ильина : науч.-техн.сб. Ижевск : Изд-во ИжГТУ. 1997. С. 47-49.
 90. Юдин Е.Я. Белов С.В. Охрана труда в машиностроении. М., Машиностроение, 1983г., 432с.
 91. Виробництво біметалу від STEEL WORK [Електронний ресурс] / Офіційний сайт // ТОВ «Стіл Ворк». – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://steel-work.net/>.
 92. Comsol Multyphysics, Heating with a moving laser, 2008, , - С. 12.
 93. Головка Л.Ф., Романенко В.В. Автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів. - В зб. «XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 22-25 червня 2015 р., м.Одеса, Україна, - С. 121.
 94. Романенко В.В., Спаська О.О. Деякі підходи до реалізації процесу виготовлення біметалів. - В зб. «Тези доповідей загально університетської науково-технічної конференції молодих вчених та

- студентів, секція «Машинобудування», Київ, 2015, стор.58-59.
95. Головка Л.Ф., Романенко В.В. Теоретичний аналіз реалізації технології виробництва біметалів лазерно-ливарним методом. - В зб. «XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21-24 червня 2016 р., м.Одеса, Україна, - С. 265.
96. Романенко В.В. Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів. - В зб. «XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21-24 червня 2016 р., м.Одеса, Україна, - С. 241.
97. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Експериментальна оцінка можливості отримання біметалів лазерно-ливарним методом. - В зб. «XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21-24 червня 2016 р., м.Одеса, Україна, - С. 221.
98. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Особливості реалізації технології виробництва біметалів лазерно-ливарним методом. - В зб. «VII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 24-27 квітня 2017 р., м.Чернігів, Україна, - С. 188.
99. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Спосіб лазерно-ливарного виготовлення біметалів та характеристики отриманих біметалів - В зб. «VII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 24-27 квітня 2017 р., м.Чернігів, Україна, - С. 67.
100. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Теоретичне обґрунтування виготовлення біметалів ливарним методом з застосуванням лазерної розмірної обробки. - В зб. «XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та

- інженерна освіта», 29 червня-02 липня 2017 р., м.Київ, Україна, - С. 135.
101. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С. Нові високоефективні способи виготовлення біметалів з застосуванням концентрованих джерел енергії. - В зб. «XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня-02 липня 2017 р., м.Київ, Україна, - С. 127.
 102. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Хорошуля М.В., Сахно Р.І., Осипенко Т.М. Особливості технології виробництва біметалів лазерно-ливарним методом. - В зб. «VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”, 29 травня -2 червня 2017 р., м.Херсон, Україна, - С. 115.
 103. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Хорошуля М.В., Кривоногов Є.В. Фізико-технічні способи виготовлення біметалів. - В зб. «VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”, 29 травня - 2 червня 2017 р., м.Херсон, Україна, - С. 78.
 104. Романенко В.В., Осипенко Т.М. Деякі підходи до реалізації процесу виготовлення біметалів потужним джерелом енергії. - В зб. «Тези доповідей загально університетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, секція «Машинобудування», Київ, 31 травня 2017. // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології». - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. - С.31.
 105. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С. Особливості індукційного нагрівання при виготовленні біметалів лазерно-ливарним методом. – В зб. «IX Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості

- фахової освіти», 22.05.2018, м.Херсон, Україна, - С. 191.
106. Салій С.С., Головка Л.Ф., Блощин М.С., Романенко В.В. - Моделювання лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів. - В зб. «IX Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 22.05.2018, м.Херсон, Україна, - С. 184.
 107. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Виготовлення біметалів ливарним методом при застосуванні лазерної розмірної обробки. - В зб. «XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», 01.11.2017, м.Чернігів, Україна, - С. 54.
 108. Романенко В.В., Блощин М.С., Осипенко Т.М. Способи реалізації процесу виготовлення біметалів потужним джерелом енергії. - В зб. «XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», 01.11.2017, м.Чернігів, Україна, - С. 167.
 109. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С., Свічкарь І.В., Кірянова К.О. Застосування індукційного нагрівання при лазерно-ливарній технології виготовлення біметалів. - В зб. «VIII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 10.05.2018, м.Чернігів, Україна, - С. 115.
 110. Романенко В.В. Особливості реалізації технології виробництва алюмо-сталевих біметалів при з'єднанні пластин потужним джерелом енергії. - В зб. «VIII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 10.05.2018, м.Чернігів, Україна, - С. 138.
 111. Романенко В.В. Технологія виготовлення гнутих біметалів при з'єднанні пластин за допомогою потужного джерела енергії. - В зб.

- «VIII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 10.05.2018, м.Чернігів, Україна, - С. 145.
112. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Лазерно-ливарні процеси виготовлення біметалів. - В зб. «VIII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 10.05.2018, м.Чернігів, Україна, - С. 215.
113. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Високоєфективний спосіб отримання алюмо-сталевих біметалів з застосуванням концентрованих джерел енергії для з'єднанні їх пластин. - В зб. «XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 20.06.2018, м.Київ, Україна, - С. 116.
114. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Розробка нового підходу до виготовлення гнутих біметалів при використанні для з'єднання пластин потужного джерела енергії. - В зб. «XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 20.06.2018, м.Київ, Україна, - С. 124.
115. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С. Особливості конструювання ливарних систем при створенні біметалів лазерно-індукційним методом. - В зб. «XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 20.06.2018, м.Київ, Україна, - С. 75.
116. Романенко В.В., Хаєцька М.Є. Застосуванні лазерної розмірної обробки при виготовленні біметалів ливарним методом. – В зб. загально університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, секція «Машинобудування», 19.05.2018, КПІ, Київ, Україна, - С. 116.
117. Романенко В.В., Осипенко Т.М. Реалізації процесу виготовлення

біметалів потужним джерелом енергії. - В зб. загально університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, секція «Машинобудування», 19.05.2018, КПІ, Київ, Україна, - С. 44.

118. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С., Свічкарь І.В. Особливості формування вани розплаву лазерним випромінюванням при лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів. – В зб. Міжнародна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 03.06.2019, м. Херсон, Україна, - С. 91.
119. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С., Литвиненко О.А. Реалізації технологій виготовлення гнутих біметалів та біметалічних виробів кутового типу. - В зб. Міжнародна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 03.06.2019, м. Херсон, Україна, - С. 85.
120. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С., Свічкарь І.В.; Особливості формування перехідної зони при лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів. - В зб. Міжнародна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 03.06.2019, м. Херсон, Україна, - С. 62.
121. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Розробка пристрою для ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів. - В зб. IX міжнародна науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем", 15.05.2019, м. Чернігів, Україна, - С. 51.
122. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Виготовлення корозійностійких біметалів при використанні потужних джерел енергії. - В зб. IX міжнародна науково-практичної конференції "Комплексне

забезпечення якості технологічних процесів та систем", 15.05.2019, м. Чернігів, Україна, - С. 43.

123. Романенко В.В., Литвиненко О.А. Виготовлення гнутих біметалів та біметалічних виробів. - В зб. загально університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, секція «Машинобудування», 24.05.2019, КПП, Київ, Україна, - С. 23.
124. Патент № 96620 UA, B23D 19/00 Спосіб ливарного виготовлення біметалів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Лихошва В.П., Шатрава О.П. – № у 201409700 ; заявл. 04.09.2014 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3, 2015 р.
125. Патент № 96621 UA, B23K 26/352 (2014.01) Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Лихошва В.П., Шатрава О.П. – № у 201409701 ; заявл. 04.09.2014 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3, 2015 р.
126. Патент № 96622 UA, B23K 26/352 (2014.01) Автоматизований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Лихошва В.П., Шатрава О.П. – № у 201409702 ; заявл. 04.09.2014 ; опубл. 10.02., Бюл. № 3, 2015 р.
127. Патент № 97980 UA, B23K 11/20 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В. – № у 201412184 ; заявл. 11.11.2014 ; опубл. 10.02.2015 Бюл. № 7, 2015 р.
128. Патент № 98018 UA, B23K 11/20 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів контактним точковим зварюванням / Романенко В.В. – № у 201412627 ; заявл. 24.11.2014 ; опубл. 10.04.2015 Бюл. № 7, 2015 р.
129. Патент № 99311 UA, B23K 20/00 Спосіб виготовлення біметалів тиском з підігріванням / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В. – № у 201414089 ; заявл. 29.12.2014 ; опубл. 25.05.2015 Бюл. № 10, 2015 р.
130. Патент № 99312 UA, B23K 20/00 Спосіб виготовлення біметалів з підігрівом та подальшим стискуванням / Романенко В.В. – № у

- 201414090 ; заявл. 29.12.2014 ; опубл. 25.05.2015 Бюл. № 10, 2015 р.
131. Патент № 99323 UA, C22B 9/20 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів при зчепленні його пластин ливарним методом / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Лихошва В.П., Шатрава О.П. – № u 201414169 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 25.05.2015 Бюл. № 10, 2015 р.
132. Патент № 99339 UA, B23K 20/00 Спосіб виготовлення біметалів при підігріванні додаткової пластини та стискуванні основних пластин / Романенко В.В. – № u 201500079 ; заявл. 07.09.2015 ; опубл. 25.05.2015 Бюл. № 10, 2015 р.
133. Патент № 99342 UA, C22B 9/20 (2006.01), B22D 11/041 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів при зчепленні його пластин при заливці рідким металлом / Романенко В.В. – № u201500155 ; заявл. 12.01.2015 ; опубл. 25.05.2015 Бюл. № 10, 2015р.
134. Патент № 99372 UA, B22D 11/041 (2006.01), B23K 20/02 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів при зчепленні його пластин ливарним методом та подальшим стискуванням / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Лихошва В.П., Шатрава О.П.– № u 201500726; заявл. 29.01.2015 ; опубл. 25.05.2015 Бюл. № 10, 2015 р.
135. Патент № 101953 UA, B22D 19/00, C23C 6/00, B32B 7/00, B23K 20/04 (2006.01) Спосіб ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних пазів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Лихошва В.П., Шатрава О.П.– № u 201503246 ; заявл. 07.04.2015 ; опубл. 12.10.2015 Бюл. № 19, 2015 р.
136. Патент № 102030 UA, F16B 5/00, B23K 9/173 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням заглиблених технологічних отворів / Романенко В.В.; Блощин М.С.– № u 201503984 ; заявл. 27.04.2015 ; опубл. 12.10.2015 Бюл. № 19, 2015 р.
137. Патент № 102031 UA, F16B 5/00, B23K 9/173 (2006.01) Спосіб

- виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням технологічних пазів / Романенко В.В. – № у 201503986 ; заявл. 27.04.2015 ; опубл. 12.10.2015 Бюл. № 19, 2015 р.
138. Патент № 102053 UA, B23K 9/00 Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням плавким електродом з використанням технологічних отворів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В. – № у 201504182 ; заявл. 29.04.2015 ; опубл. 12.10.2015 Бюл. № 19, 2015 р.
139. Патент № 102085 UA, B23K 9/173 (2006.01), F16B 5/00 Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням неіржавіючим плавким електродом / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В. – № у 201504536 ; заявл. 12.05.2015 ; опубл. 12.10.2015 Бюл. № 19, 2015 р.
140. Патент № 102542 UA, B22D 25/00, B23K 20/00 Спосіб ливарного виготовлення біметалів при використанні технологічних отворів / Романенко В.В.; Спаська О. О. – № у 201502502 ; заявл. 20.03.2015 ; опубл. 10.11.2015 Бюл. № 21, 2015 р.
141. Патент № 102546 UA, B22D 19/00, B23D 19/08 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів при заливці різьбових отворів розплавленим металлом / Романенко В.В.; Романенко М.В. – № у 201502649 ; заявл. 23.03.2015 ; опубл. 10.11.2015 Бюл. № 21, 2015 р.
142. Патент № 104934 UA, B23K 9/173 (2006.01) Спосіб виготовлення полегшених біметалів електродуговим зварюванням / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Блощин М.С. – № у 201508630 ; заявл. 07.09.2015 ; опубл. 25.02.2016 Бюл. № 4, 2016 р.
143. Патент № 104935 UA, B23K 9/173 (2006.01) Спосіб виготовлення полегшених біметалів із виробничих відходів електродуговим зварюванням / Романенко В.В. – № у 201508631 ; заявл. 07.09.2015 ; опубл. 25.02.2016 Бюл. № 4, 2016 р.
144. Патент № 105014 UA, B23K 9/173 (2006.01) Спосіб виготовлення

- легких та дешевих біметалів електродуговим зварюванням / Романенко В.В.; Блощин М.С.— № у 201509672 ; заявл. 06.10.2015 ; опубл. 25.02.2016 Бюл. № 4, 2016 р.
145. Патент № 105338 UA, B23K 9/173 (2006.01) Спосіб виготовлення полегшених біметалів електродуговим зварюванням / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Кривцун І.В., Блощин М.С.— № у 201510026 ; заявл. 13.10.2015 ; опубл. 10.03.2016 Бюл. № 5, 2016 р.
146. Патент № 133083 UA, B23D 19/00, B23D 19/08 (2006.01) Пристрій для ливарного виготовлення біметалів з застосуванням утримуючих елементів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С.— № у 201809889 ; заявл. 04.10.2018 ; опубл. 25.03.2019 Бюл. № 6, 2019 р.
147. Патент № 133111 UA, B22D 19/16 (2006.01) Пристрій для ливарного виготовлення біметалічних матеріалів з застосуванням утримуючих елементів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С., Салій С.С. —№ у 201810064 ; заявл. 09.10.2018 ; опубл. 25.03.2019 Бюл. № 6, 2019 р.
148. Патент № 133173 UA, B23D 19/08 (2006.01) Спосіб ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С., Салій С.С. —№ у 201810447 ; заявл. 23.10.2018 ; 25.03.2019 Бюл. № 6, 2019 р.
149. Патент № 133173 UA, B23D 19/08 (2006.01) Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С., Салій С.С. —№ у 201810447 ; заявл. 23.10.2018 ; опубл. 25.03.2019 25.03.2019 Бюл. № 6, 2019 р.
150. Патент № 128468 UA, B23K 26/354 (2014.01), B23K 23/00 Спосіб виготовлення біметалевих листових композицій / Головка Л.Ф., Салій С.С. — № у 201712550 ; заявл. 18.12.2017 ; опубл. 25.09.2018, Бюл.

№ 18, 2018 p.

151. L. Golovko, S. Sali, M. Bloshchytsyn, W. Alnusirat. Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetalls. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 4, No. № 1 (94). C. 47–54.

Монографія

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: ДК № 5354 від 25.05.2017 р.,
просп. Перемоги, 37
м. Київ, 03056

електронне видання

Підп. до друку 00.00.2022. Формат 60x84¹/₁₆ Папір офіс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризограф. Ум. друк. арк. 9,07. Обл.-вид. арк 15,08. Зам. № 000. Накл. 000пр.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка»
вул. Політехнічна, 14, корп. 15,
Київ, 03056
тел. (044) 204-81-78

