

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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

САЛІЙ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 669.018.85
УДК 621.375.826:621

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ І ЯКОСТІ БІМЕТАЛІВ
ЗАСТОСУВАННЯМ КОМБІНОВАНИХ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ Й
ВІДПОВІДНОГО ОБЛАДНАННЯ**

131 «Прикладна механіка»
13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.С. Салій

Науковий керівник:

Головко Леонід Федорович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Салій С. С. Підвищення ефективності виготовлення і якості біметалів застосуванням комбінованих лазерно-ливарних процесів й відповідного обладнання. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 131 «Прикладна механіка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерство освіти і науки України, - Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена актуальній та важливій для сучасного машинобудування науково-технічній проблемі – підвищенню ефективності виготовлення й покращенню якості біметалічних матеріалів за рахунок застосування комбінованих лазерно-ливарних процесів, які поєднують попередню лазерну обробку поверхні функціонального шару та подальше ливарне формування конструктивної складової. В умовах підвищення вимог до надійності та довговічності конструкційних елементів, що працюють у високотемпературних, корозійних або абразивних середовищах, питання створення надійних біметалів з високою стійкістю до руйнування є надзвичайно важливим.

Застосування біметалів дозволяє суттєво підвищити ресурс деталей та зменшити їх собівартість за рахунок поєднання дорогої корозійностійкої або жароміцної поверхні з дешевою конструктивною сталевною основою. Проте традиційні технології виготовлення біметалів — наплавлення, зварювання, гаряча прокатка, дифузійне з'єднання та вибухове зварювання — обмежені щодо формування рівномірної структури, часто призводять до утворення тріщин, крихких проміжних фаз, непроварів, залишкових напружень або зниження експлуатаційних характеристик.

Разом з тим, традиційні технології виготовлення біметалів – не завжди забезпечують стабільність процесу та необхідну якість зони з'єднання. Суттєвими недоліками цих методів є утворення тріщин через значні температурні градієнти, поява крихких прошарків, непроварів, зон локальної

пористості, а також висока вартість попередньої підготовки поверхні. Комбінований лазерно-ливарний процес, розроблений у межах дисертації, дозволяє вирішити ці проблеми за рахунок поєднання керованого лазерного впливу, який формує макроструктуру поверхневого шару, та енергії перегрітого металу, що заливається у форму, створює сприятливі умови для інтенсифікації дифузії легувальних елементів і формування надійного металургійного зв'язку.

У роботі вперше проведено комплексні дослідження процесів формування біметалів системи XH60BT (UNS 6230) – Сталь S235JRG2 (Ст3) за умов поєднання лазерної модифікації поверхні та ливарного формування. Показано, що лазерна обробка випроміненням волоконного лазера LTS500 дозволяє формувати регулярний макрорельєф з чітко окресленими геометричними параметрами, які визначають розвиток зони дифузійного контакту та якість з'єднання. Встановлено, що найкращі показники міцності та однорідності забезпечує макрорельєф з висотою виступів 0,5 мм, кроком 1,5 мм та поперечним розміром 1×1 мм. Така конфігурація дає змогу отримати металургійний зв'язок до 97–98 % площі контакту, що значно перевищує показники традиційних методів.

Особливу увагу приділено вивченню теплофізичних процесів за допомогою математичного моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics. Моделювання дозволило визначити просторово-часові температурні поля, умови формування локальної зони розплаву, а також вплив швидкості відводу тепла та геометрії макрорельєфу на структуру з'єднання. Встановлено, що оптимальною температурою заливки є $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, що забезпечує достатню енергію розплаву для інтенсифікації дифузії легувальних елементів (Cr, Ni, W) з нікелевого сплаву в сталь та формування повноцінної дифузійної перехідної зони.

Експериментальні дослідження структури та властивостей перехідної зони виконувалися методами електронної мікроскопії (SEM), енергодисперсійного спектрального аналізу (EDX), рентгеноструктурного аналізу (XRD), мікротвердометрії та металографії. Встановлено, що за умов комбінованого процесу формується перехідна зона товщиною 80–170 мкм, яка складається з

дрібнозернистих структур з високою концентрацією легувальних елементів та новоутворених фаз. Рентгеноструктурний аналіз виявив присутність фаз Ni–Cr–Fe та $\text{Fe}_{0.507}\text{--Ni}_{0.493}$ (тетратаєніту), що забезпечують підвищення міцності інтерфейсу та стійкість до утворення тріщин.

У дисертаційній роботі вперше описано явище локального теплового «запирання», яке виникає в зонах макрорельєфу під час дії перегрітого розплаву. Це явище сприяє зменшенню тепловідводу та підвищенню температури у контактній області, що інтенсифікує дифузію і сприяє формуванню рівномірної перехідної зони. Доведено, що формування макрорельєфу з оптимальною конфігурацією забезпечує не лише збільшення площі контакту, але й стабілізацію теплових потоків, що є ключовим фактором у створенні якісного металургійного з'єднання.

Досліджено вплив режимів лазерної обробки (потужність 400–500 Вт, діаметр променя 0,6 мм, швидкість 1–2 м/хв, тиск газу 0,4–2 атм), температури попереднього нагрівання функціонального шару ($\approx 300^\circ\text{C}$) та температури заливки на формування структури та механічних властивостей з'єднання. Показано, що правильно підібрані режимні параметри дозволяють уникнути утворення газових включень, тріщин, зон непролаву та перехолодження.

Окремо досліджено методи підвищення стабільності механічних властивостей біметалів за допомогою термічної обробки. Запропоновано режим відпалу при температурі 550°C протягом 30 хвилин, який дозволяє ефективно зняти залишкові напруження та підвищити рівномірність твердості в зоні з'єднання. Встановлено, що після відпалу значення мікротвердості перехідної зони стабілізуються та відповідають механічним властивостям основного металу.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Вперше розроблено новий високоефективний процес виготовлення біметалів, який базується на комплексному використанні енергій лазерного випромінювання і індукованого електромагнітного поля. 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. Запропоновано та експериментально апробовано оригінальну методику розрахунку параметрів подачі розплаву із заданою витратою.

- Встановлено, що при лазерно-ливарному процесі виготовлення біметалів умови існування постійної зони розплаву і її розміри залежать від теплофізичних характеристик матеріалу та визначаються швидкістю і законом переміщення лазерного пучка, його потужністю, геометричними розмірами та розподілом інтенсивності випромінювання в зоні фокусування. Управління процесом доцільно здійснювати комплексною зміною параметрів сканування, швидкості переміщення і потужності лазерного випромінювання та висоти напірного стовпа розплаву.

- Вперше запропоновано і досліджено принципово новий механо-ливарний спосіб виготовлення біметалів, сутність якого полягає в тому, 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.

- Доведено, що оптимальними параметрами макрорельєфу, які забезпечують однорідність структури біметалу, максимальну площу металургійного контакту складових (97–98 %) без утворення дефектів і максимальну міцність їх зчеплення є - висота виступів - 0,5 мм, крок між виступами - 1,5 мм. Показано, що у залежності від вимог до потрібної міцності зчеплення складових біметалу і бажаної продуктивності його виготовлення крок між виступами може бути відповідним чином пропорційно збільшений.

- Встановлено, при механо ливарному виготовленні біметалу на прикладі «хром-нікелевий сплав ХН60ВТ– Ст3», вздовж умовної межі з'єднання складових утворюється перехідний шар від нікелевого сплаву до зони сплавлення, зона сплавлення та значно менший перехідний шар до структури вуглецевої сталі. Загальна ширина цих зон змінюється у залежності від режимів опромінення від 80 до 170 мкм. При цьому відбувається перерозподіл легуючих елементів Cr, Ni, W від нікелевого сплаву до сталі, в наслідок чого в зоні сплавлення утворюються фази Ni - Cr – Fe, вміст якої становить 86.4% та фаза Fe 0.507–Ni 0.493 (тетратаєніт), вміст якої у залежності від схеми розташування і розмірів виступів становить 13,6%. Зі збільшенням кроку розташування її вміст зменшується до 10,9%. Оптимальними параметрами макровиступів слід вважати: крок розташування -1,5 мм, висота - 0,5 мм. Вони забезпечують повне розплавлення макрорельєфу функціонального шару та формування розмитої хвилястої границі розділу з утворенням металургійного зв'язку та масопереносу елементів.

- Оцінка залишкових напружень за методом Вільямсона–Голла показала, що мікрореформації кристалічної решітки становлять 0,08% для твердорозчинної фази Fe–Cr–Ni, що відповідає величині залишкових напружень 160–170 МПа, та 0,11% для впорядкованої фази FeNi (тетратаєніту), що відповідає 220–230 МПа. Підвищений рівень залишкових напружень у тетратаєніті свідчить про зростання густини дислокацій та формування більш напруженого стану решітки, що зумовлено локальними температурними градієнтами і високими швидкостями нагрівання–охолодження під час взаємного сплавлення компонентів біметалу.

- Встановлено, що універсальне використання лише одного способу є технологічно та економічно недоцільним, оскільки гібридна схема є ефективною для одиничного та малосерійного виробництва, тоді як високопродуктивна схема забезпечує суттєве зниження питомих витрат і розширення габаритних можливостей при великосерійному виготовленні.

Практичне значення результатів роботи міститься в наступному:

- Застосування запропонованих технологій виготовлення біметалів дозволяє значно скоротити витрати високовартісних сталей і інших сплавів, зменшити собівартість та підвищити продуктивність виготовлення виробів, значно розширити їх гаму з різними функціональними властивостями.
- Розроблено оригінальну методику визначення умов подавання розплаву конструкційної складової біметалу, що забезпечує формування шару із заданими геометричними параметрами - шириною, довжиною, товщиною.
- Визначено раціональні технологічні параметри виготовлення біметалу «нержавіюча сталь 12X18H10T (2 мм) – сталь Ст3 (15 мм)» шириною 50 мм: потужність лазерного випромінювання $P = 8,5$ кВт, амплітуда сканування $A = 50$ мм, частота сканування $f = 200$ Гц, швидкість переміщення основи $V_x = 1$ м/хв, товщина наплавленого шару $k = 2$ мм, висота стовпа розплаву $h = 7,6$ мм.
- Розроблено технологічні регламенти лазерно-ливарного та лазерно-механо-ливарного процесів виготовлення біметалів систем ХН60ВТ–Ст3 і 12X18H9Т–Ст3 для деталей, що експлуатуються в складних умовах.
- Проведено промислову апробацію результатів роботи та отримано акти зацікавленості від:
 ТОВ «Олімп груп» (Застосування технології для виготовлення біметалів алюміній–мідь, які використовуються у вентиляційних системах та системах кондиціонування). ТОВ «Компанія Сіайті» (Використання технології у виробництві інженерних комунікацій, а також реакторів для приготування будівельних сумішей). ТОВ «ЧЕРНІГІВСЬКИЙ АВТОАЗВОД» (Використання комбінованих технологій для отримання корозійностійких біметалів для автомобільної промисловості та їх конструктивних елементів)
- За результатами роботи отримано 6 патентів України на корисну модель.
- Показано, що інтенсифікація процесу виготовлення біметалів через застосування пластичної деформації для швидкого формування регулярної макроструктури на поверхні функціонального компонента дозволяє значно підвищити продуктивність процесу, виготовляти біметалеві листи шириною до

1 метра і більше, організувати при необхідності серійне чи крупносерійне виробництво.

- Розроблені рекомендації можуть бути впроваджені на підприємствах оборонного та важкого машинобудування, а також у легкій, харчовій та нафтохімічній промисловості.

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у 38 наукових працях, серед яких: 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі Scopus; 3 статті у наукових фахових виданнях України; 1 - розділу монографії, 26 праць апробаційного характеру (тези доповідей). За матеріалами дисертаційної роботи розроблено та захищено 6 деклараційних патентів України на способи лазерно-ливарного та лазерно-механо-ливарного формоутворення біметалів.

Ключові слова: лазерна обробка матеріалів, комбіновані технології, комбінований лазерно-ливарний процес, лазерне сплавлення, корозійностійкий функціональний біметал, біметали, ливарний процес, мікроструктура, нікелеві сплави, мікротвердість, зносостійкість, корозійна стійкість, механічні властивості, фазовий склад, лазерна розмірна обробка.

ABSTRACT

Salii S. S. Increase of production efficiency and quality of bimetals by using combined laser-casting processes and corresponding equipment. - *Manuscript*.

The thesis for receiving the Doctor of Philosophy Degree (Ph.D.) in program subject area 131 Applied Mechanics. - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute» of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to a topical and important scientific and technical problem for modern mechanical engineering—improving the efficiency of manufacturing and enhancing the quality of bimetallic materials through the application of combined laser–casting processes that integrate preliminary laser surface treatment of the functional layer with subsequent casting formation of the structural component. Under conditions of increasing requirements for reliability and durability of structural elements operating in high-temperature, corrosive, or abrasive environments, the development of reliable bimetals with high resistance to failure is of paramount importance.

The use of bimetals makes it possible to significantly increase the service life of components and reduce their cost by combining an expensive corrosion-resistant or heat-resistant surface with a low-cost structural steel base. However, conventional bimetal manufacturing technologies—such as surfacing, welding, hot rolling, diffusion bonding, and explosive welding—are limited in terms of forming a uniform structure and often lead to cracking, formation of brittle interlayers, lack of fusion, residual stresses, or deterioration of service properties.

At the same time, traditional bimetal manufacturing technologies - do not always ensure process stability and the required quality of the joint zone. Significant drawbacks of these methods include crack formation due to large temperature gradients, the appearance of brittle layers, lack of fusion, local porosity zones, and high costs of surface preparation. The combined laser–casting process developed in this dissertation addresses these problems by combining controlled laser action, which

forms a tailored macrostructure of the surface layer, with the energy of superheated molten metal poured into the mold, creating favorable conditions for intensified diffusion of alloying elements and the formation of a reliable metallurgical bond.

For the first time, comprehensive studies of the formation of bimetals of the KhN60VT (UNS 6230) – S235JRG2 (St3) system under conditions of combined laser surface modification and casting formation were carried out. It is shown that laser treatment using an LTS500 fiber laser enables the formation of a regular macrorelief with well-defined geometric parameters that determine the development of the diffusion contact zone and the quality of the joint. It was established that the best strength and structural homogeneity are achieved with a macrorelief featuring protrusion height of 0.5 mm, pitch of 1.5 mm, and transverse dimensions of 1×1 mm. This configuration provides a metallurgical bond over 97–98% of the contact area, which significantly exceeds the performance of conventional methods.

Special attention was paid to the study of thermophysical processes using mathematical modeling in the COMSOL Multiphysics environment. The modeling made it possible to determine spatiotemporal temperature fields, conditions for local melt pool formation, and the influence of heat removal rate and macrorelief geometry on the joint structure. It was found that the optimal pouring temperature is 1600 °C, which provides sufficient melt energy to intensify the diffusion of alloying elements (Cr, Ni, W) from the nickel alloy into steel and to form a fully developed diffusion transition zone.

Experimental studies of the structure and properties of the transition zone were performed using scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), X-ray diffraction analysis (XRD), microhardness testing, and metallography. It was established that under combined processing conditions a transition zone with a thickness of 80–170 μm is formed, consisting of fine-grained structures with a high concentration of alloying elements and newly formed phases. X-ray diffraction analysis revealed the presence of Ni–Cr–Fe phases and the $\text{Fe}_{0.507}$ –

Ni_{0.493} (tetrataenite) phase, which enhance interface strength and resistance to crack formation.

For the first time, the phenomenon of local thermal “locking” occurring in macrorelief zones under the action of superheated melt is described. This phenomenon reduces heat dissipation and increases temperature in the contact area, thereby intensifying diffusion and promoting the formation of a uniform transition zone. It is demonstrated that the formation of macrorelief with an optimal configuration not only increases the contact area but also stabilizes heat flows, which is a key factor in creating a high-quality metallurgical bond.

The influence of laser processing parameters (power 400–500 W, beam diameter 0.6 mm, speed 1–2 m/min, gas pressure 0.4–2 atm), preheating temperature of the functional layer (≈ 300 °C), and pouring temperature on the formation of the joint structure and mechanical properties was investigated. It is shown that properly selected processing parameters prevent the formation of gas inclusions, cracks, lack-of-fusion zones, and overcooling.

Methods for improving the stability of mechanical properties of bimetals through heat treatment were also investigated. An annealing regime at 550 °C for 30 minutes was proposed, which effectively relieves residual stresses and increases hardness uniformity in the joint zone. It was found that after annealing, microhardness values in the transition zone stabilize and correspond to the mechanical properties of the base metal.

Scientific novelty of the obtained results:

- For the first time, a new highly efficient process for manufacturing bimetals has been developed, based on the integrated use of laser radiation energy and an induced electromagnetic field. Laser radiation is used to melt the surface layer of the functional component of the bimetal to a depth of 30–50 μm , while simultaneously molten material of the second structural component is supplied from an induction heater at a specified flow rate. An original methodology for calculating melt supply parameters

with a заданий flow rate from the nozzle has been proposed and experimentally validated.

- It was established that in the laser–casting process of bimetal manufacturing, the conditions for the existence of a stable melt pool and its dimensions depend on the thermophysical properties of the material and are determined by the speed and law of laser beam movement, its power, geometric dimensions, and intensity distribution in the focal zone. Process control should be carried out through a combined adjustment of scanning parameters, movement speed, laser power, and the height of the molten metal head.

- For the first time, a fundamentally new mechano–casting method for manufacturing bimetals was proposed and investigated. Its essence lies in forming protrusions of a certain shape, cross-sectional area, and height on the surface of the functional component of the bimetal and subsequently heating their surfaces simultaneously with the melt of the structural component. Due to changes in thermal conductivity along the height of the protrusions and the resulting accumulation of thermal energy at their вершины, melting occurs, leading to the formation of a solution of the functional and structural components and ensuring a metallurgical bond between them.

- It was proven that the optimal macrorelief parameters ensuring structural homogeneity of the bimetal, a maximum metallurgical contact area of the components (97–98%) without defect formation, and maximum bond strength are a protrusion height of 0.5 mm and a pitch of 1.5 mm. It was shown that, depending on the required bond strength and desired manufacturing productivity, the pitch between protrusions can be proportionally increased.

- It was established that during mechano–casting fabrication of the bimetal using the example of the “chromium–nickel alloy KhN60VT – St3,” a transition layer from the nickel alloy to the fusion zone, a fusion zone, and a much thinner transition layer to the carbon steel structure are formed along the conditional interface of the components. The total width of these zones varies from 80 to 170 μm depending on irradiation modes. Redistribution of alloying elements Cr, Ni, and W from the nickel

alloy into the steel occurs, resulting in the formation of Ni–Cr–Fe phases (86.4%) and the $\text{Fe}_{0.507}\text{--Ni}_{0.493}$ (tetrataenite) phase, whose content ranges from 13.6% to 10.9% with increasing protrusion pitch. The optimal macroprotrusion parameters are a pitch of 1.5 mm and a height of 0.5 mm, ensuring complete melting of the functional layer macrorelief and the formation of a blurred wavy interface with metallurgical bonding and mass transfer of elements.

- Evaluation of residual stresses using the Williamson–Hall method showed that lattice microstrains amount to 0.08% for the Fe–Cr–Ni solid-solution phase (corresponding to residual stresses of 160–170 MPa) and 0.11% for the ordered FeNi (tetrataenite) phase (220–230 MPa). The increased level of residual stresses in tetrataenite indicates a higher dislocation density and a more stressed lattice state due to local temperature gradients and high heating–cooling rates during mutual fusion of bimetal components.

Practical significance of the results:

- Application of the proposed bimetal manufacturing technologies significantly reduces the consumption of high-cost steels and other alloys, lowers production costs, increases manufacturing productivity, and considerably expands the range of products with diverse functional properties.

- An original methodology for determining the conditions of supplying molten structural material of the bimetal was proposed, ensuring the achievement of specified geometric characteristics—layer width, length, and thickness.

- It was shown that in manufacturing the bimetal “stainless steel 12Kh18N10T (2 mm thick) – steel St3 (15 mm thick)” with a width of 50 mm, the radiation power is $P = 8.5$ kW, scanning amplitude $A = 50$ mm, scanning frequency $f = 200$ Hz, base movement speed $V_x = 1$ m/min, deposited layer thickness $k = 2$ mm, and melt column height $h = 7.6$ mm.

- Technological regulations for the laser–mechano–casting process of manufacturing bimetals of the KhN60VT–St3 and 12Kh18N9T–St3 systems for components operating under severe conditions have been developed.

- Industrial approbation of the results was carried out, and letters of interest were obtained from:

LLC “Olimp Group” (application of the technology for manufacturing aluminum–copper bimetals used in ventilation and air-conditioning systems);

LLC “Company Ciayti” (use of the technology in the production of engineering utilities and reactors for preparing construction mixtures);

LLC “Chernihiv Automobile Plant” (application of combined technologies to obtain corrosion-resistant bimetals for the automotive industry and structural components).

- As a result of the work, 6 Ukrainian utility model patents were obtained.
- Intensification of the bimetal manufacturing process through the application of plastic deformation for rapid formation of a regular macrostructure on the surface of the functional component significantly increases process productivity, enables the production of bimetal sheets with widths of up to 1 meter or more, and allows for serial or mass production when necessary.
- The developed recommendations can be implemented at enterprises of the defense and heavy engineering industries, as well as in the light, food, and petrochemical industries.

The main results of the dissertation research have been published in 38 scientific works, including: 2 articles in scientific journals indexed in Scopus; 3 articles in Ukrainian professional scientific journals; 1 monograph chapter; and 26 conference publications (abstracts). Based on the dissertation materials, 6 Ukrainian declarative patents for methods of laser–casting and laser–mechano–casting formation of bimetals have been developed and protected.

Keywords: laser material processing, combined technologies, combined laser–casting process, laser melting, corrosion-resistant functional bimetal, bimetals, casting process, microstructure, nickel alloys, microhardness, wear resistance, corrosion resistance, mechanical properties, phase composition, laser dimensional processing.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях зарубіжних країн, що індексуються в наукометричних базах Scopus та WoS

1. **Salii, S.**; Golovko, L.; Kaglyak, O.; Kapustynskyi, O.; Višniakov, N. The Formation of a Low-Carbon Steel/Ni-Cr-W Alloy Bimetallic Material via Liquid–Solid Compound Casting with a Laser Assisted Solid Surface. *Machines* 2024, 12, 522. <https://doi.org/10.3390/machines12080522> (**Scopus, Q2**)

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом створено замкнутий цикл «проектування рельєфу — лиття — аналіз структури», що дозволило отримати біметал з високими експлуатаційними властивостями завдяки керованій дифузії в зоні сплавлення. Внесок співавторів: Головко Л.Ф. — наукове керівництво та концептуальне обґрунтування методу; Кагляк О.Д. — металографічний аналіз структури перехідної зони; Kapustynskyi O. — участь у підготовці та оформленні публікації; Višniakov N. — дослідження дифузійних процесів та редагування тексту).

Публікації у наукових фахових виданнях України

2. **S. Salii**, L. Golovko, M. Bloshchytsyn, W. Alnusirat. Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetals. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 4, No. № 1 (94). Pp. 47–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139483> (**Scopus, Q3**)

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено конструкції лазерної та ливарної систем та проведено моделювання процесів у математичному пакеті для визначення оптимальних режимів виготовлення біметалевих матеріалів. Внесок співавторів: Головко Л.Ф. — наукове керівництво, концептуальне обґрунтування роботи та загальна редакція; Блощицин М.С. — участь в експериментальних дослідженнях та аналізі результатів; Alnusirat W. — участь у підготовці та оформленні матеріалів публікації).

3. Салій С. С., Джемелінський В. В., Лесик Д. А., Данилейко О. О. Забезпечення якості поверхневого шару дрібнорозмірних деталей комбінованою

оздоблювальнотвірною обробкою. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 1(81). С. 81-85. ISSN: 23068744

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом виміряно та опрацьовано результати технологічних параметрів процесу комбінованої оздоблювальнотвірної обробки. Внесок співавторів: Джемелінський В.В. – наукове керівництво та визначення загальної концепції досліджень; Лесик Д.А. – проведення експериментальних досліджень із зміцнювальної обробки; Данилейко О.О. – вимірювання параметрів поверхневого шару та аналіз результатів).

4. **Салій С.С.,** Головка Л. Ф., Радько О.В. Скуратовський А.К. Енергозберігаючі технології зміцнення робочих поверхонь деталей машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. – №. 4 (85). – С. 44-52. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(85\).13871](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(85).13871)

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом сформульовано ідею енергозберігаючого методу зміцнення поверхонь деталей машин, розроблено схему та програму досліджень, проведено обробку зразків і вимірювання мікротвердості та зносостійкості оброблених поверхонь, здійснено аналіз й узагальнення результатів. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування роботи; Радько О.В. – проведення трибологічних досліджень та аналіз зносостійкості; Скуратовський А.К. – планування експерименту та обробка результатів).

5. **Салій, С. С.,** Головка, Л. Ф., Романенко, В. В. Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020. Vol. 88, No. 1. 93-107. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.200234>

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено математичну модель теплових процесів при лазерно-ливарному виготовленні біметалів, проведено числові розрахунки й порівняльний аналіз з експериментальними даними, сформульовано рекомендації щодо оптимальних режимів процесу. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво, постановка задачі та

концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка конструкції ливарної системи та проведення ливарних експериментів).

Патенти:

6. Спосіб виготовлення біметалевих листових композицій: пат. 128468 Україна: МПК В23К 26/354 (2014.01), В23К 23/00, №201712550 / Головка Л.Ф., **Салій С.С.**; заявл. 18.12.2017; опубл. 25.09.2018, Бюл. No 18, 2018.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом запропоновано технічне рішення конструкції лазерної системи для формування біметалу, здійснено патентний пошук та підготовлено матеріали заявки й опис до патенту. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво, формулювання технічного завдання та концептуальне обґрунтування рішення).

7. Пристрій для ливарного виготовлення біметалевих матеріалів з застосуванням утримуючих елементів: пат. 133111 Україна: МПК В22D 19/16 (2006.01), №201810064 / Романенко В. В.; Головка Л. Ф.; Блощичин М. С., **Салій С. С.**; заявл. 09.10.2018; опубл. 25.03.2019; Бюл. № 6, 2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено конструктивне рішення пристрою з утримуючими елементами, обґрунтовано параметри технологічного процесу та проведено перевірочні розрахунки. Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної конструкції пристрою та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощичин М.С. – відпрацювання конструктивних параметрів та проведення перевірочних випробувань).

8. Спосіб ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів: пат. 133173 Україна: МПК В23D 19/08 (2006.01), №201810447 / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощичин М.С., **Салій С.С.**, заявл. 23.10.2018; опубл. 25.03.2019 Бюл. No 6, 2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом запропоновано спосіб застосування технологічних отворів та утримуючих елементів для надійної фіксації пластин, обґрунтовано геометричні параметри з'єднання. Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції способу та

технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування технічних рішень; Блощицин М.С. – відпрацювання технологічних параметрів та проведення випробувань).

9. Спосіб ливарного виготовлення корозійностійких алюмошталевих біметалів з проміжком між пластинами: пат. 134788 Україна: МПК В22Д 19/08 №20181130 / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощицин М.С., **Салій С.С.**, заявл. 16.11.2018; опубл. 10.06.2019 Бюл. № 11/2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено теоретичне обґрунтування та розрахунок параметрів технологічного процесу; здійснено підготовку матеріалів для патентування. Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції способу та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування технічних рішень; Блощицин М.С. – проведення корозійних випробувань та аналіз результатів).

10. Спосіб ливарного виготовлення корозійностійких алюмошталевих біметалів з утримуючими елементами та жертвним анодом: пат. 134789 Україна: МПК В22Д 19/08 №201811302 / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощицин М.С., **Салій С.С.**, заявл. 16.11.2018; опубл. 10.06.2019 Бюл. № 11/2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено розрахунок параметрів системи катодного захисту від корозії та підготовлено матеріали для патентування. Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощицин М.С. – проведення електрохімічних вимірювань та аналіз захисних властивостей).

11. Спосіб ливарного виготовлення біметалів із застосуванням нахилених утримувачів: пат. 134859 Україна: МПК В23Д 19/08 №u201812618/ Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Ямшинський М. М., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Ковальчук О. Г., заявл. 19.12.2018, опубл. 10.06.2019 Бюл. № 11/2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено вплив кута їх нахилу на надійність фіксації твердого компоненту і якість з'єднання шарів;

підготовлено матеріали для патентування. Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування технічних рішень; Яшинський М.М. – аналіз технологічних параметрів способу; Блощин М.С. – проведення перевірочних випробувань; Ковальчук О.Г. – оформлення матеріалів заявки).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. **Салій С. С.,** Головка Л. Ф. Використання математичного моделювання для оптимізації процесу виготовлення біметалів. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології».* Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7984/>

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено математичне моделювання теплових процесів при виготовленні біметалів, здійснено аналіз результатів числових розрахунків та сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальних технологічних параметрів процесу. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво, постановка задачі та визначення напрямку дослідження).

13. Головка Л. Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., **Салій С.С.** Нові високоефективні способи виготовлення біметалів з застосуванням концентрованих джерел енергії. *Матеріали XVIII-Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Секція 4 «Прогресивна техніка».* – м. Київ, 2017. –С.248-249.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено нові способи виготовлення біметалів із застосуванням концентрованих джерел енергії, проведено порівняльний аналіз ефективності різних методів. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та загальна концепція доповіді; Романенко В.В. – дослідження ливарних процесів та аналіз результатів; Блощин М.С. – підготовка матеріалів доповіді).

14. **Салій С. С.,** Головка Л. Ф., Блощичин М.С. Особливості реалізації фокуруючої лазерної системи при створенні біметалів лазерно – ливарним способом. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2018», секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології».* - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2018/paper/view/13788>

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено та реалізовано оптичну схему фокуруючої лазерної системи для лазерно-ливарного способу виготовлення біметалів, проведено розрахунок параметрів лазерного пучка в зоні фокусування та визначено оптимальні умови формування рельєфу. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощичин М.С. – налаштування та тестування оптичної системи).

15. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощичин М.С., **Салій С.С.** Лазерно – ливарні процеси виготовлення біметалів. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Секція I «Технологічні процеси та системи машинобудівного виробництва».* – м. Чернігів, 2018. – С.118.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено вплив параметрів лазерно-ливарного процесу на формування перехідної зони між шарами біметалу та сформульовано висновки щодо якості з'єднання. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних експериментів; Блощичин М.С. – підготовка матеріалів доповіді).

16. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощичин М.С., **Салій С.С.,** Свічкарь І.В., Кір'янова К.О. Застосування індукційного нагрівання при лазерно-ливарній технології виробництва біметалів. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних*

процесів та систем», Секція 1 «Технологічні процеси та системи машинобудівного виробництва». – м. Чернігів, 2018. – С.119

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено можливості застосування індукційного нагрівання в комбінації з лазерним випромінюванням при лазерно- ливарній технології виробництва біметалів, проведено порівняльні випробування та аналіз якості отриманих біметалевих зразків. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження параметрів індукційного нагрівання).

17. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічкарь І.В. Застосування лазерного-ливарного процесу для виробництва біметалів різного функціонального призначення. *Матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації - 2018», Секція 2 «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, мехатроніка, робототехніка і автоматизоване управління». випуск 4. – Херсон: ХНТУ, 2018. – С.66.*

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено параметри лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів різного функціонального призначення, проведено аналіз мікроструктури зразків та оцінку міцності з'єднання шарів. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – оформлення результатів).

18. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічкарь І.В. Управління якістю з'єднання при виготовлення біметалів лазерно-ливарним методом. *Матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації - 2018», Секція 2 «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, мехатроніка,*

робототехніка і автоматизоване управління». випуск 4. – Херсон: ХНТУ, 2018. – С.67.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено вплив режимів лазерного нагрівання поверхні та параметрів заливки на якість металургійного з'єднання при лазерно-ливарному виготовленні біметалів, сформульовано рекомендації щодо управління якістю процесу. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка рекомендацій з управління процесом; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – проведення порівняльних досліджень).

19. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічкарь І.В. Особливості конструювання ливарних систем при створенні біметалів лазерно-індукційним методом. *Матеріали XIX-Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Секція 5 «Прогресивна техніка та технологія машинобудування». – м. Київ, 2018. –С.52.*

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено конструкцію ливарної системи для лазерно-індукційного методу виготовлення біметалів, проведено розрахунок параметрів системи та перевірено її ефективність в експериментальних умовах. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування конструктивних рішень; Романенко В.В. – розробка конструкції ливарної системи; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження ефективності нагрівання).

20. Головка Л.Ф., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Тонкошкурій А.В., Трапезніков О.П. Явище електролітно-плазмового розряду при поліруванні струминними течіями електроліту. *XXIV Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" м. Київ, 28.05.2019*

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено вимірювання параметрів розряду та порівняльний аналіз отриманих результатів. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощицин М.С. – постановка досліджень та загальний аналіз

результатів; Тонкошкурий А.В. – проведення електричних вимірювань; Трапезніков О.П. – підготовка та оформлення матеріалів).

21. Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Тищенко Є.Ю., Трапезніков О.П. Аналіз особливостей формування діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні. *XXIV Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці"* м. Київ, 28.05.2019

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено дослідження процесу формування діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні. Внесок співавторів: Блощицин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування досліджень; Тищенко Є.Ю. – вимірювання характеристик діелектричного шару; Трапезніков О.П. – підготовка матеріалів та аналіз результатів).

22. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічкарь І.В. Особливості формування ванни розплаву лазерним випромінюванням лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів. *X Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти"*, м. Херсон 03.06.2019

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено характеристики ванни розплаву при лазерному нагріванні поверхні в процесі лазерно-ливарного виготовлення біметалів, проведено числове моделювання гідродинамічних процесів у розплаві та проаналізовано їх вплив на якість з'єднання. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – аналіз гідродинамічних характеристик).

23. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Литвиненко О.А. Реалізації технологій виготовлення гнутих біметалів та біметалевих виробів кутового типу. *X Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти"*, м. Херсон 03.06.2019

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено технологічні особливості виготовлення гнутих біметалів та біметалевих виробів кутового типу лазерно-ливарним методом, розроблено рекомендації щодо режимів виготовлення та контролю якості продукції. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Литвиненко О.А. – дослідження деформаційних характеристик біметалів).

24. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічкарь І.В. Особливості формування перехідної зони при лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів. X Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти", м. Херсон 03.06.2019

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено особливості формування перехідної зони при лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів, проведено аналіз дифузійних процесів у зоні з'єднання. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження дифузійних процесів у зоні з'єднання).

25. **Салій С.С.**, Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С. Забезпечення металургійного зв'язку при комбінованому лазерно-ливарному процесі виготовлення біметалів. XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ – м. Херсон 10-13.09.2019

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено умови забезпечення надійного металургійного з'єднання при комбінованому лазерно-ливарному процесі виготовлення біметалів, сформульовано рекомендації щодо режимів попередньої підготовки поверхні та параметрів ливарного процесу. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій щодо

ливарного процесу; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів).

26. Блощицин М.С., Головка Л.Ф., Романенко В.В., **Салій С.С.** Лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів. XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ – м. Херсон 10-13.09.2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено основні закономірності лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів, встановлено оптимальні параметри лазерного нагрівання поверхні та ливарного процесу для забезпечення якісного міжшарового з'єднання. Внесок співавторів: Блощицин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та загальна концепція; Головка Л.Ф. – обґрунтування результатів та редагування матеріалів; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень та аналіз оптимальних параметрів).

27. **Салій С.С.**, Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С. Дослідження комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів. Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів "Інновації молоді в машинобудуванні - 2019", м. Київ, 15.05.2019, Url - <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2019/paper/view/17769>.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено комплексне дослідження комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів, виконано порівняльний аналіз структури та механічних властивостей зразків, виготовлених за різних технологічних режимів. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів).

28. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С. **Салій С.С.**, Саленко А.О. Особливості застосування комбінованих лазерно-ливарних процесів при виготовленні біметалів. - В зб. IX міжнародної конференції "Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів", 9-13.09.2019, м. Одеса, Україна.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено особливості комбінованих лазерно-ливарних процесів при виготовленні біметалів, проведено аналіз впливу різних варіантів поєднання лазерного та ливарного методів на якість виготовлених зразків. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних схем; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Саленко А.О. – аналіз застосування концентрованих джерел енергії).

29. **Салій С. С.**, Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощицин М. С. Дослідження лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів різного функціонального призначення. *Laser technologies in welding and materials processing: Proceedings of the Ninth International Conference* / ed. by I. V. Krivtsun. Київ : МА «Зварювання», 2019. С. 100–103. URL: <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2019.pdf>.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів різного функціонального призначення, проведено аналіз мікроструктури та властивостей отриманих зразків, сформульовано рекомендації щодо вибору режимів процесу для конкретних застосувань. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій; Блощицин М.С. – підготовка та оформлення матеріалів).

30. Блощицин М. С., Головка Л. Ф., Семінська Н. В., **Салій С. С.**, Трапезніков О. П. Особливості пробою діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні струминними течіями електроліту. *V Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу – 2019»*. Херсон : ХНТУ, 10–15.09.2019.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено процес пробою діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні струминними течіями електроліту та проведено аналіз впливу технологічних чинників на характеристики пробою. Внесок співавторів: Блощицин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Головка Л.Ф.

– загальний аналіз та обговорення результатів; Семінська Н.В. – проведення електрохімічних вимірювань; Трапезніков О.П. – підготовка матеріалів та аналіз результатів).

31. Блощицин М. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., **Салій С. С.** Можливості застосування лазерного випромінювання для підвищення якості виробів військового призначення. *VII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні»*, секція 1. Київ, 09.10.2019. С. 133–134.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено можливості застосування лазерного випромінювання для підвищення якості та надійності виробів військового призначення, проведено порівняльний аналіз ефективності різних методів лазерної обробки поверхонь. Внесок співавторів: Блощицин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Головка Л.Ф. – аналіз та обговорення результатів; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій та підготовка матеріалів).

32. **Салій С. С.**, Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощицин М. С., Свічкарь І. В. Особливості комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2020»*, секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено особливості комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів, встановлено закономірності формування мікроструктури в перехідній зоні та визначено оптимальні технологічні параметри для забезпечення якісного з'єднання шарів. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних схем; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження параметрів нагрівання).

33. Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощицин М. С., **Салій С. С.**, Свічкарь І. В. Розробка комбінованої системи лазерно-ливарного виготовлення

біметалів. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», секція 1.* Чернігів, 2020. С. 158.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено комбіновану систему лазерно-ливарного виготовлення біметалів, проведено її проектування та компонування, визначено оптимальні параметри основних вузлів системи та виконано перевірочні розрахунки. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проектування ливарних вузлів системи; Блощин М.С. – підготовка матеріалів; Свічка І.В. – дослідження вузлів індукційного нагрівання).

34. Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С., **Салій С. С.** Підвищення ефективності хіміко-термічної обробки застосуванням лазерного модифікування поверхонь. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», секція 1.* Чернігів, 2020. С. 162.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено ефективність застосування лазерного модифікування поверхонь для підвищення якості хіміко-термічної обробки деталей. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення технологічних досліджень; Блощин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів).

35. **Салій С. С.**, Головка Л. Ф., Блощин М. С., Романенко В. В., Свічка І. В. Комбінований процес виготовлення біметалів із застосуванням концентрованих джерел енергії. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», секція 1.* Чернігів, 2020. С. 163.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено комбінований процес виготовлення біметалів із застосуванням концентрованих джерел енергії, проведено порівняльний аналіз ефективності різних варіантів комбінування методів та їх впливу на якість кінцевого продукту. Внесок

співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Свічкарь І.В. – дослідження особливостей нагрівання).

36. Блощицин М. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., **Салій С. С.**, Свічкарь І. В. Виготовлення корозійностійких біметалів при використанні висококонцентрованих джерел енергії. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, секція 1. Чернігів, 2020. С. 164.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено можливості застосування висококонцентрованих джерел енергії для виготовлення корозійностійких біметалів, проведено випробування зразків на корозійну стійкість та аналіз захисних властивостей отриманих матеріалів. Внесок співавторів: Блощицин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Головка Л.Ф. – аналіз та обговорення результатів; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Свічкарь І.В. – дослідження корозійних властивостей).

37. **Салій С. С.**, Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощицин М. С. Експериментальні дослідження отримання біметалів лазерно-ливарним методом з попередньою підготовкою поверхні основи біметалу. *XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*. Київ, 2020.

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено експериментальні дослідження впливу попередньої підготовки поверхні основи біметалу на якість металургійного з'єднання при лазерно-ливарному методі виготовлення, здійснено аналіз мікроструктури та механічних властивостей отриманих зразків. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка параметрів ливарного процесу; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз отриманих результатів).

Публікації, що додатково відображають результати дисертації

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

(Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено експерименти з лазерного формування регулярного макрорельєфу на поверхнях нікелевого сплаву та досліджено параметри ливарного процесу (температурні режими заливки сталі, співвідношення фаз); здійснено аналіз мікроструктури, фазового складу та дифузійних процесів у перехідній зоні методами XRD та SEM/EDS. Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – загальне наукове керівництво, концептуальне обґрунтування та редакція монографії; Романенко В.В. – розробка конструкцій ливарних систем та дослідження ливарних процесів; Блощин М.С. – проведення фізико-хімічних досліджень та аналіз результатів; Кагляк О.Д. – металографічний аналіз структур та їх інтерпретація; Савченко О.А. – розробка методик контролю якості та оформлення результатів; Свічкарь І.В. – дослідження параметрів індукційного нагрівання та оформлення матеріалів).

Зміст	
ВСТУП.....	36
РОЗДІЛ 1	45
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ ТА ШЛЯХІВ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ	45
1.1 Сфери та особливості використання біметалів у порівнянні з металевими сплавами	45
1.1.1 Области застосування біметалевих матеріалів.....	46
1.1.2 Особливості експлуатації функціонального шару біметалу в різних галузях промисловості.....	48
1.1.3 Сумісність матеріалів у конструкціях	51
1.2. Основні вимоги до властивостей біметалевих сплавів і їх складових у залежності від умов експлуатації.....	53
1.2.1 Вимоги до властивостей сталі основи.....	53
1.2.2 Вимоги до властивостей матеріалу функціонального шару	54
1.2.3. Фізичні основи процесів одержання біметалів у твердій фазі.....	56
1.2.4. Процеси, що відбуваються при формуванні рідкої фази в зоні з'єднання біметалів	57
1.3 Способи виготовлення біметалів, що застосовуються у промислових умовах..	58
1.3.1. Способи виготовлення біметалів без оплавлення поверхні з'єднання.....	59
1.3.1.1. Спосіб обробки тиском.....	59
1.3.1.2. Зварювання тертям.....	61
1.3.1.4. Зварювання вибухом.....	64
1.3.2. Спосіб виготовлення біметалів з оплавленням поверхні з'єднання (рідиннофазний).....	66
1.3.2.1. Ливарний метод отримання біметалів.....	66
1.3.2.2. Багатошарове електродугове наплавлення	68
1.3.2.3. Метод електрошлакового наплавлення (ЕШН).....	70
1.3.2.4. Плазмове наплавлення	71
1.3.2.5. Лазерне зварювання та наплавлення	72
1.4. Характеристики якості та експлуатаційні показники біметалів	74
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	83
РОЗДІЛ 2	84
ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ.....	84

2.4.2. Математичне моделювання теплопередачі та фазових переходів при взаємодії розплаву з твердим матеріалом функціонального складу	110
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	119
РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	120
3.1 Матеріали для проведення лазерно-ливарного процесу.....	120
3.2 Експериментальне обладнання	124
3.2.1 Технологічний лазерний комплекс для формування регулярного макрорельєфу.....	124
3.2.2 Ливарна установка для нанесення конструктивної складової	127
3.2.3 Пристрій для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів	131
3.3. Методи дослідження структури отриманих біметалів	134
3.3.1. Оптична металографія	134
3.3.2. Растрова (скануюча) електронна мікроскопія (SEM) і мікрорентгеноспектральний аналіз (EDS)	135
3.3.3. Рентгенофазовий аналіз	137
3.4. Методи досліджень фізико-механічних властивостей	139
3.4.1 ДюрOMETричні дослідження	139
3.4.2 Дослідження середньої міцності поверхневого та оцінка неоднорідності властивостей	139
3.4.3 Дослідження зносостійкості та втомного руйнування	140
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	142
РОЗДІЛ 4	143
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ БІМЕТАЛУ	143
4.1 Дослідження впливу конфігурації виступів (висоти, інтервалу, форми) на якісні параметри перехідного шару.....	144
4.2 Дослідження структури, складу і властивостей зони зчеплення шарів отриманих біметалів.....	148
4.3. Фізико-механічні характеристики перехідного шару отриманих біметалів	166
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	171
РОЗДІЛ 5	173
МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ У ПРОМИСЛОВОСТІ	173
5.1 Технологічне забезпечення процесу.....	173
5.2. Технологічна лінія комбінованого лазерно-ливарного виробництва біметалів	178

5.3. Виготовлення біметалевих листових композицій з використанням лазерного нагрівання та прокатування.....	180
5.4 Спосіб виготовлення багатошарових бронеконпозицій.....	183
5.5 Економічні аспекти застосування комбінованих лазерно-ливарних процесів при виготовленні біметалевих матеріалів	186
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5.....	191
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	197
ДОДАТОК А	210
ДОДАТОК Б.....	229

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗТВ – зона термічного впливу (Heat-Affected Zone, HAZ)

ЛЛТК – лазерно-ливарний технологічний комплекс

ЗН – залишкові напруження (Residual Stresses, RS)

РЕМ / СЕМ (SEM) – растрова (скануюча) електронна мікроскопія (Scanning Electron Microscopy)

EDX (EDS) – енергодисперсійний спектральний аналіз / мікрорентгеноспектральний аналіз (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

XRD – рентгеноструктурний / рентгенофазовий аналіз (X-ray Diffraction)

ЧПК – числове програмне керування (Computer Numerical Control, CNC)

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Найменування	Одиниця виміру
λ	Довжина хвилі лазерного променя	мкм
P	Потужність лазерного променя	Вт
v	Швидкість переміщення лазерного променя	мм/с
V_x	Швидкість переміщення основи	м/с (м/хв)
d _л	Діаметр лазерного променя	мм
W _л	Густина потужності лазерного променя	Вт/см ²
A _{sk} (A)	Амплітуда сканування лазерного променя	мм
C _p	Питома теплоємність матеріалу	Дж/(кг·К)
H _μ	Мікротвердість	ГПа
T _{пл}	Температура плавлення	°С
T _в	Температура відпуску	°С
E	Модуль пружності	МПа
α	Коефіцієнт об'ємного теплового розширення	1/К
c	Коефіцієнт теплоємності	Дж/(кг·°С)
ρ	Щільність матеріалу	кг/м ³
I	Інтенсивність	Вт/м ² (W/m ²)
k _{abs}	Коефіцієнт поглинання	м ⁻¹ (m ⁻¹)
f _{ск}	Частота сканування лазерного променя.	Гц
W _v	Хвильова функція трикутної форми (закон руху лазерного променя)	-
F	Фокусна відстань лінзи	мм
ΔL	Прихована теплота плавлення	кДж/кг
q _{im}	Густина теплового потоку на границі розділу фаз	Вт/м ²
p (P)	Тиск розплаву	Па
ΔP (dP)	Втрати тиску на гідравлічне тертя	Па
η (μ)	Динамічна в'язкість розплаву	мПа·с
ΔT	Відхилення температури від рівноважного стану	К (або °С)
Q	Потужність внутрішнього джерела тепла або об'ємні витрати розплаву (залежно від моделі)	Вт або м ³ /с
vГ	Швидкість переміщення границі розділу фаз	м/с
n	Вектор нормалі до фронту плавлення	-

Вступ

Актуальність роботи

Тенденції розвитку сучасної техніки, економічні та технологічні аспекти її виготовлення, обумовлюють необхідність розширення використання матеріалів, що володіють спеціальними властивостями. Деталі металургійного, гірничодобувного, 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. Потреба в біметалах, які знаходять досить широке застосування в різних областях техніки, пов'язана з необхідністю використання матеріалів з набором властивостей, які, як правило, або взагалі не можна отримати у гомогенної сталі або сплаву, або це економічно недоцільно. Коли критерієм придатності виробу відповідає шар робочої поверхні, а інша частина є базовою частиною і не піддається прямій взаємодії з факторами робочого середовища.

Найбільш часто зустрічається ситуація, коли якась несуча конструкція при експлуатації піддається одночасному впливу високих механічних напруг і агресивного в корозійному відношенні середовища. Для забезпечення необхідної міцності використовують вуглецеві, низько- або середньолеговані високоміцні конструкційні сталі, які не є корозійностійкими. У свою чергу найбільш часто застосовуються аустенітні корозійно-стійкі сталі не мають необхідного рівня міцності. У таких випадках самим раціональним способом вирішення проблеми буде застосування біметалу основним шаром з високоміцної сталі і з захисним функціональним шаром з корозійностійкої сталі.

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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках Державної науково-технічної програми «Розробка високопродуктивного процесу виготовлення біметалевих матеріалів різного призначення та відповідного технологічного обладнання» у відповідності до завдань Міністерства освіти та науки України (тема № 2028-п, номер держ. реєстрації 0117U000499).

Мета роботи та задачі дослідження. Підвищення продуктивності та якості виготовлення біметалевих матеріалів при одночасному зменшенні їх собівартості за рахунок створення оригінальних технологічних систем й

конструкцій обладнання, що гарантовано забезпечують задану якість робочого шару й міцність його зчеплення з основою, герметичність отриманих з'єднань, можливість значно розширити номенклатуру біметалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати порівняльний аналіз областей застосування біметалевих матеріалів та сучасних методів їх виготовлення у промисловості, визначити їх енергетичні та інші технологічні показники.
- розробити комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів та його різновиди, визначивши їх енергетичні та інші технологічні показники
- провести теоретичні та експериментальні дослідження для визначення взаємозв'язку вхідних технологічних параметрів дії лазерного променя і ливарного процесу з вихідними параметрами якості поверхневого шару.
- виконати параметричний аналіз комбінованого лазерно-ливарного процесу, визначити межі варіювання головних і засоби стабілізації другорядних факторів.
- розробити математичну модель процесів лазерно-ливарного методу виготовлення біметалевих матеріалів, встановити його основні закономірності, визначити рівні та межі зміни технологічних параметрів комбінованої обробки
- експериментально встановити основні технологічні закономірності комбінованого лазерно-ливарного процесу, визначити його механізм.
- визначити основні закономірності зміни характеристик якості з'єднання складових біметалу та експлуатаційних властивостей виробів (мікроструктури, фазового складу, мікротвердості, величини і характеру розподілу залишкових напружень, зносостійкості).
- розробити обладнання та рекомендації (алгоритм) для практичного використання лазерно-ливарних процесів виготовлення корозійностійких біметалів та керуючі програми для формування на поверхні функціональної складової топографії з регулярним макрорельєфом.

Об'єкт дослідження – комбінований процес лазерно-ливарного виготовлення біметалевих матеріалів.

Предмет дослідження – закономірності фізичних процесів, що відбуваються при виготовленні біметалевих листових матеріалів з комплексним застосуванням різних концентрованих джерел енергії – електромагнітної індукції, електричного розряду, лазерного випромінювання та їх комбінацій, їх зв'язок з технологічними характеристиками обробки - продуктивністю, параметрами якості і експлуатаційними властивостями виробів.

Методи дослідження. Вивчення теплових процесів, що протікають при комбінованому лазерно-ливарному процесі проводилось на основі положень теорії теплопровідності при дії концентрованих джерел енергії на функціональну пластину з використанням чисельного методу скінченних елементів. Експериментальні дослідження проводились з використанням оригінальних методик визначення параметрів лазерного випромінювання, температур нагрівання розплаву та оброблюваної поверхні, методів металографічного, дюрметричного та електронно-зондового аналізів, методик дослідження напруженого стану та триботехнічних характеристик наплавлених шарів.

Наукова новизна отриманих результатів.

В дисертації одержані такі нові наукові результати:

- Вперше розроблено новий високоефективний процес виготовлення біметалів, який базується на комплексному використанні енергій лазерного випромінювання і індукованого електромагнітного поля. 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. Запропоновано та експериментально апробовано оригінальну методику розрахунку параметрів подачі розплаву із заданою витратою.
- Встановлено, що при лазерно-ливарному процесі виготовлення біметалів умови існування постійної зони розплаву і її розміри залежать від теплофізичних

характеристик матеріалу та визначаються швидкістю і законом переміщення лазерного пучка, його потужністю, геометричними розмірами та розподілом інтенсивності випромінювання в зоні фокусування. Управління процесом доцільно здійснювати комплексною зміною параметрів сканування, швидкості переміщення і потужності лазерного випромінювання та висоти напірного стовпа розплаву.

- Вперше запропоновано і досліджено принципово новий механо-ливарний спосіб виготовлення біметалів, сутність якого полягає в тому, 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.

- Доведено, що оптимальними параметрами макрорельєфу, які забезпечують однорідність структури біметалу, максимальну площу металургійного контакту складових (97–98 %) без утворення дефектів і максимальну міцність їх зчеплення є - висота виступів - 0,5 мм, крок між виступами - 1,5 мм. Показано, що у залежності від вимог до потрібної міцності зчеплення складових біметалу і бажаної продуктивності його виготовлення крок між виступами може бути відповідним чином пропорційно збільшений.

- Встановлено, при механо ливарному виготовленні біметалу на прикладі «хром-нікелевий сплав ХН60ВТ– Ст3», вздовж умовної межі з'єднання складових утворюється перехідний шар від нікелевого сплаву до зони сплавлення, зона сплавлення та значно менший перехідний шар до структури вуглецевої сталі. Загальна ширина цих зон змінюється у залежності від режимів опромінення від 80 до 170 мкм. При цьому відбувається перерозподіл легуючих елементів Cr, Ni, W від нікелевого сплаву до сталі, в наслідок чого в зоні сплавлення утворюються фази Ni - Cr – Fe, вміст якої становить 86.4% та фаза

Fe 0.507–Ni 0.493 (тетратаєніт), вміст якої у залежності від схеми розташування і розмірів виступів становить 13,6%. Зі збільшенням кроку розташування її вміст зменшується до 10,9%. Оптимальними параметрами макровиступів слід вважати: крок розташування -1,5 мм, висота - 0,5 мм. Вони забезпечують повне розплавлення макрорельєфу функціонального шару та формування розмитої хвилястої границі розділу з утворенням металургійного зв'язку та масопереносу елементів.

- Оцінка залишкових напружень за методом Вільямсона–Голла показала, що мікрореформації кристалічної решітки становлять 0,08% для твердорозчинної фази Fe–Cr–Ni, що відповідає величині залишкових напружень 160–170 МПа, та 0,11% для впорядкованої фази FeNi (тетратаєніту), що відповідає 220–230 МПа. Підвищений рівень залишкових напружень у тетратаєніті свідчить про зростання густини дислокацій та формування більш напруженого стану решітки, що зумовлено локальними температурними градієнтами і високими швидкостями нагрівання–охолодження під час взаємного сплавлення компонентів біметалу

- Встановлено, що універсальне використання лише одного способу є технологічно та економічно недоцільним, оскільки гібридна схема є ефективною для одиничного та малосерійного виробництва, тоді як високопродуктивна схема забезпечує суттєве зниження питомих витрат і розширення габаритних можливостей при великосерійному виготовленні.

Практичне значення результатів роботи міститься в наступному:

- Застосування запропонованих технологій виготовлення біметалів дозволяє значно скоротити витрати високовартісних сталей і інших сплавів, зменшити собівартість та підвищити продуктивність виготовлення виробів, значно розширити їх гаму з різними функціональними властивостями.

- Розроблено оригінальну методику визначення умов подавання розплаву конструкційної складової біметалу, що забезпечує формування шару із заданими геометричними параметрами - шириною, довжиною, товщиною.

- Визначено раціональні технологічні параметри виготовлення біметалу «нержавіюча сталь 12X18H10T (2 мм) – сталь Ст3 (15 мм)» шириною 50 мм: потужність лазерного випромінювання $P = 8,5$ кВт, амплітуда сканування $A = 50$ мм, частота сканування $f = 200$ Гц, швидкість переміщення основи $V_x = 1$ м/хв, товщина наплавленого шару $k = 2$ мм, висота стовпа розплаву $h = 7,6$ мм.

- Розроблено технологічні регламенти лазерно-ливарного та лазерно-механо-ливарного процесів виготовлення біметалів систем ХН60ВТ–Ст3 і 12X18H9Т–Ст3 для деталей, що експлуатуються в складних умовах.

- Проведено промислову апробацію результатів роботи та отримано акти зацікавленості від:

ТОВ «Олімп груп» (Застосування технології для виготовлення біметалів алюміній–мідь, які використовуються у вентиляційних системах та системах кондиціонування). ТОВ «Компанія Сіайті» (Використання технології у виробництві інженерних комунікацій, а також реакторів для приготування будівельних сумішей). ТОВ «ЧЕРНІГІВСЬКИЙ АВТОАЗВОД» (Використання комбінованих технологій для отримання корозійностійких біметалів для автомобільної промисловості та їх конструктивних елементів)

- За результатами роботи отримано 6 патентів України на корисну модель.

- Показано, що інтенсифікація процесу виготовлення біметалів через застосування пластичної деформації для швидкого формування регулярної макроструктури на поверхні функціонального компонента дозволяє значно підвищити продуктивність процесу, виготовляти біметалеві листи шириною до 1 метра і більше, організувати при необхідності серійне чи крупносерійне виробництво.

- Розроблені рекомендації можуть бути впроваджені на підприємствах оборонного та важкого машинобудування, а також у легкій, харчовій та нафтохімічній промисловості.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний

інститут імені Ігоря Сікорського» при підготовці спеціалістів й магістрів механічних спеціальностей, наукової роботи аспірантів та співробітників.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі постановка наукових задач, вибір і обґрунтування підходів до їх вирішення, розроблення методів досліджень, планування та виконання експериментальних робіт, формулювання основних наукових положень, висновків і узагальнень, що виносяться на захист (за винятком положень, окремо зазначених у тексті), здійснені автором особисто. Дисертант самостійно обґрунтував концепцію комбінованої лазерно-ливарної технології виготовлення біметалевих матеріалів, визначив технологічні параметри процесу та встановив закономірності формування міжшарового з'єднання.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, внесок автора є визначальним і полягає у розробленні та вдосконаленні технологічного обладнання для реалізації комбінованого процесу, створенні методики проведення експериментів, підготовці та виконанні досліджень, обробленні, аналізі й узагальненні отриманих результатів, а також підготовці публікацій за результатами роботи. Автор брав безпосередню участь у дослідженні мікроструктури, фазового складу та фізико-механічних властивостей одержаних біметалевих матеріалів, встановленні їх експлуатаційних характеристик та апробації результатів дисертаційної роботи. Усі результати, що становлять наукову новизну та практичну цінність дисертації, отримані автором особисто або за його безпосередньої участі з визначальним внеском.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на 26 науково-технічних конференціях: IX Міжнародній конференції «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів» (IX International Conference on Laser Technologies in Welding and Materials Processing), вересень 2019 р., м. Одеса, Україна (форма участі – очна); Міжнародних науково-практичних конференціях «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 2018 та 2020 рр., м. Чернігів, Україна (форма участі – очна); Міжнародних науково-технічних конференціях «Прогресивна техніка, технологія та інженерна

освіта», 2016–2020 рр., м. Залізний Порт, м. Київ, м. Київ – м. Херсон, Україна (форма участі – очна); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», 2019 р., м. Київ, Україна (форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації», 2018 р., м. Херсон, Україна (форма участі – очна); Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», 2019 р., м. Київ, Україна (форма участі – очна); а також на Всеукраїнських науково-технічних конференціях молодих учених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню» у 2017, 2018 та 2020 роках (форма участі – очна).

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 36 наукових робіт, 3 статті у фахових виданнях, 2 статті з цитуванням в наукометричній базі SCOPUS, отримано 6 патентів України на корисну модель.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація включає вступ, п'ять розділів, висновки, список літератури з 110 найменувань та 2-х додатків; в загальному обсязі викладена на 231 сторінках, обсяг основної частини – 177 сторінок (без додатків та ілюстрацій що займають всю сторінку), містить 74 рисунків, 15 таблиць.

РОЗДІЛ 1

Аналіз існуючих методів виготовлення біметалів та шляхів їх удосконалення

1.1 Сфери та особливості використання біметалів у порівнянні з металевими сплавами

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 потрібна забезпечення високого рівня міцності і опору різним видам корозійних руйнувань, а іноді і абразивного зносу, стає неможливим підібрати сталь або сплав, який поєднує в собі всі необхідні якості, не вдаючись до невиправданого матеріально і економічно 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, Х18Н10 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 біметалевих 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.

1.1.1 Області застосування біметалевих 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 корозійно-стійкого функціонального шару знайшла аустенітна нержавіюча сталь типу 08X18H10T. Такі двошарові сталі застосовують для виготовлення посудин атомних електростанцій, в хімічній, нафтопереробній та целюлозно-паперової промисловості. Там, де можлива в корозійній середовищі присутність 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 з хромової нержавіючої сталі 08X13.

Наприклад, для виготовлення посудин атомних електростанцій застосовується товстолистовий прокат двошарової сталі з основним шаром зі сталі марки 22К для котельних, плакованих нержавіючої аустенітної сталлю марки 08Х18Н10Т [1]. Для прісної води і пари застосовується також для плакування хромисті нержавіючі сталі 08Х13 і 08Х17.

Широко використовуються двошарові сталі 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 плакувальна сталь з основним шаром з теплостійкою стали типу 10Х2М і плакувальним шаром зі сталі 08Х18Н10Т [2][3]. Хімічні апарати, що піддаються дії таких органічних кислот як оцтова, щавлева, молочна та деяких інших застосовують плакувальні сталі, які містять молібден і титан для запобігання пітингової і щілинної корозії, типу 10Х17Н13М2Т і 08Х17Н15М3Т або монель НМЖМц28-2,5-1,5. Для хімічних резервуарів, призначених для роботи з хлористими сполуками або розплавами солей і лугів, як плакувального шару використовуються сплави на нікелевій основі ХН78Т або Н70МФВ [4].

У целюлозно-паперовій промисловості варильні котли, ємності для відходів, змішувачі паперової маси виготовляють з плакованих сталей типу 09Г2С + 08Х18Н10Т або 20К + 10Х17Н13М2Т [5, 6]. 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 [7].

У нафтохімічному виробництві для переробки сірчистої нафти застосовують двошарові сталі з основним шаром із низьколегованих сталей марок 20К, 09Г2С, 16ГС і плакуючим шаром зі сталі марки 08Х13[8]. Плакирована 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 [9]. За кордоном

двошарові сталі з плакуючим шаром з нержавіючих сталей застосовують для виготовлення зварних труб для транспортування природного газу з високим вмістом сірководню і резервуарів газосховищ[3, 4]. 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 плакуючим шаром з міді [12].

1.1.2 Особливості експлуатації функціонального шару біметалу в різних галузях промисловості



Рис.1.1.1. Класифікація корозійностійких біметалів по функціональному шару
Сталі мартенситно-феритного і мартенситного класу

1. 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].

2. 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.

3. 20X17H2Б, 14X17H2, 95X18. Такі сталі використовують для виготовлення важко навантажених деталей, 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.

4. 09X15H8, 07X16H6, 08X17H5. Використовують для виготовлення важко навантажених деталей які працюють в середовищах азотної, фосфорної і оцтової кислот і в атмосфері сірчаноокислих середовищ і сірчаної кислоти. Такі сталі добре зварюються і деформуються в гарячому стані[14].

Сталі аустенітного класу

1. 10X14Г14Н4Т використовується для виготовлення деталей обладнання, що працює в середовищах малої агресивності – органічні кислоти низьких концентрацій при кімнатній температурі [13, 14].

2. 12X18H10Т, 12X18H9Т, 08X18H10Т. Використовуються для зварних конструкцій, які працюють в середовищах середньої агресивності – продукти згорання палива, розбавлені розчини азотної, фосфорної та орг. кислот, розчини лугів і солей. Для підвищення зносостійкості таких сталей використовують азотування і поверхневе наклепування. Такі сталі добре зварюються всіма видами ручного і автоматичного зварювання і легко піддаються гарячій і холодній деформації.

3. 10X17H13M2Т використовується для виготовлення зварних конструкцій, що працюють в умовах киплячої фосфорної, мурашиної і оцтової кислот і інших середовищах підвищеної агресивності [13, 14].

Аустенітно–феритні сталі

1.08X22H6T використовується для виготовлення зварної хімічної апаратури, а також каталізаторів полімеризації у виробництві синтетичних канчуків, кормових дріжджів та вакцин. А також для апаратури, що працює у 65% азотній кислоті. При випарюванні і нейтралізації аміачної селітри.

2.08X18Г8Н2Т – для виготовлення хімічної апаратури, 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.

3.12X21H5Т – для виготовлення деталей вакуум–випарних апаратів і сушильно–розпилювальних установок, які працюють в середовищах, що не викликають міжкристалітної корозії.

4.10X32Н8 – для важко навантажених деталей, що піддаються сильному зношуванню в середовищах помірної агресивності. Цю сталь використовують в якості зносостійких наплавов [13, 14]

Сплави на залізо–нікелевій основі

06Н28МДТ – для виготовлення деталей зварної апаратури, що працюють в середовищах, що містять іони хлору, а також в сірчаній і оцтовій кислотах при температурі до 80 °С. Сплав піддається зварювання аргано–дуговому зваркою [34, 35].

Сплави на нікелевій основі

1.ХН70МФ – для виготовлення деталей, які працюють при високих температурах у сірчані кислоті, фосфорній та соляній всіх концентрацій і при всіх температурах, включаючи температуру кипіння.

2.ХН65МВ – для виготовлення зварних конструкцій, які працюють при підвищених температурах в сірчаноокислих середовищах, концентрованих оцтовій кислоті, сухому хлорі, хлоридах заліза і інших високо агресивних середовищах[13, 14].

3.ХН60МБ – для виготовлення деталей, які працюють в розчинах кремній–фтористої кислоти при 80 °С, азотній і фосфорній кислотах. Наступним за поширеністю після сталей конструкційним матеріалом є алюміній і його сплави.

Алюміній має здатність до самопасивації в окислювальних середовищах і стійкий у водних середовищах і вологих газах при рН 4...9. А також в концентрованих сірчані і азотній кислотах і в органічних кислотах. Але легко руйнується в неокислювальних кислотах. Для збільшення стійкості до пасивації алюміній легують титаном (3...5 %). Після алюмінію за поширеністю матеріалів стоїть мідь. Мідь має слабку схильність до пасивації і тому не стійка в окислювальних середовищах. Тому використовують в основному сплави міді. Бронзи, латуні, сплави з нікелем. До корозійно стійких матеріалів належить також 166 титан. Який є стійким в сильно окислювальних середовищах в тому його використовують для виготовлення хімічних апаратів[13, 14].

1.1.3 Сумісність матеріалів у конструкціях

При плануванні методів захисту необхідно провести аналіз взаємного впливу різнорідних матеріалів конструкції.

Ці взаємні впливи можуть бути обумовлені[13, 14]:

1. Безпосереднім контактом двох матеріалів із різними електрохімічними потенціалами.
2. Зміна полярності.
3. Електролітичне перенесення шкідливих іонів із однієї конструкції в іншу.
4. Перенесення металічних частинок з потоком рідини.
5. Шкідливий вплив блукаючих струмів, а також інші ефекти, що виникають внаслідок близького розміщення різнорідних матеріалів.

У складних установках і системах конструкційні елементи із різних матеріалів і сплавів часто працюють в електропровідних середовищах. В більшості випадків не вдається уникнути контакту між різнорідними матеріалами.

Для раціональної роботи конструкції із різнорідних матеріалів необхідно виконати ряд вимог:

1. Вибір сумісних матеріалів.
2. Проектування і впровадження діелектричного розділення.
3. Регулювання складу корозійного середовища для зменшення агресивності.

Сумісними вважають такі матеріали, поєднання яких при конкретних розмірах і середовищі не призводить до руйнування конструкції впродовж економічно обґрунтованого терміну експлуатації. При виборі сумісних пар необхідно враховувати, що контактна корозія може виникати не тільки в наслідок різних електродних потенціалів різнорідних матеріалів, але і різного складу одного матеріалу.

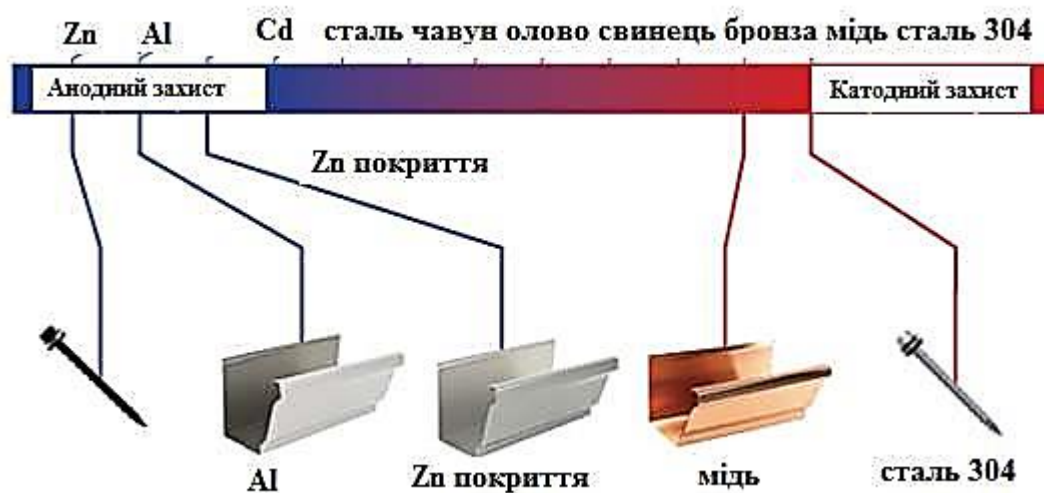


Рис.1.1.2. Гальванічна шкала, що показує розташування потенціалів основних металів по відношенню один до одного

При вирішенні питання про можливість сумісного використання різнорідних матеріалів необхідно задовольнити дві вимоги[13, 14]:

1. Функціональні вимоги до конструкції.
2. Вимоги до стійкості матеріалу в певному корозійному середовищі.

Компроміс між цими двома вимогами досягається за рахунок вибору матеріалів за наступними показниками:

1. Поєднання металічних і неметалічних деталей.
2. Врахування різниці електрохімічних потенціалів.
3. Врахування особливості корозійного середовища.
4. Відносні розміри катода і анода в гальванопарі.
5. Врахування електропровідності середовища.
6. Можливі градієнти температури.
7. Пошарова неоднорідність матеріалу.

8. Швидкість і напрямок руху електропозитивних іонів.
9. Наявність блукаючих струмів.
10. Можливість виникнення корозійно агресивних золів.

1.2. Основні вимоги до властивостей біметалевих сплавів і їх складових у залежності від умов експлуатації

1.2.1 Вимоги до властивостей сталі основи

Двошарові біметали повинні володіти комплексом властивостей основного і функціонального шару. 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 плакирована 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.

1.2.2 Вимоги до властивостей матеріалу функціонального шару

До сталей для **функціонального** шару пред'являються вимоги залежать від призначення двошарової сталі. Найбільш часто вимоги до сталі функціонального шару зводяться до забезпечення корозійної стійкості для протидії агресивних середовищ або забезпечення зносостійкості. В роботі [16] наступним чином узагальнені вимоги до таких сталей, розділяючи їх на технологічні, експлуатаційні та техніко-економічні:

- 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 функціонального шару повинна забезпечувати надійну і тривалу експлуатацію при впливі зовнішнього середовища;
- міцність, пластичність і в'язкість матеріалу функціонального шару 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 функціонального матеріалу;

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

- економічна доцільність їх отримання при обраних співвідношеннях товщини шарів і технологічних процесів 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 виготовлятися з наступними габаритними розмірами: 3200-9400 мм довжиною; 1200-2800 мм завширшки і 8-60 мм завтовшки. Однак по окремим технічним умовам випускають листовий прокат як менших, так і великої товщини в інтервалі від 4 до 110 мм.

Інше завдання, яку можуть успішно вирішувати двошарові сталі, полягає в підвищенні зносостійкості різних виробів, експлуатація яких пов'язана з механічним взаємодією з контактуючим твердим середовищем. Такі сталі застосовують для виготовлення різних ножів, лемешів-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 до мартенситу ці сталі набувають високу твердість[17, 18].

У разі, коли виріб піддається одночасному впливу корозійного середовища і ерозійного 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 пасивної плівки після взаємодії з твердим тілом такі сталі краще використовувати для захисту від корозійно-ерозійного зносу різних конструкцій.

Найбільш вдалим прикладом застосування двошарових корозійностійких біметалів, з функціональним шаром зі сталі типу 12Х18Н10, є їх використання в льодовому поясі корпусів атомного криголама і льодостійкої морської стаціонарної платформи, установлені на арктичному шельфі[19, 20].

1.2.3. Фізичні основи процесів одержання біметалів у твердій фазі

Явище з'єднання металів у твердому стані базується на фундаментальних закономірностях атомно-молекулярної взаємодії. Складність процесів у зоні контакту та вплив численних чинників на міцність зчеплення зумовили розвиток наукових підходів, що пояснюють природу твердофазного з'єднання через термодинамічні та механічні аспекти [21, 47].

Рекристалізаційна концепція розглядає формування спільних зерен на межі поділу внаслідок інтенсивної пластичної деформації, що знижує енергію активації процесу. Проте наявність міцних зв'язків, отриманих за низьких температур, вказує на те, що рекристалізація є скоріше супутнім або завершальним етапом структурування вже сформованого з'єднання [52].

Роль поверхневих плівок є визначальною для ініціації контакту. Для виникнення міжатомної взаємодії необхідно зруйнувати оксидні шари та забезпечити вихід ювенільних поверхонь. Це досягається шляхом спільної пластичної деформації, при якій крихкі оксиди розтріскуються, утворюючи зони безпосереднього металевого контакту («містки схоплювання») [47, 54].

Дифузійні процеси відіграють ключову роль у зміцненні зони з'єднання. Взаємне проникнення атомів у приконтактних об'ємах під впливом тиску та температури сприяє вирівнюванню хімічного складу та релаксації залишкових напружень. Хоча дифузія зазвичай активізується після встановлення первинного зв'язку, вона суттєво визначає фазовий склад та експлуатаційні властивості перехідної зони біметалу [23, 48, 49].

Енергетичний підхід пояснює з'єднання через досягнення атомами контактних поверхонь певного рівня активації. При зближенні поверхонь на відстань дії міжатомних сил виникають стабільні металургійні зв'язки. Здатність металів до такого зчеплення корелює з їхніми фізико-механічними властивостями: пластичністю, модулем пружності та енергією кристалічної ґратки [1, 22].

Сучасна наукова школа розглядає процес як багатостадійний механізм [23, 52]:

Фізичне зближення: утворення фактичної площі контакту за рахунок пластичної деформації мікронеоднорідностей.

Активация поверхонь: виникнення активних центрів у зонах виходу дислокацій, що створює умови для створення металевих зв'язків.

Об'ємна взаємодія: розвиток зони з'єднання, що супроводжується дифузією, перерозподілом дефектів ґратки та, у ряді випадків, формуванням нових фаз.

Кінетика формування біметалевого з'єднання часто описується через теорію топохімічних реакцій. Згідно з цим підходом, міцність з'єднання залежить від швидкості зародження та зростання центрів активного зв'язку, що дозволяє математично прогнозувати якість біметалу залежно від параметрів зварювального чи прокатного циклу [54, 55, 56].

1.2.4. Процеси, що відбуваються при формуванні рідкої фази в зоні з'єднання біметалів

При виробництві металевих композитів методами лиття, паяння та наплавлення з'єднання компонентів відбувається в результаті взаємодії твердої фази з рідкою або двох рідких металів. Здатність до формування надійного зв'язку в таких системах визначається взаємною розчинністю елементів та схильністю до утворення крихких інтерметалідів [24, 47, 106].

Найбільш міцне з'єднання притаманне металам з необмеженою взаємною розчинністю як у рідкому, так і в твердому станах. Натомість метали, що не мають взаємної розчинності, після затвердіння легко розділяються. Взаємна розчинність визначається ізоморфністю кристалічних ґраток, близькістю атомних радіусів та термодинамічними факторами. Оскільки інтенсивність утворення інтерметалідів суттєво залежить від температури, раціональний вибір режимів обробки дозволяє мінімізувати ріст крихких фаз [49, 107].

Утворення міцного з'єднання при контакті розплаву з твердою поверхнею визначається комплексом поверхневих явищ:

- міжфазним натягом та змочуванням;

- розтіканням рідкого металу по поверхні, що супроводжується контактною дифузією;
- розчиненням твердого металу в рідкому.

Ключовим параметром є змочування, яке забезпечує розвиток фізичного контакту. Процес протікає активніше, коли температура твердої поверхні перевищує температуру плавлення розплаву. В іншому випадку передчасна кристалізація рідкого металу створює бар'єр для дифузійних процесів [51, 82]. При з'єднанні металів із суттєвою різницею температур плавлення (наприклад, сталь–алюміній) застосовують легування розплаву елементами-інгібіторами або попереднє нанесення бар'єрних покриттів, що запобігають утворенню інтерметалідів [22, 108].

Швидкість формування перехідної зони обмежена інтенсивністю дифузії в твердому металі, яка є значно нижчою, ніж у рідкій фазі. Структура зони з'єднання після охолодження повинна відповідати діаграмі стану системи, проте при високих швидкостях охолодження можливе формування метастабільних фаз, що впливає на механічну міцність біметалу [23, 106, 110].

1.3 Способи виготовлення біметалів, що застосовуються у промислових умовах

На сьогодні розроблено та впроваджено у виробництво значну кількість методів виготовлення біметалевих матеріалів [32–76]. Аналіз цих способів за критеріями продуктивності, якості зчеплення та економічної доцільності дозволяє розділити їх на дві принципові групи (Рис. 1.3.1):

Способи з'єднання у твердій фазі: температура в зоні контакту не перевищує температури плавлення складових, а з'єднання відбувається без оплавлення поверхонь (наприклад, зварювання вибухом, сумісна прокатка, дифузійне зварювання) [7, 47, 52].

Способи з наявністю рідкої фази: виготовлення біметалів, характерною рисою яких є формування шару сплавлення між складовими (ливарні технології, наплавлення, лазерно-ливарні процеси) [82, 106, 107].

Вибір конкретного методу залежить від необхідних габаритів виробів, поєднання металів та умов експлуатації готового біметалевого вузла.



Рис.1.3.1. Найбільш поширені способи виготовлення біметалів

1.3.1. Способи виготовлення біметалів без оплавлення поверхні з'єднання

1.3.1.1. Спосіб обробки тиском

Спосіб обробки тиском пакета або точніше пакетна прокатка, що складається з двох різних сталей у вигляді пластин або слябів, до теперішнього часу є одним з найпоширеніших технологічних процесів отримання двох-шарових 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 також його можна використовувати для отримання біметалевих прутків, дроту або профілю.

Велике значення для отримання високоякісного листового прокату плакованих сталей мають підготовка контактуючих поверхонь заготовок основного і плакувального шарів перед складанням пакета і технологія його збірки[16, 32].

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 стікість, ніж обрана сталь[55]. 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 мікрон 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 пакета для запобігання окислення поверхонь простір між заготовками вакуумують до тиску $\sim 10^{-4}$ мм ртутного стовпа [56-59]. 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 до температури 1200-1250 ° C для більшості корозійно-стійких плакованих сталей (вуглецева або низьколегована сталь і нержавіюча сталь) [58, 60, 61].

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 разів [16, 23, 32, 33].

Однак розкати з несиметричного пакета 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, 34].

До переваг слід віднести відносно простоту технології та обладнання, при дотриманні технології досягається достатня міцність зчеплення шарів, а також забезпечуються мінімальні відхилення по товщині як основного, так і плакувального шарів, та висока повторюваність самого процесу.

До недоліків можна віднести: відсутність металургійного зв'язку між компонентами, висока ціна обладнання, для підвищення якості з'єднань

ускладнюється технологія і зростає ціна, яка йде на підготовчі операції над складовими біметалу,

1.3.1.2. Зварювання тертям

Зварювання тертям біметалевих виробів відноситься до твердофазних методів з'єднання. Проводиться із застосуванням тиску, а нагрів здійснюється тертям, яке виникає при відносному переміщенні зварювальних частин і інструменту [35–38]. Розрізняють (інерційне, конвекційне), орбітальне, радіальне, лінійне (вібраційне), зварювання тертям з перемішуванням.

Зварювання тертям з перемішуванням було винайдено в 1991 році та набуло широкого використання у промисловості, а саме в морській, аерокосмічній та автомобільній [39–43]. Зварювання тертям з перемішуванням в першу чергу було винайдено для зварювання алюмінієвих сплавів з іншими легкими сплавами, але дана технологія має потенціал для отримання з'єднань з різнорідними матеріалами [41, 44]. У випадку з аерокосмічною промисловістю дана технологія може бути застосована у виробництві структурних частин конструкції літака або вертольота, паливних баків та матеріалів обшивки із тонких сплавів [45, 46].

У цьому способі циліндричний інструмент з профільованим штифтом занурюється в область приєднання компонентів і обертається з точною швидкістю обертання. Це викликає пластичну деформацію в зоні з'єднання при нагріванні та перемішуванні. Коли інструмент йде вперед, стик охолоджується і затвердіває [39–43]. Зауважимо, що матеріал інструменту повинен бути стійкішим, ніж матеріали, що зварюються [43]. Схема цієї методики представлена на Рис. 1.3.2.

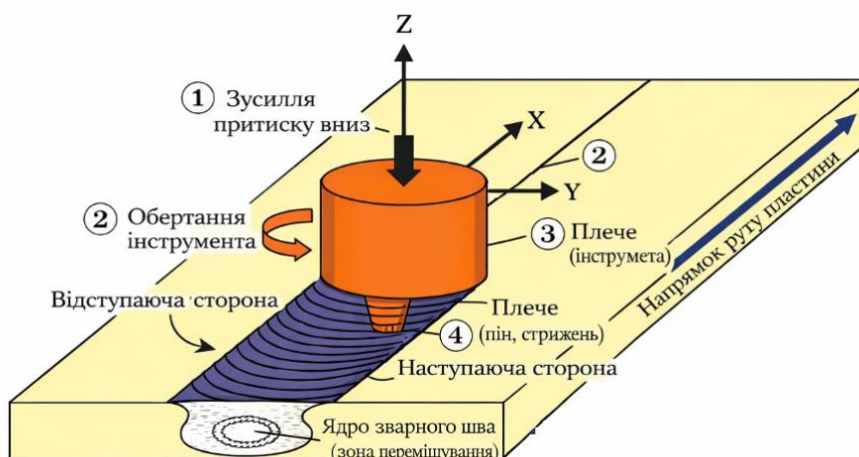


Рис. 1.3.2. Принципова схема зварювання тертям з переміщенням

До енергетичних і технологічних переваг зварювання тертям відносяться:

- відсутність пор, раковин, різного роду включень і зон несплавлення по границі розділу;
- високий ККД процесу внаслідок локального генерування теплоти і малого об'єму металу, що нагрівається;
- нижчий (в 5 - 10 разів) витрата енергії, ніж при контактному стиковому зварюванні;
- висока продуктивність процесу (в залежності від виду матеріалу і розмірів перетину заготовок тривалість циклу їх нагрівання становить 2 ... 30 с);
- при правильно обраному режимі зварювання наявність у металі зварного шва та прилеглих до нього зон таких же показників міцності і пластичності, як у матеріалі заготовок;
- подрібнена структура металу шва і зони термічного впливу в результаті швидкого нагрівання та охолодження зварного шва при високому тиску;
- відсутність залежності якості зварного шва від чистоти поверхні торців зварюваних заготовок;
- можливість зварювання як однойменних, так і різнойменних металів (наприклад, алюмінію зі сталлю, міді зі сталлю, титану з алюмінієм, міді з алюмінієм);

- простота механізації і автоматизації процесу зварювання (основні технологічні параметри процесу легко програмуються).

До недоліків зварювання тертям можна віднести:

- достатньо громіздке обладнання, процес не може бути мобільним;
- потрібна додаткова обробка зони стику, а для деталей які протидіють; динамічним навантаженням, зона стику може бути вогнищем втомного руйнування, а в деталях, що працюють в агресивних середовищах, - вогнищем корозії;
- при підвищених температурах в зоні дії циліндричного інструменту виникають інтерметалеві перехідні шари.

1.3.1.3. Дифузійне зварювання біметалів

Дифузійне зварювання здійснюється в твердому стані металу при підвищених температурах з прикладанням стискаючих зусиль до місця зварювання і витримки по часу. Таким чином, перша стадія процесу дифузійного зварювання, заснована на створенні металевих зв'язків на зварюваних поверхнях металів при нагріванні їх у вакуумі із застосуванням стискаючих зусиль. Для їх виникнення на лінії розділу необхідно забезпечити тісний контакт зварювальних поверхонь і створити умови для видалення поверхневих плівок окислів, рідин, газів і різного роду забруднень. Використання підвищених температур при дифузійному зварюванні призводить до зменшення опору металу пластичних деформацій. Видалення поверхневих плівок і попередження можливості утворення їх у процесі зварювання досягається використанням вакуумної захисту та ретельним попереднім зачищенням зварювальних поверхонь. На другій стадії процесу дифузійного зварювання відбуваються процеси взаємної дифузії атомів зварюваних металів. Ці процеси призводять до утворення проміжних шарів, що збільшують міцність зварного з'єднання [47]. Проте в деяких випадках утворення проміжних шарів небажано [48].

Зварювання відбувається у вакуумі 10^{-3} - 10^{-5} мм рт. ст. при нагріванні на 0,5..0,7 від температури плавлення більш легкоплавкого компоненту біметалу. Для отримання якісного з'єднання необхідно забезпечити рівномірний нагрів зварюваного виробу по всьому перетину. Зусилля стиснення прикладають після вирівнювання температури і підтримують постійним протягом всього процесу. Відомі також технологічні прийоми з мінливим тиском в процесі зварювання[49]. Тривалість витримки під навантаженням залежить від властивостей металу, що зварюється, величини тиску та інших факторів і може досягати десятків хвилин. Тиск також залежить від властивостей металу, температури зварювання та інших факторів і змінюється від 0,3 до 10 кгс/мм² (2,9-98 МН/м²). Зазвичай при охолодженні деталей стискаюче зусилля знімають при досягненні температури 100 - 400 ° С (373-673 К). Передчасне зняття стискаючого зусилля, при охолодженні деталей в деяких випадках призводить до руйнування зварного з'єднання [47, 50].

Переваги дифузійного зварювання:

- висока точність обробки та можливість створювати складні конструкції;
- висока міцність та мала перехідна зона з'єднання;
- відсутність використання добавочних матеріалів(припої, флюси та електроди, як виняток використання тонких фольг)
- відносно не високі витрати енергії та висока екологічність процесу

Недоліки даного методу:

- складність устаткування (вакуумна камера, насос, прес, системи нагрівання та тохолдження, додаткові механізми та пристрої);
- високі вимоги до поверхонь з'єднання (очищення та полірування);
- розміри виробу обмежені вакуумною камерою;
- тривалий час зварювання.

1.3.1.4. Зварювання вибухом

Зварювання вибухом на сьогодні знаходить дедалі ширше застосування при виготовленні двошарових плакованих сталей та інших біметалів. Тільки за

допомогою зварювання вибухом стало можливим створювати з'єднання рівної міцності сталей з титаном, цирконієм та іншими активними металами, виготовлення яких є складним або неможливим іншими способами зварювання. У науковій літературі цей процес визначається як явище міцного з'єднання поверхонь металевих тіл, що співударяються під деяким кутом, причому принаймні одне з них розганяється до швидкостей 100–150 м/с продуктами детонації вибухової речовини [51].

Розвиток технологій зварювання вибухом успішно здійснювався в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона та низці інших наукових і виробничих підприємств [7, 12, 21, 35, 36, 52, 53, 54, 55, 56].

Фізична природа і механізм твердофазного зварювання, до якого відносяться зварювання пакета гарячою прокаткою та зварювання вибухом, більшістю дослідників пояснюється за допомогою гіпотези топохімічних реакцій. Ця концепція базується на фізичних уявленнях про недосконалість кристалічної решітки та кінетику протікання локальних поверхневих хімічних взаємодій [23, 52, 53, 55]. За даними досліджень, при зварюванні вибухом із високоінтенсивним силовим впливом третя стадія топохімічної реакції (об'ємна взаємодія) не встигає розвинути повною мірою через надкоротку тривалість процесу [52, 54].

Важливим фактором, що супроводжує процес, є локальне підвищення температури в зоні з'єднання. У деяких випадках, особливо при зварюванні міді з алюмінієм або титану зі сталлю, підвищення температури досягає точки плавлення, що призводить до появи ділянок оплавленого металу та інтерметалідів.

На сьогодні розроблено безліч технологічних схем зварювання вибухом, проте в їх основі лежать дві принципові схеми — кутова та паралельна [7, 52, 56].

До основних недоліків методу відносять:

- високі вимоги до очищення контактуючих поверхонь від окалини та іржі;

- необхідність забезпечення підвищеної площинності листів перед зварюванням;
- складність рівномірного розподілу заряду при великій площі листів;
- необхідність проведення термічної обробки для зниження внутрішніх напружень у зоні зчеплення шарів.

Досить часто операцію зварювання вибухом супроводжують наступною гарячою прокаткою. У цьому випадку використовується заготовка основного металу великого перерізу та плакувальний шар із певним запасом по товщині. Застосування такої комбінованої технології дозволяє усунути проблеми рівномірності з'єднання на великих площах та мінімізувати залишкові напруження, хоча це помітно збільшує загальну трудомісткість виготовлення біметалу [54].

1.3.2. Спосіб виготовлення біметалів з оплавленням поверхні з'єднання (рідиннофазний)

1.3.2.1. Ливарний метод отримання біметалів

Метод ливарного покриття є досить старим і застосовується для отримання різних видів біметалевої продукції. До таких можна віднести покривання литтям, технології відцентрового лиття, безперервне лиття плоских або круглих біметалевих заготовок[57–60].

В основу методу **покривання литтям** лежить отримання двох- або багат шарового злитків при заливанні рідкого одного складу на твердий шар другого складу. Під час заливання найчастіше не відбувається щільного з'єднання шарів через відносно низьку температуру плити з корозійностійкої сталі. Приварка шарів відбувається лише під час прокатки біметалевого злитка на блюмінгу або слябінгу. У нагрівальні колодязі злитки передають при 750-900 °C і нагрівають за режимами, прийнятим для прокатки сталі плакуючого шару[61]. Число і розташування плит визначає подальшу технологію і число шарів в готовому прокаті[57]. В якості розділової обмазки використовують суміш магнезитового порошку з цапон-лаком. Поверхню, призначену для

з'єднання з металом що заливається, ретельно протирають, знежирюють, промивають 50 %-ним розчином соляної кислоти і покривають рівним шаром хлористого амонію товщиною 2-2,5 мм. При заливанні рідкої сталі у виливницю хлористий амоній розкладається і гази що утворюються оберігають контактну поверхню від окислення.[57]

Прокатування двошарових листів на сляби проводять з обтисненням 20-30 мм за прохід, кантовка і плющення з ребровими проходами небажані. При розрізанні розкату на сляби ножицями блюмінга (слябінга) видаляють головну і хвостову частини злитка. Двошарові сляби на листи прокочують на товстолистових станах. Після прокатки двошарові листи піддають термічній обробці. Після термічної обробки проводять правку розкатів, розмітку, порізку, відсіч проб, травлення, обробку, і маркування.[22]

Операція травлення включає обробку двошарових листів в лужному розплаві для розпушення окалини корозійностійкої сталі, промивку в холодній воді, травлення в кислотному розчині, промивку і сушку з подальшим відбілюванням в розчині азотної кислоти з селітрою.

В даний час даний спосіб витіснений іншими, що забезпечують більш якісне з'єднання шарів, проте його принципи все ще використовуються в деяких сучасних способах плакування[9].

Безперервне лиття плоских або круглих біметалевих заготовок, призначених для їх подальшої пластичної деформації, - один з перспективних напрямків у виробництві багатошарових металів. Цей спосіб дозволяє значно підвищити продуктивність праці, знизити собівартість виробів і виключити з технологічного потоку екологічно шкідливі операції травлення й абразивного зачищення металу, механізувати й автоматизувати виробничий процес. Заливка двох або більше рідких металів у виливницю забезпечує більш міцне з'єднання шарів, ніж заливка рідким металом твердої складової. При цьому виключаються операції з підготовки поверхонь та встановлення твердої складової у виливницю.[57, 60]. Існують два різновиди безперервної виливки заготовок що

складаються із декількох шарів: лиття з двох або більше рідких металів і лиття з твердого та рідкого металів[26, 61].

При використанні технології **відцентрового лиття** біметалевих заготовок основні технологічні параметри визначаються методами розрахунку і уточнюються шляхом експерименту, що гарантує якість біметалевих виливків. Переваги відцентрового лиття біметалевих труб і циліндричних заготовок наступні: універсальність технології, тобто можливість відливати вироби з зовнішньої або внутрішньої робочою поверхнею; відпадає необхідність у складній і трудомісткій підготовці до з'єднання поверхонь різнорідних металів; висока продуктивність праці, що обумовлюється робочим циклом відцентрової машини при литті біметалевих труб та заготовок; можливість повної механізації і автоматизації технологічного процесу; отримання відносно якісних біметалевих виливків з необхідними експлуатаційними властивостями робочої поверхні; великий вихід придатного металу, що становить 85-90 %; не вимагається висококваліфікована робоча сила при виробництві біметалевих виробів, що обумовлено простотою обслуговування відцентрової машини[62].

При правильному виборі технологічних параметрів відцентрового лиття під флюсом якість зварюваності різнорідних металів знаходиться в прямій залежності від часу витримки між заливкою металу першого і другого шарів, швидкості і температури заливки різнорідних металів біметалевої виливки. При відхиленні цього проміжку часу від оптимального значення може відбутися взаємне перемішування металів або їх розшарування.

1.3.2.2. Багатошарове електродугове наплавлення

Удосконалення методу наплавлення вуглецевих сталей високолегованими, в тому числі корозійностійким сталями, призвело до використання для покриття металів багатошарового електродугового наплавлення, яке широко застосовується для безпосереднього покриття листів, а також кованих, штампованих деталей з вуглецевої або низьколегованих сталей. Цим методом доцільно отримувати великогабаритні біметалеві заготовки, призначені для

подальшого прокатування на листи. При використанні методу багатошарового наплавлення з'єднання шару, що наноситься, з основою відбувається в рідкому стані завдяки проплавленню основного шару на певну глибину і перемішування металу, що наплавляється з розплавленим металом основи. В результаті забезпечується висока міцність зчеплення шарів. Особливістю способу є те, що формування наплавленого шару і утворення сполуки шарів відбуваються, як правило, одночасно[63–71].

При багатошаровому наплавленні змінюється хімічний склад, головним чином перших шарів металу, що наноситься, внаслідок перемішування, яке залежить від величини проплавлення основного шару. Для зменшення цього ефекту застосовують наплавку двома електродами із дроту в захисному газі

Розплавлення так званого «холодного дроту», що підводиться до дуги між струмопровідних електродом і основним металом, забирає частину енергії дуги. В результаті, незважаючи на значно більшу теплову потужність, яка підводиться, підплавлення основного металу незначне і становить всього 10-15% товщини першого шару наплавлення. Подальше обмеження підплавлення металу основи не є пріоритетним, так як це може порушити зчеплення шарів [63, 65, 66, 68, 70]. Зміна концентрації деяких хімічних елементів у перехідній зоні може бути скомпенсовано за рахунок підвищення легування електрода: у разі використання високолегованого електрода для першого шару, що наплавляється, отримують необхідний склад, і подальші шари наплавляють менш легованим електродом.

Розвитком даного способу стало використання для наплавлення стрічкового електрода замість електроду із дроту, що дозволило забезпечити необхідні склад і товщину шару накладенням меншої кількості швів.

Слід підкреслити, що всі способи електродугового наплавлення порівняно дорогі і малопродуктивні. Для стрічкових електродів необхідна холоднокатана стрічка з високолегованих сталей, виробництво якої технологічно часто буває складною. При виготовленні великогабаритного листового прокату двошарових біметалів процес нанесення наплавлення стає малопродуктивним, тому наплавку наносять на поверхню сляба, підготовленого для подальшої прокатки на лист необхідних

розмірів. В даний час спосіб виготовлення двошарових біметалів нанесенням наплавленого шару електродуговим зварюванням практично не використовується.

1.3.2.3. Метод електрошлакового наплавлення (ЕШН)

Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в середині ХХ 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) [63, 72–79]

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. 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. Необхідною умовою 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 електрода в шлак.

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

- можливого утворення несучільностей по площі контакту між смугами біметалу в процесі наступного прокатування зі збільшеними товщинами функціонального шару;
- можлива нерівномірність по товщині нанесеного шару;
- підвищена в порівнянні з іншими способами витрата дорогої нержавіючої сталі (неможливість отримання малої товщини наплавленого шару, окрім способів горизонтального наплавлення стрічками)).

1.3.2.4. Плазмове наплавлення

Технології плазмowego наплавлення дозволяють виготовляти біметалеві листи і вироби з них. 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. Вони отримали широке поширення при виготовленні футеровок в металургійному виробництві, деталей, що працюють в умовах гідро-, газо- і ударно-абразивному зношуванні. 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 [80, 81].

Зараз максимальна температура при якій можливе використання біметалічної футеровки становить до 600 °C.

Зносостійкі листи можуть використовуватися в самих різних вузлах промислового устаткування. Збірка, з'єднання і закріплення біметалевих виробів

на поверхні, що захищається, проводиться або за допомогою зварювання, або за допомогою болтових з'єднань, шпильок та ін[82].

1.3.2.5. Лазерне зварювання та наплавлення

Застосування **кліщового лазерного зварювання** для виготовлення біметалевих заготовок вирішує багато з проблем перерахованих вище, досягається висока якість шва і не потрібно застосування вакуумних камер, як при електронно-променевому зварюванні, а це дуже важливо в конвеєрному виробництві. Вона дозволяє не тільки підвищити якість обробки матеріалів, а й поліпшити техніко-економічні показники виробничих процесів[83, 84].

Сутність процесу кліщового лазерного зварювання[83] для отримання біметалів полягає в отриманні з'єднання внахлест шляхом проплавлення лазерним променем двох або більше однорідних або різнорідних металевих листів розташованих один над одним, лазерний промінь, для збільшення площі з'єднання, рухається по певній траєкторії.

Основними **перевагами** зварювання лазером, є можливість отримання зварних з'єднань різнорідних металів, висока швидкість зварювання, висока густина потужності енергії, яка достатньо добре регулюється при введенням тепла, короткочасний нагрів, як результат практично повна відсутність зон термічного впливу, а звідси малі залишкові деформації, можливість застосування універсального лазерного обладнання, можливість автоматизації і роботизації технологічного процесу. З огляду на програмне управління лазерним устаткуванням при відпрацьованій технології можна забезпечити високий показник повторюваності процесу зварювання, що має велике значення в умовах серійного виробництва.

До недоліків можна віднести утворення крихких інтерметалічних сполук та погані механічні властивості, які вони мають, це наприклад, суттєво обмежує широке застосування біметалевих матеріалів із алюмінієво-сталевими з'єднаннями[84]. Контроль та мінімізація нуклеації та росту інтерметалічних сполук є **основною перешкодою**, яка і досі не вирішена, і ще буде ключовою

темою досліджень в майбутньому. Необхідно вирішити зменшення інших **дефектів** зварних швів, таких як розтріскування, пористість та варіації різних дефектів зварних швів. Досягнуто прогресу в покращенні механічних властивостей швів використовуючи лазерно-дугове гібридне зварювання плавленням шляхом додавання та контролю наповнювального матеріалу. Більшість робіт на сьогоднішній день ще на стадії експерименту, переважаючи теорії та технології не визріли. Для різних систем матеріалів та типів з'єднань необхідна додаткова робота з вивчення нових методів поліпшення властивостей зварних швів.

Лазерна наплавлення являє собою спосіб отримання покриттів із заданими фізико-механічними властивостями шляхом нанесення матеріалу для наплавлення (порошок, фольга, дріт) з подальшим оплавленням його лазерним променем. Найменші витрати енергії забезпечує застосування порошкових матеріалів. Товщина наплавленого покриття може досягати 40 .. 50 мкм.

Порошок може подаватися на поверхню деталі за допомогою дозатора (безпосередньо в зону лазерного променя), шляхом попередньої обмазки поверхні клеєвим складом з подальшим обсипанням порошку або у вигляді колоїдного розчину - суміші порошку і розчину целюлози. Для першого випадку характерний підвищений (в 5-7 разів) витрата порошку і погіршення фізико-механічних властивостей покриття, хоча енергоємність процесу наплавлення найменша.

Зі збільшенням товщини обмазки підвищується поглинання випромінювання. Одночасно зростає твердість нанесеного шару, яку можна регулювати в межах 35 ... 65 HRC шляхом підбору швидкості наплавлення і грануляції порошку матеріалу.

Збільшення розмірів частинок порошку призводить до зростання твердості і зносостійкості покриття. Найбільш раціональною є суміш декількох фракцій з наступними розмірами зерен, мкм: 40 ... 100 - 10%, 100 ... 280 - 80%, 280 і більше - 10%. Якість покриття залежить від швидкості переміщення лазерного променя, товщини наплавленого шару і ступеня перекриття валиків. Зазвичай покриття,

що наносяться лазерним наплавленням, мають такі характеристики: товщина шару, наплавленого за один прохід, до 0,8 мм; товщина дефектного шару не більше 0,1 мм; міцність зчеплення покриття з поверхнею на яку нанеситься до 0,35 кН / мм² ; втрати наплавляється не більше 1%; розмір зони термічного впливу не більше 1 мм.

До переваг, як і у випадку лазерного зварювання, можна віднести локальність процесу, від цього малі деформації, добру контрольованість і можливість отримання тонких шарів, мінімальне перемішування функціонального матеріалу з основою, процес автоматизований, що дає можливість наплавляти на вибраних місцях і наносити на важкодоступні поверхні, покриття мають підвищену стійкість до корозії та ерозії. До недоліків віднесемо високу ціну на обладнання, утворення пор та тріщин, характер розташування яких залежить від складу добавочного матеріалу і способу наплавлення, потребують додаткових технологічних прийомів для їх усунення, також відносно низька продуктивність і використання технології в більшості для відновлення зношених покриттів біметалів.

1.4. Характеристики якості та експлуатаційні показники біметалів

Відомо[85, 86], що оцінка якості з'єднання шарів в біметалічному прокаті пов'язана з певними труднощами, пов'язаними з істотною відмінністю фізичних властивостей і хімічного складу металів основного і функціонального шарів, а також з незначною товщиною останнього, яка становить зазвичай не більше 15% загальної товщини біметалу.

Для кількісного встановлення міцності зв'язку плакуючого і основного шарів біметалу, отриманого прокатуванням (або іншим способом), традиційно використовується випробування зразків на зріз.

Дана методика рекомендується при товщині біметалу до 8 мм. Вона використовує розтягнення до руйнування плоского зразка з виконаними надрізами кожного з його верств з подальшим розрахунком міцності з'єднання шарів по відношенню зусилля при розтягуванні до площі поверхні з'єднання між надрізами[85, 86]. При більшій товщині біметалу рекомендується

використовувати зразки зі «сходинкою» (для випробування на «сколювання» покритого шару). Відзначимо, що остання методика використовується в чинному міждержавному стандарті ГОСТ 10885-85 «Сталь листова гарячекатана двошарова корозійностійка. Технічні умови» для визначення міцності з'єднань шарів двошарових листів товщиною понад 8 мм, при цьому товщина шару, який наноситься повинна бути не менше 2 мм.

Біметали також випробовуються на згин, скручування, розтягування, повторне стиснення і на вплив різкої зміни температури з подальшим продавлюванням[87, 88].

Відомі методи контролю біметалічного прокату на міцність зчеплення його верств можна поділити на три групи.

1. До першої групи належать способи технологічних випробувань, якісно характеризують міцність зварювання шарів: випробування зубилом, видавлюванням циліндричних стаканчиків або лунок по Еріксену, на загин (перегин), кручення і ін.
2. До другої групи належать способи кількісної оцінки міцності зчеплення шарів: випробування на відрив і зріз шарів при статичному або динамічному навантаженні.
3. До третьої групи належать фізичні методи контролю якості біметалевих матеріалів без їх руйнування.

Метод якісного визначення міцності зчеплення шарів за допомогою зубила використовують в основному при виробництві і застосуванні антифрикційних підшипникових біметалів армко-залізо - сплав АСМ і сталь 08кп - сплав АО20-1. З біметалевих смуг вирізують зразки вздовж напрямку прокатки розмірами 20-30x150-200 мм. Зразок затискають в лещата і підрубують його зубилом з боку сплаву. При значній товщині плакуючого шару роблять неповне підрублюючої сплаву; зразок перегинають в сторону сплаву і потім в сторону сталі до утворення тріщини на сплаві. Після цього зразок відгинають в бік сталі на 90 ° (до торкання губок лещат). Зубило вставляють в тріщину, що утворилася між шарами так, щоб зрубування сплаву відбувалося по всій ширині зразка. Ударами

молотка по зубилу виробляють сколювання шару антифрикційного сплаву зі сталевій основи. Якщо зубило проходить по межі поділу шарів з великими труднощами, то вважають, що біметал має надійну міцність зчеплення шарів і придатний для виготовлення вкладишів підшипників. Якщо ж зубило при ударі переміщається по міжшаровій границі, то міцність зчеплення є незадовільною і біметал бракують [87, 88].

Випробування на загин проводять на розривній машині з установкою біметалічного зразка на опори і вигином його навколо оправки, що має діаметр, кратний товщині листа – a , в межах $a \leq d \leq 4a$. Ширина зразка зазвичай дорівнює подвоєній товщині листа, але не менше 10 мм, а довжина дорівнює $5a + 150$ мм. Свідченням якісного з'єднання шарів служить відсутність розшарування, тріщин і розривів шарах біметалу після випробування при заданих радіусах і кутах вигину.

Випробуванню на перегин піддають біметалічні листи товщиною не більше 5 мм [87]. Розміри зразків приймають зазвичай наступними: ширина $b = 2a + 10$ мм, довжина 150 мм.

Зразок затискають в губки приладу в вертикальному положенні і потім по черзі загинають праворуч і ліворуч на 90° зі швидкістю не більше 60 перегинів за хвилину. Випробування проводять до руйнування зразка з фіксацією відповідного числа перегинів. Ознакою якісного зчеплення шарів вважається відсутність у зламі відшарування плакуючого шару. Якщо при випробуванні біметалів на видавлювання лунки по Еріксену або розривних зразків біметал поводить як монометал, тобто відсутня відшарування покриття, то вважають, що в біметалі досягнуто надійне зчеплення шарів. Побічно про міцність зчеплення складових можна судити також при випробуванні зразків на скручування.

В даний час для визначення міцності зчеплення шарів біметалів переважно застосовують методи кількісної оцінки за допомогою випробувань на відрив і зріз шарів при статичному або динамічному навантаженні.

Найбільш простим у виготовленні зразків і проведенні випробувань міцності зчеплення шарів біметалів на зріз є спосіб розтягування плоских зразків з поперечними надрізами шарів (рис. 1.3.3, а). Для виключення можливих помилок в оцінці міцності зчеплення надрізи слід робити на глибину, що перевищує товщину відповідного шару на 0,1- 0,5 мм. Ширину майданчика зрізу вибирають з наступного умови: можливе зусилля зрізу має бути менше зусилля розриву в небезпечному перерізі менш міцного компонента біметалу. Зазвичай вона дорівнює 2-4 мм.

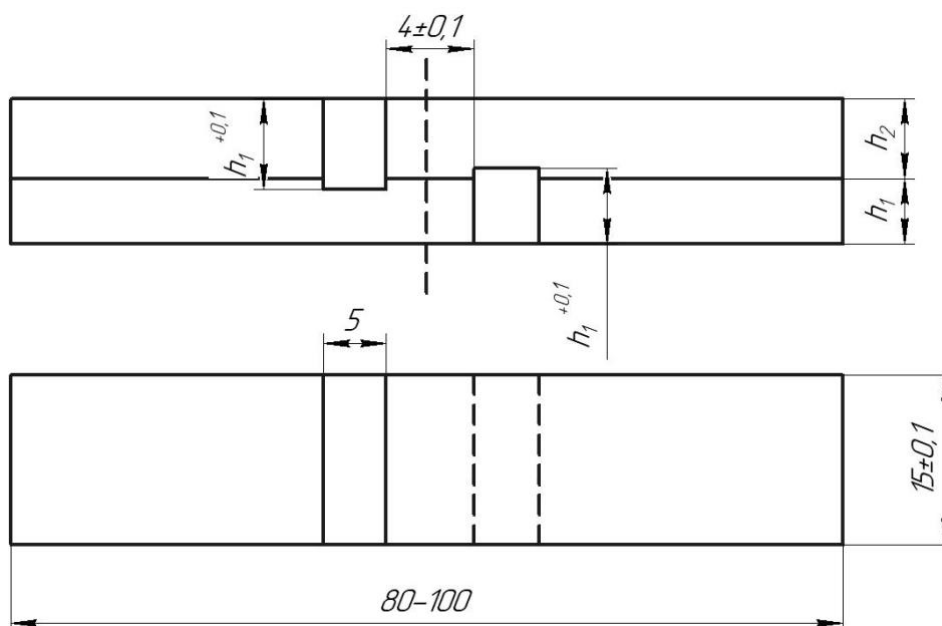


Рис. 1.3.3. Спосіб визначення міцності зчеплення шарів біметалу при випробуванні на зріз на розривної машині

Зразок затискають в захопленнях розривної машини і піддають розтягуванню. Розподілом максимального навантаження на величину площі зсуву визначають міцність зчеплення шарів на зріз в кг / мм². Цей метод особливо зручний для випробування біметалів з однаковою товщиною шарів. У разі різної товщини шарів при розтягуванні може спостерігатися деякий вигин зразків, який впливає на результати випробувань на зріз. Тому для отримання стабільних і порівнянних даних про міцність зчеплення шарів біметалів необхідно сфрезерувати товстий шар до розмірів тонкого або при підготовці зразків для випробування забезпечувати постійне співвідношення між їх товщиною.

Розглянуті методи якісної і кількісної оцінки міцності зчеплення шарів застосовують для вибіркового контролю біметалічного прокату. Така методика не виключає випуск окремої біметалічної продукції з низькою міцністю зчеплення шарів і місцевими ділянками розшарування по межі поділу. Внаслідок цього спостерігаються значні втрати металу при виготовленні різних виробів з біметалічного прокату, а в ряді випадків можливі аварії агрегатів при експлуатації, в яких був застосований біметал з внутрішніми дефектами (розшарування, тріщини, пори і т. ін.).

Тому для підвищення надійності та довговічності роботи машин і апаратів, виготовлених з біметалів, необхідно проводити 100% -ний контроль їх якості і застосовувати для цих цілей фізичні методи випробувань біметалічного прокату без його руйнування.

Контроль суцільності шарів (розшарувань) найбільш доцільно здійснювати за допомогою **ультразвуку**[89–91]. Дослідження показали, що ультразвуковим способом досить чітко визначаються межі зон відсутності з'єднання шарів різних листових біметалів в поєднанні вуглецевої сталі з нержавіючими сталями, міддю, латунню, нікелем, сріблом і алюмінієвими сплавами. Порівняльна перевірка зон розшарування випробуванням на відрив і зріз шарів підтвердила результати досліджень ультразвуком. Перехід від зони біметалу, що нерозшарувався до розшарованої носить різкий, ступінчастий характер.

Для контролю розшарувань доцільно застосовувати **ультразвукові поздовжні хвилі** і хвилі інтерференційного типу з частотами коливань 2,5-5,0 МГц. При цьому контроль можна проводити як дзеркально-тіньовим, так і ехо-методом. При контролі поздовжніми ультразвуковими хвилями найбільшою чутливістю володіє ехо-метод. Цим методом виявляються розшарування з мінімальною площею 8 мм², а дзеркально-тіньовим 60 мм², при цьому товщина виявляються розшарувань відповідно дорівнює 5-10 і 2-5 мкм.

Контроль механічних і експлуатаційних властивостей біметалічного прокату сталь - кольорові метали різного призначення здійснюють відповідно до вимог

ГОСТів або технічних умов, а також за погодженням із споживачами біметалів, де і обумовлюються необхідні методи виконання контрольних випробувань.

1.5. Мета й завдання дослідження

Аналіз літературних джерел по існуючим методам виготовлення біметалів показує, що поширені технології нанесення на робочі поверхні виробів різного виду адгезійних покриттів (газополуменеве, полум'яне, детонаційне і вакуумне напилення, електролітичне осадження та ін.). Поряд з високою продуктивністю, широкою гамою наносяться матеріалів, основним їх недоліком є обмежена товщина нанесених якісних покриттів і головне - низька міцність їх зчеплення з основою, що не перевищує 15-20 кг / мм².

Набули розвитку технології виготовлення біметалів з використанням зварювання тертям [31, 35, 36, 38, 42, 43, 46, 92, 93]. Процеси ефективні але пов'язані з пошкодженням поверхонь біметалів, а з'єднання – потребують захисту від корозії. Дифузійні способи виробництва біметалів забезпечують високу міцність зчеплення складових, але мають високу енергоємність і малу продуктивність [22, 47-49]. Значне поширення у промисловості України набула технологія зварювання складових біметалу вибухом, яка забезпечує під дією імпульсу тиску утворення хвилеподібної зони з'єднання [7, 52–54, 56]. Процес має високу продуктивність, забезпечує високу міцність зчеплення, яка при великих розмірах листів може мати певну нерівномірність розподілення по площі складових, відрізняється високим рівнем шуму.

Найбільш відоме виготовлення біметалів з використанням процесів лиття, які почали застосовувати у промисловості раніше інших, але вони енергоємні і мають багато інших недоліків [26, 28, 58–60, 94, 95]. Значний поштовх розвитку процесів виготовлення біметалів надали технології електродугового наплавлення, у тому числі порошковими стрічками, розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона і ТОВ «Стіл Ворк» [106]. До головних недоліків цих технологій слід віднести низьку якість поверхні наплавленого

шару, яка потребує додаткової механічної обробки, порівняно високу собівартість процесу виробництва. Конкурентноспроможними є способи електрошлакового наплавлення рідким складовим біметалу, що дозволяють отримувати якісне з'єднання шарів з мінімальним підплавленням основного металу [7]. Виготовлення біметалів плазовим наплавленням застосовується у промисловості, має достатньо високу продуктивність до 100 г/хв. Товщина наплавленого шару досягає 5 – 6 мм, ширина при коливанні плазмотрону до 40-50 мм [8]. При цьому шорсткість поверхонь і точність розмірів виробів потребують наступної механічної обробки. Відомі способи виготовлення біметалів з використанням лазерного наплавлення, які, за виключенням окремих випадків, важко віднести до економічно перспективних. Але останні роботи в цьому напрямку, коли складові біметалу з'єднуються наскрізним проплавленням верхньої з них, свідчать про перспективність цього напрямку [9].

Останнім часом розроблено плазово-ливарний спосіб виготовлення біметалу, що передбачає заливку розплаву однієї із його складових на попередньо розігрітий плазовим струменем до температури плавлення тонкий поверхневий шар другої його складової з подальшим охолодженням даної конструкції в кристалізаторі [10]. Проблемними залишаються питання забезпечення рівномірності сплавлення складових біметалу і пов'язаною з цим продуктивність процесу.

Значний інтерес представляють роботи [11,12], в яких запропоновано і розроблено новий спосіб виготовлення біметалу, аналогічний наведеному вище, але відрізняється тим, що підплавлення поверхні складової біметалу здійснюється сфокусованим лазерним променем, розгорнутим у відрізок лінії. Головним недоліком запропонованого процесу є складність отримання біметалевих листів великих розмірів.

Наведений аналіз різних способів отримання біметалевих листів свідчить про доцільність пошуку нових високопродуктивних і економічно ефективних процесів їх виготовлення.

Відзначаючи досягнуті успіхи в розробці і використанні технологій отримання біметалевих 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 біметалевих матеріалів мають певні недоліки, що стосуються продуктивності процесів, якості поверхні, їх структурно-фазового і напруженого стану, обмеженості у виборі складових біметалів.

Це дає підставу вважати, що підвищити ефективність їх виготовлення і якість можна розділивши весь процес виготовлення на два етапи. На першому етапі застосувавши висококонцентрований джерело енергії, лазерне випромінювання, сфокусоване в відрізок лінії з розподілом інтенсивності типу Тор-Нат або розгорнуте в відрізок лінії за допомогою спеціального скануючого пристрою, здійснюється розплавлення поверхневого шару переміщається становить биметалла на глибину 30-50 мкм. Одночасно з початком його переміщення на розплавлену поверхню зі спеціальної фурми з заданим витратою подається розплав другої складової біметалу, попередньо підготовленого за допомогою індукційного нагріву.

У зв'язку з вище наведеним **метою дисертаційної роботи** є підвищення ефективності отримання біметалевих матеріалів з використанням лазерно-ливарних процесів та розробка відповідного обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Виконати порівняльний аналіз областей застосування біметалевих матеріалів та сучасних методів їх виготовлення у промисловості, визначи їх енергетичні та інші технологічні показники.

2. Розробити комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів та його різновид, визначиши їх енергетичні та інші технологічні показники

3. Провести теоретичні та експериментальні дослідження для визначення взаємозв'язку вхідних технологічних параметрів дії лазерного променя і ливарного процесу з вихідними параметрами якості поверхневого шару.

4. Виконати параметричний аналіз комбінованого лазерно-ливарного процесу, визначити межі варіювання головних і засоби стабілізації другорядних факторів.

5. Розробити математичну модель процесів лазерно-ливарного методу виготовлення біметалевих матеріалів, встановити його основні закономірності, визначити рівні та межі зміни технологічних параметрів комбінованої обробки

6. Експериментально встановити основні технологічні закономірності комбінованого лазерно-ливарного процесу, визначити його механізм.

7. Визначити основні закономірності зміни характеристик якості з'єднання складових біметалу та експлуатаційних властивостей виробів (мікроструктури, фазового складу, мікротвердості, величини і характеру розподілу залишкових напружень, зносостійкості).

8. Розробити обладнання та рекомендації (алгоритм) для практичного використання лазерно-ливарних процесів виготовлення корозійностійких біметалів та керуючі програми для формування на поверхні функціональної складової топографії з регулярним мікрорельєфом.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

На підставі проведеного аналізу літературних даних по створенню та раціональному використанню біметалевих матеріалів можна зробити наступні висновки:

1. Застосування біметалів є технічно доцільним і економічно обґрунтованим в тих випадках, коли необхідно забезпечити одночасно високі властивості міцності і опір дії агресивному корозійному середовищу або зношуванню при високій продуктивності і мінімально можливій собівартості процесу їх виготовлення.
2. Із аналізу літературних джерел випливає, що сучасний стан теорії та технології виробництва виробів із шаруватих металевих композицій не задовольняє запит промисловості із-за недостатнього забезпечення необхідних техніко-економічних та якісних показників.
3. 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, агрегатним станом складових.
4. Не вирішена в повній мірі проблема підвищення якісних та експлуатаційних характеристик біметалів, які працюють в екстремальних та агресивних умовах.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1. Теоретичний аналіз технології виробництва біметалів з використанням лазерно-ливарних процесів

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.

Аналіз різних схем формування біметалів показав, що найбільший інтерес представляють дві з них.

Перша схема передбачає сканування сфокусованим лазерним пучком поверхні одного зі складових біметалу, що переміщається зі швидкістю V . Лазерний джерело потужністю P з певною частотою $f_{ск}$, заданої траєкторією і амплітудою $A_{ск}$ оплавляє дану поверхню на глибину Z . У утворився розплав зі спеціальної фурми з заданим витратою Q подається розплавлений метал складової основи біметалу, ширина потоку якого B відповідає амплітуді сканування пучка. При цьому, перша складова прямолінійно переміщається щодо осі пучка з постійною швидкістю (Рис. 2.1.1. а).

Друга схема відрізняється від наведеної вище тим, що Підплавлення поверхні однієї зі складових биметалла здійснюється лазерним променем, сфокусованим в відрізок лінії. Ширина променя відповідає розміру пучка, виміряного в напрямі переміщення складової, а довжина - в напрямку перпендикулярному йому (Рис. 2.1.1. б).



Рис. 2.1.2. Основні чинники і параметри лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів

Проаналізувавши параметри обробки, були виділені фактори, які мають значний вплив на процес наплавлення і які можуть служити для управління процесом:

- потужність лазерного випромінювання;
- швидкість переміщення основи для біметалла щодо лазерного пучка;
- амплітуда сканування;
- частота сканування;
- початкова температура матеріалу основи для біметалла;
- конфігурація отвору, через яке доставляється розплав (довжина, ширина, глибина);

- товщина шару, який необхідно наплавить;
- висота напірного стовпа.

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.

2.2. Формування сталої зони розплавленої поверхні лазерним скануючим променем

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 вісі ОХ. Таким чином реалізується сталий процес потрапляння розплаву на підплавлену 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 2.2.1:

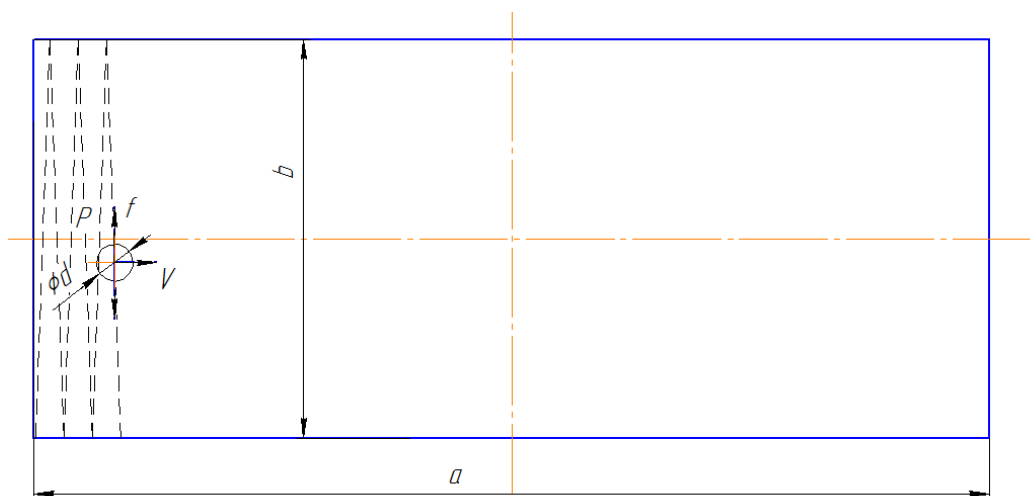


Рис. 2.2.1. Схема сканування основи лазерним пучком діаметром – d швидкості V з частотою сканування f , довжина основи – a ; ширина основи – b ;
 P – потужність лазерного пучка

Моделювання нагріву скануючим лазерного пучком для утворення розплаву на поверхні основи

Чисельний аналіз розподілу температури в твердому тілі, опромінений рухомим гаусовим лазерним променем, здійснюється за допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics [10]. Даний програмний пакет дозволяє зручно і гнучко проводити моделювання теплових процесів, в тому числі дії лазерного випромінювання на металічну основу[108].

Для моделювання була обрана модель(рисунок 4) що імітує основу для виготовлення біметалічного композита наступної конфігурації:

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

Основа обробляється лазерним пучком з проникаючою по глибині інтенсивністю, яка задана одновимірною геометрією (рисунок), що показана на рисунку 2.2.2. нижче.

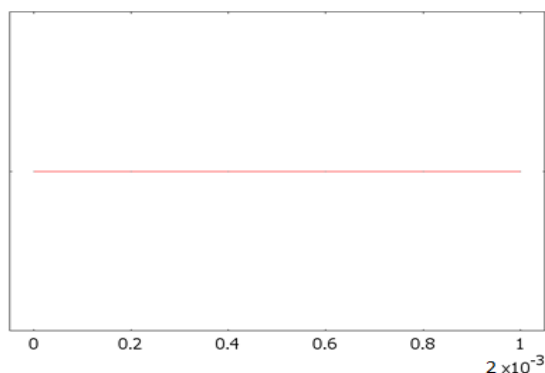


Рис.2.2.2. Геометрична модель 1D

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:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2.1)$$

де ρ - густина, C_p є питома теплоємність, k -тензор теплопровідності, і Q є джерелом тепла, яке в даній моделі рівний 0, бо лазерна дія задається іншим способом.

Матеріал основи було обрано – 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:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -k_{abs} I, \quad (2.2)$$

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:

$$Q = P_{in} k_{abs} I \quad (2.3)$$

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

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

$$I_{test} \cdot (I_x - k_{abs} \cdot I) + k_{abs} \cdot I \cdot P_{in} \cdot T_{test} \quad (2.4)$$

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 OXY, що співпадає з поверхнею основи, що обробляється.

Рівняння по вісі OX має вигляд:

$$x = V_x t \quad (2.5)$$

Рівняння по вісі OY має вигляд:

$$y = Wv(t), \quad (2.6)$$

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

Результати моделювання нагріву основи лазерним скануючим пучком до температури плавлення.

Вихідними даними для розрахунків були прийняті наступні параметри лазерної обробки і конфігурації складової біметалу:

- матеріал складової: сталь 40X13 (AISI 420);
- конфігурація основи: $50 \times 50 \times 2$ мм;
- амплітуда сканування 20 мм, 30 мм, 50 мм;
- частота сканування лазерного променя: 100 Гц, 200 Гц;
- швидкість переміщення основи: 1 м / хв, 10 м / хв;
- потужність лазерного випромінювання: 2-14 кВт.

В результаті моделювання було встановлено, що при обробці складової товщиною 2 мм лазерним променем потужністю 2 кВт при амплітуді сканування 20 мм, частоті сканування 200 Гц і швидкості переміщення основи 1 м / хв, Підплавлення поверхневого шару металу не відбувається. Це видно з графіка точкового розподілу температури по часу (рис. 2.2.3). Температура поверхневого шару не перевищує 1000°C . На графіку кожна з ліній описує зміни температури в точках на центральній осі заготовки протягом всього періоду обробки, що

збігається з напрямком руху складової. Обрані точки визначення температур вказані на рис. 2.2.4.

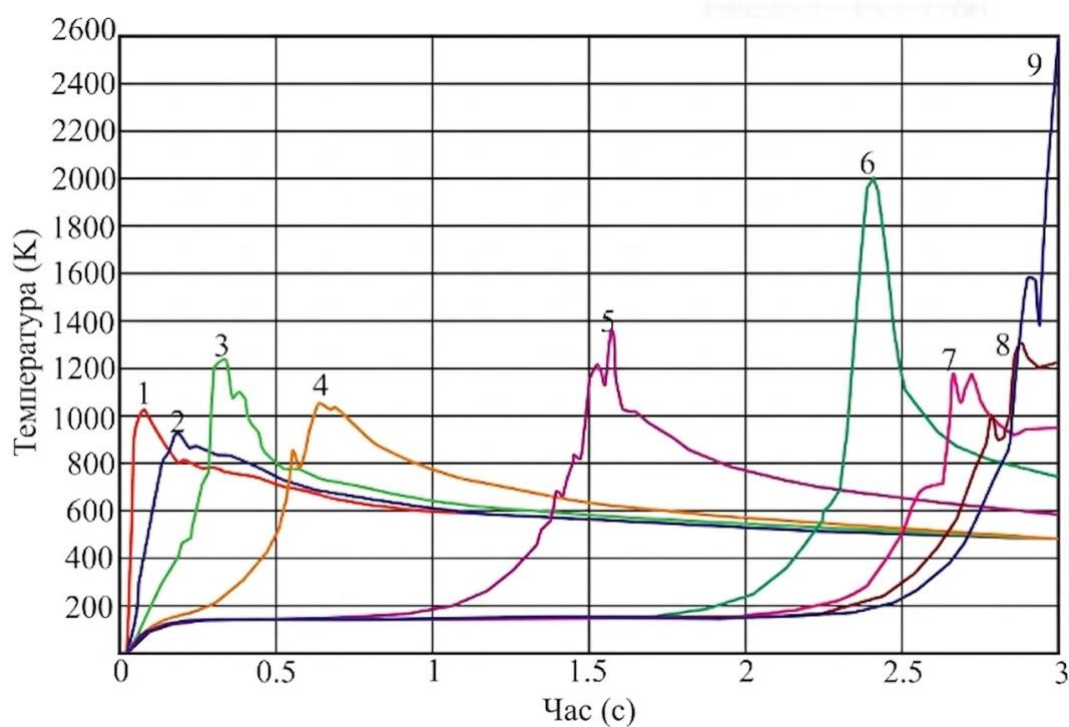


Рис. 2.2.3. Температура точок на центральній осі заготовки за весь період обробки при $P=2$ кВт, $A=20$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв

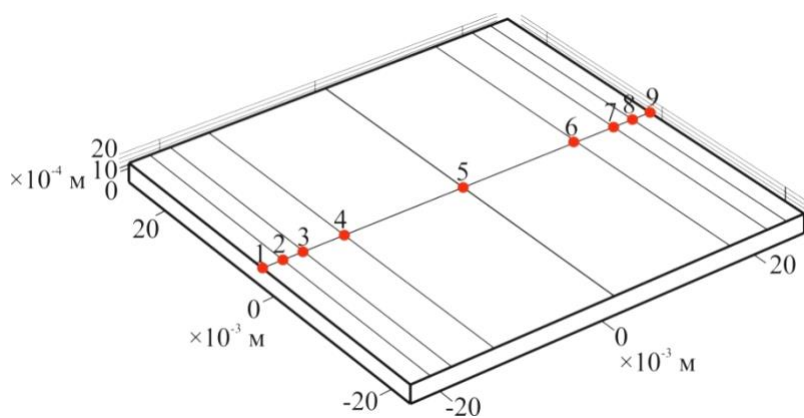


Рис. 2.2.4. Точки, для яких були визначені значення температур у різні моменти часу

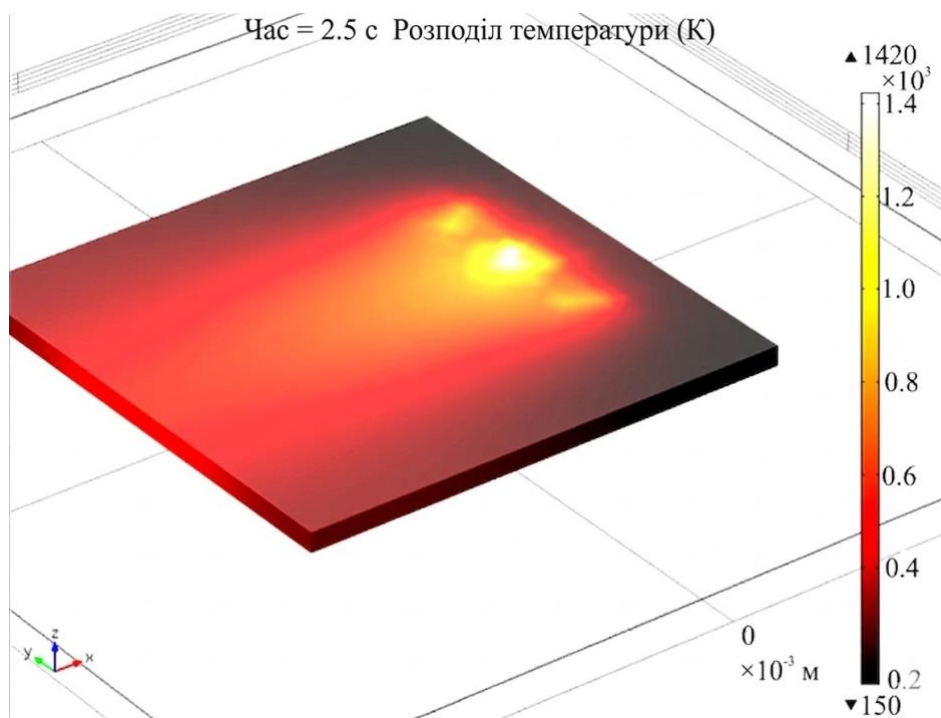


Рис. 2.2.5. Розподіл температур через 2.5 с після початку обробки

Зменшуючи швидкість руху основи, був встановлений режим, що забезпечує підплавлення її поверхневого шару і дозволяє таким чином реалізувати ефективний процес наплавлення. Режим передбачає зменшення швидкості руху основи до 0.25 м / хв. В такому випадку графік розподілу температур (рис. 2.2.5) точок на центральній осі заготовки за весь час обробки має такий вигляд (рис. 2.2.6).

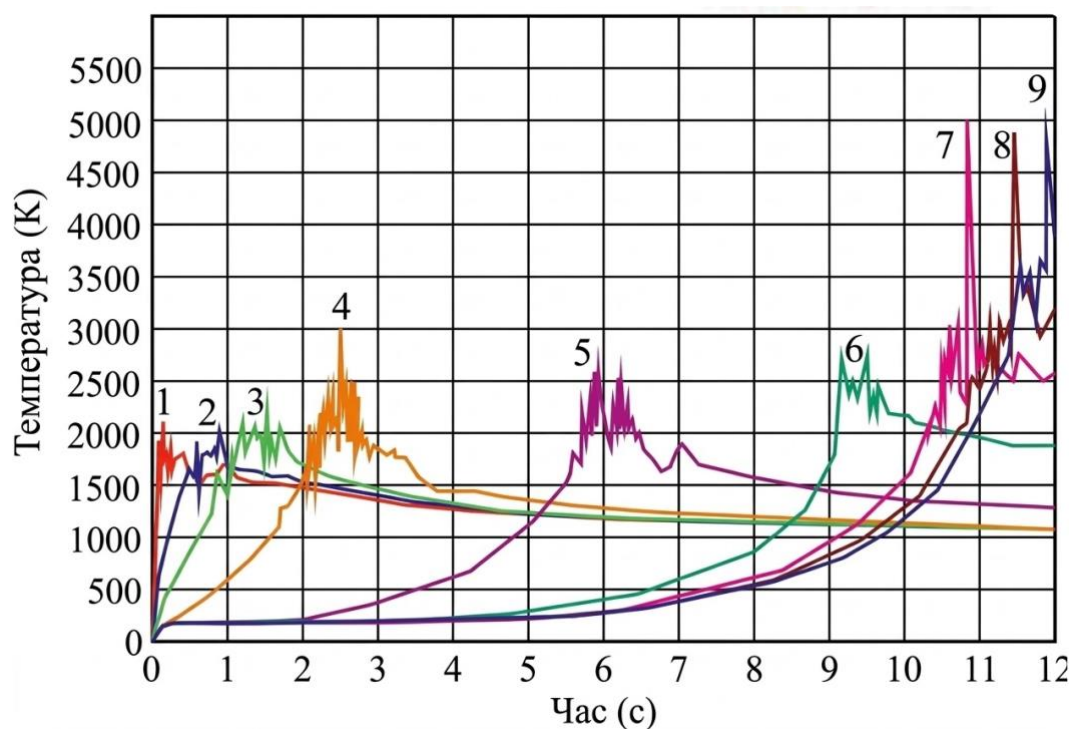


Рис. 2.2.6. Температура точок на центральній осі заготовки за весь період обробки при $P=2$ кВт, $A=20$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=0.25$ м/хв

В процесі подальшого моделювання було встановлено, що збільшення амплітуди сканування призводить до необхідності істотного зменшення швидкості обробки, що є небажаним з точки зору продуктивності. Крім цього моделюванням було встановлено, що зменшувати частоту сканування також нераціонально, оскільки в цьому випадку істотно зменшується середня температура прогріву поверхневого шару, що призводить до необхідності зниження швидкості обробки.

Наступним завданням моделювання є визначення необхідної потужності лазерного випромінювання, при якій в зоні обробки при заданих режимах опромінення забезпечується гарантоване підпалвлення поверхневого шару.

Таким чином, для умови обробки, при яких значення $A=30$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв, раціональне значення потужності лазерного випромінювання складає $P=5.25$ кВт, (Рис.2.2.7).

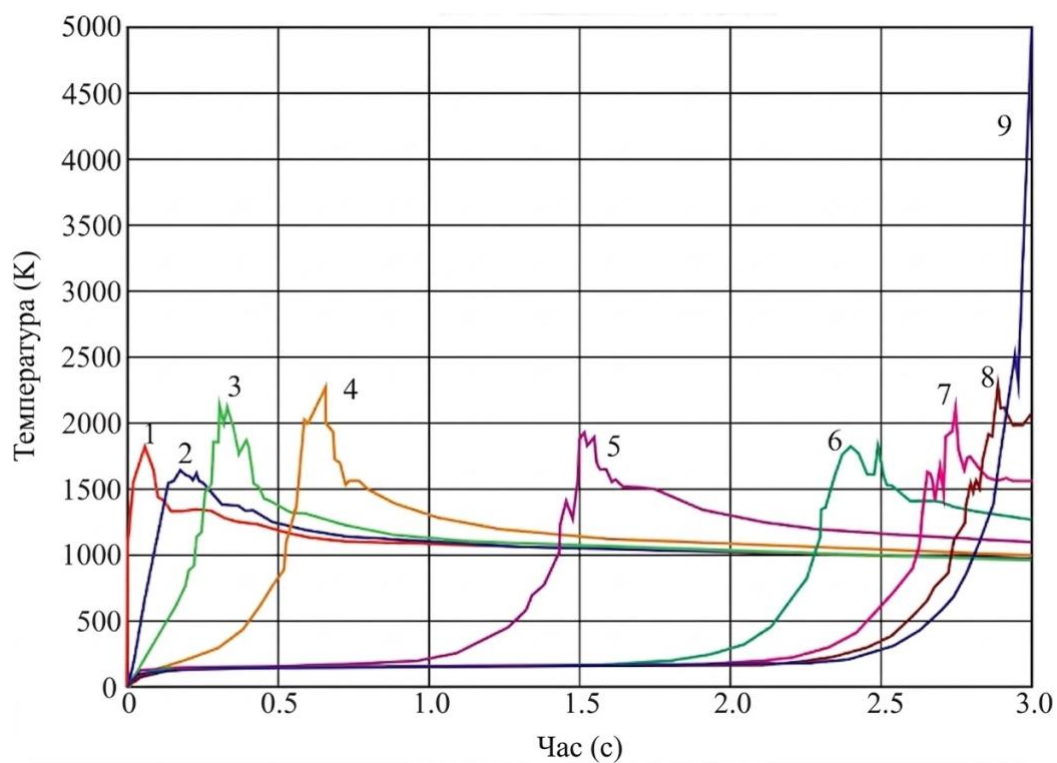


Рис.2.2.7. Температура точок на центральній осі заготовки за весь період обробки при $P=5.25$ кВт, $A=30$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв

Для $A=20$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв раціональне значення потужності лазерного випромінювання складає $P=4$ кВт (Рис.2.2.8).

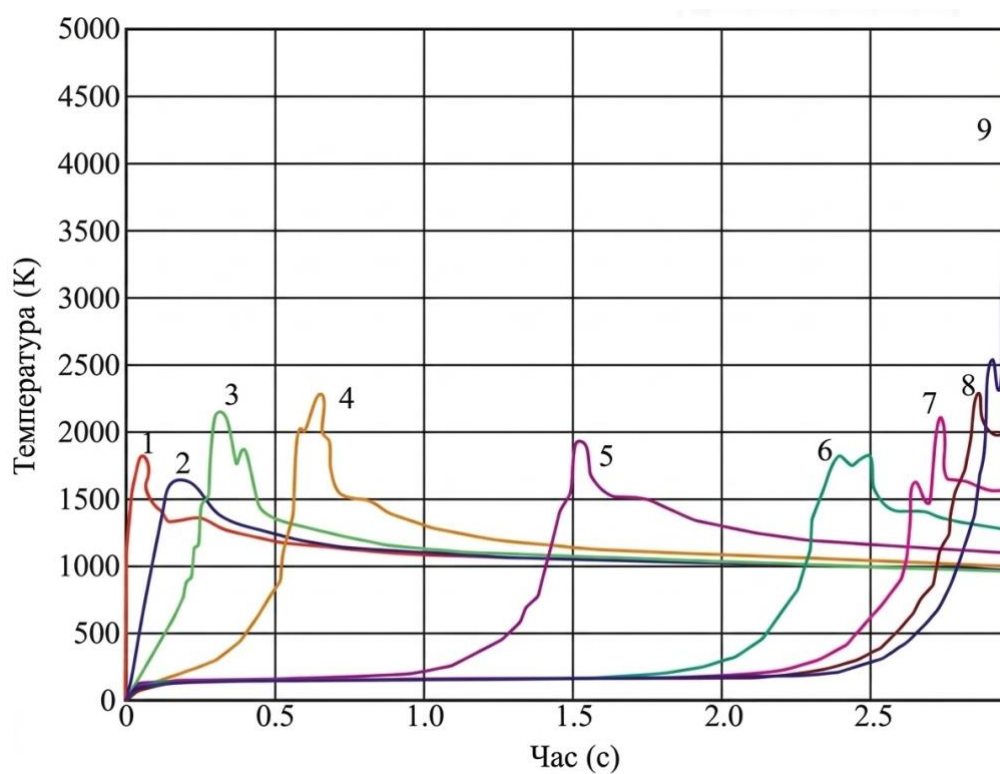


Рис.2.2.8. Температура точок на центральній осі заготовки протягом всього періоду обробки при $P=4$ кВт, $A=20$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв

При збільшенні швидкості переміщення основи в 10 разів для збереження режиму проплавлення потужність лазерного випромінювання необхідно збільшити до 14 кВт, (Рис.2.2.9).

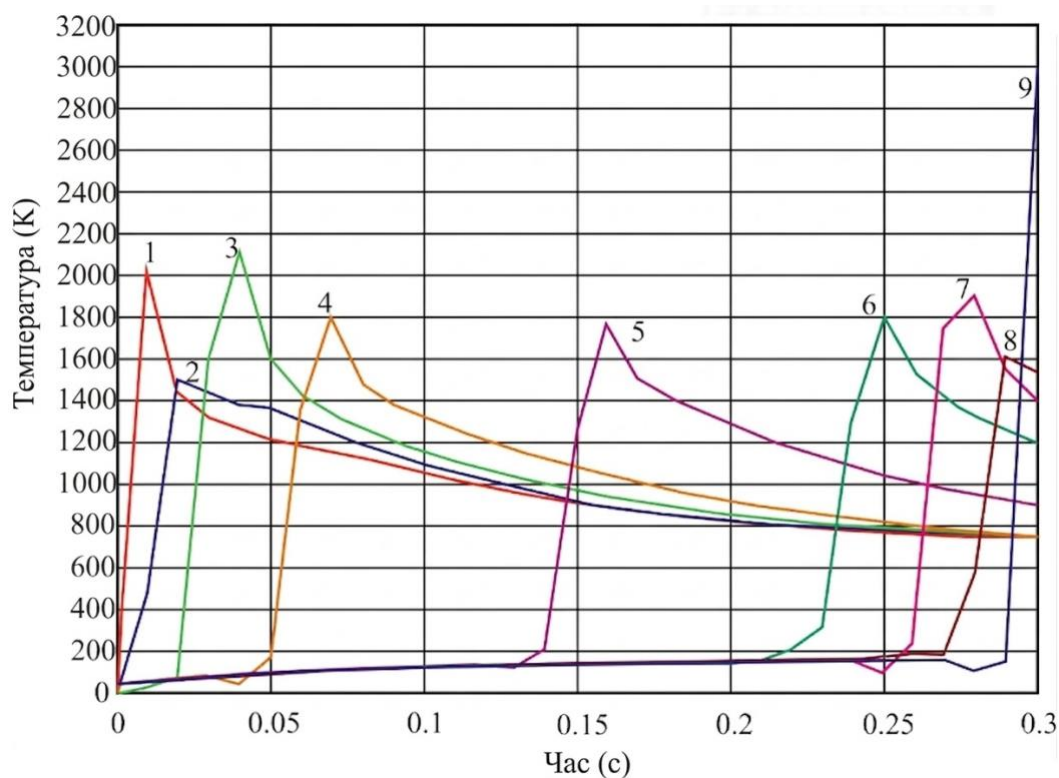


Рис.2.2.9. Температура точок на центральній осі заготовки протягом всього періоду обробки при $P=14$ кВт, $A=20$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=10$ м/хв

Для $A=50$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв раціональна потужність лазерного випромінювання складає $P=8.5$ кВт, (Рис.2.2.10).

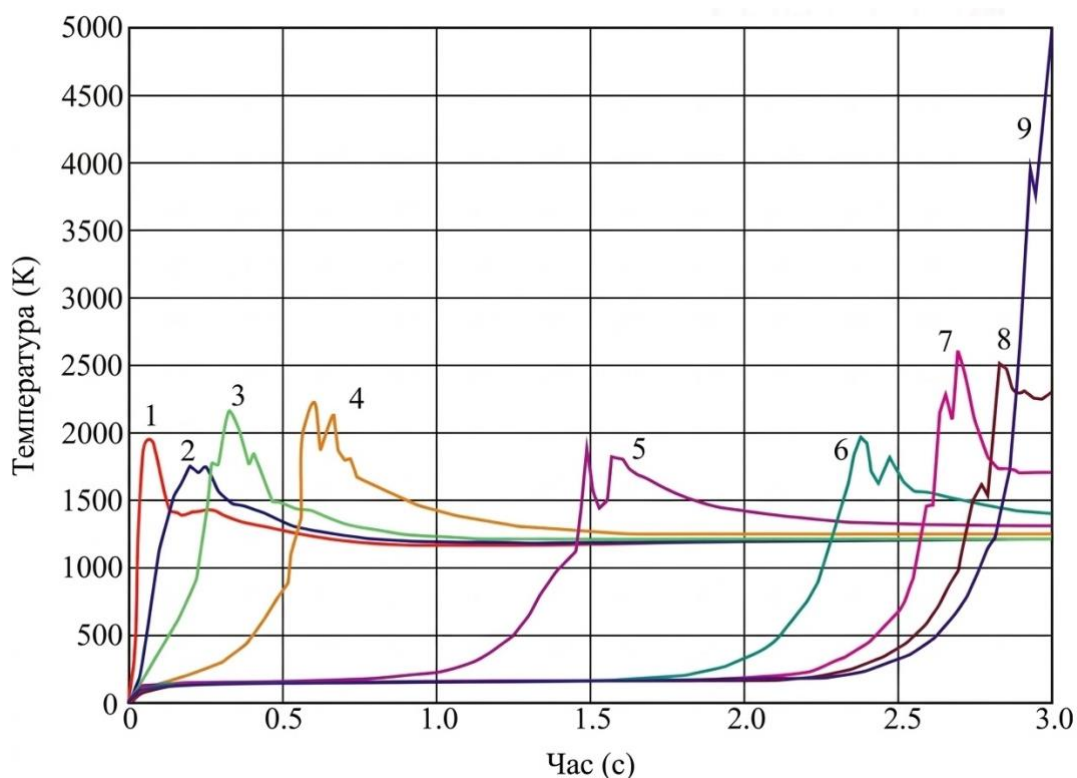


Рис.2.2.10. Температура точок на центральній осі заготовки за весь період обробки при $P=8.5$ кВт, $A=50$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв

Вивчення розподілу температур по глибині одного зі складових біметалу на відстані 2 мм від лазерного пучка показало, що при $P=2$ кВт, $A=20$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=0.25$ м/хв, прогрів поверхневого шару відбувається нерівномірно по всій довжині амплітуди сканування (Рис.2.2.11.). Прогрів поверхневого шару відбувається нерівномірно по всій довжині амплітуди сканування на ділянці довжиною менше амплітуди сканування, а саме – 15–16 мм. Для забезпечення підпалвлення поверхні металу на відстані рівному амплітуді необхідне підвищення частоти сканування і зменшення швидкості переміщення заготовки. Для збільшення довжини підпалвлення ділянки поверхні доцільно застосувати схему сканування поверхні двома лазерними пучками.

При умовах обробки $P=8.5$ кВт, $A=50$ мм, $f=200$ Гц, $V_x=1$ м/хв прогрів відбувається по всій амплітуді сканування, що обумовлено відсутністю інтенсивного відводу тепла від крайніх точок сканування в непрогріті зони основи по ширині (Рис.2.2.12.)[106].

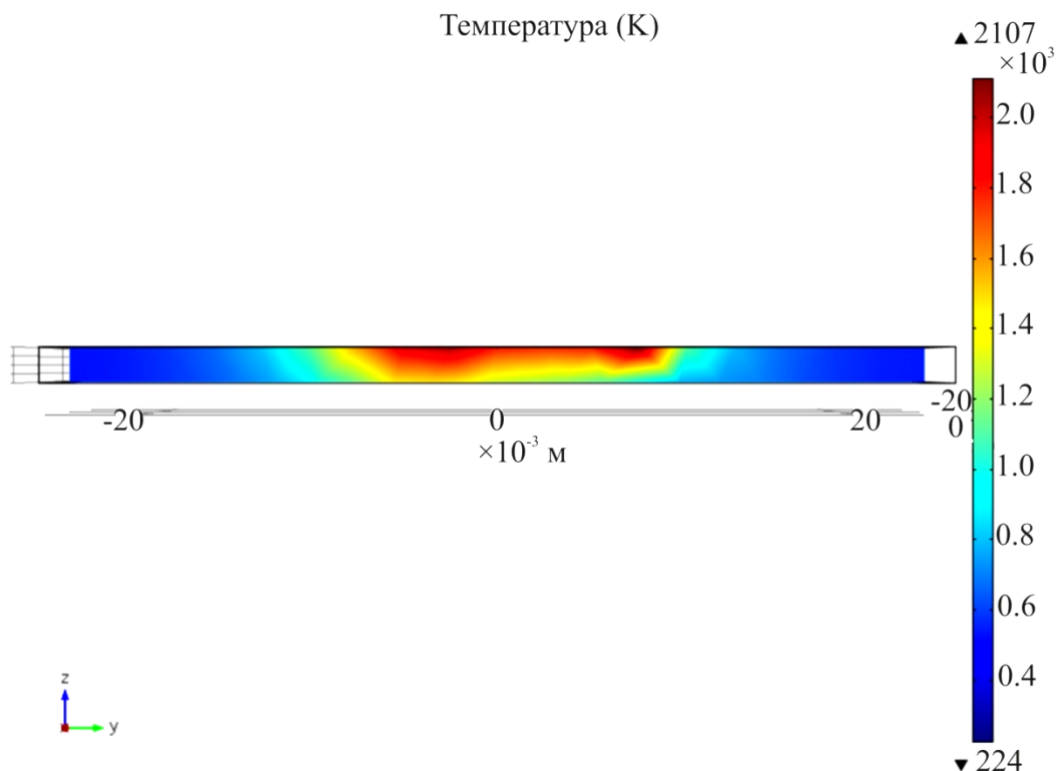


Рис.2.2.11. Розподіл температури по глибині основи на відстані 2 мм від лазерного пучка через 6 с після початку обробки при $A=20$ мм, $P=2$ кВт, $V_x=0.25$ м/хв

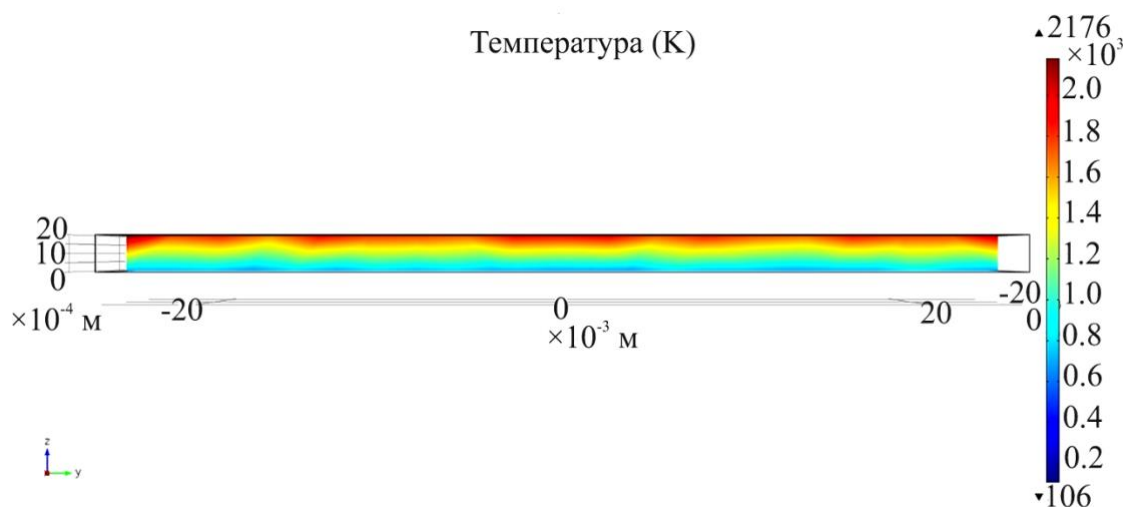


Рис.2.2.12. Розподіл температур по глибині основи на відстані 2 мм від лазерного пучка через 6 с після початку обробки при $A=50$ мм, $P=8.5$ кВт, $V_x=1$ м/хв

Вивчення параметрів зони розплаву по глибині основи в напрямку його переміщення при виготовленні біметалу показало, що стабільна зона розплаву на поверхні складає $X=1...1.5$ мм (Рис.2.2.13.).

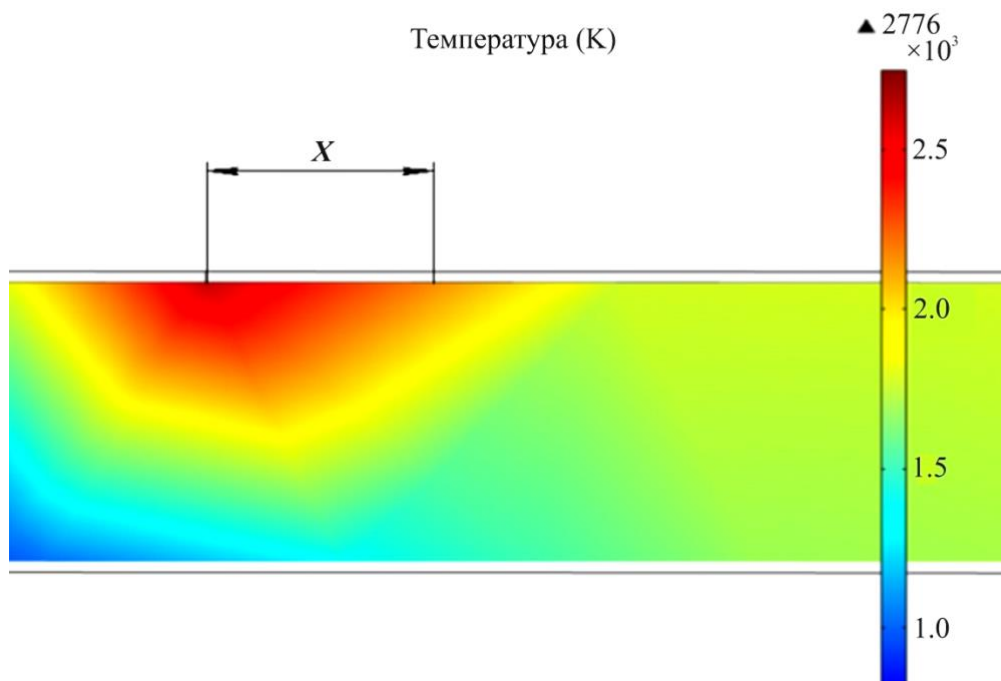


Рис.2.2.13. Розподіл температурного поля по глибині основи в напрямку його переміщення при виготовленні біметалу ($A=50$ мм, $P=8.5$ кВт, $V_x=1$ м/хв)

Для підвищення ефективності обробки було апробовано можливість застосування підігріву основи біметалу до температур 800-1000 °С. При режимах обробки $A=50$ мм, $P=8.5$ кВт, $V_x=1$ м/хв глибина зони розплаву збільшується до $X=2...2.5$ мм (Рис.2.2.14).

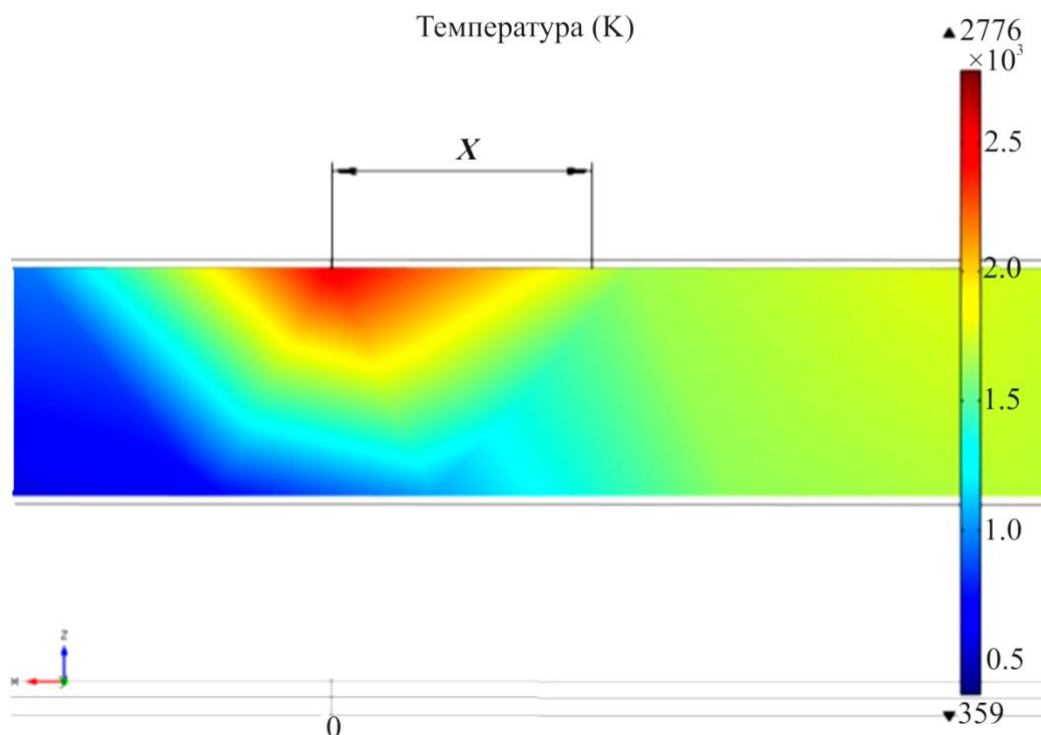


Рис.2.2.14. Розподіл температур по глибині складової біметалу в напрямку переміщення при лазерній обробці з режимами: $A=50$ мм, $P=8.5$ кВт, $V_x=1$ м/хв і її підігріві до 1000 °С

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

За допомогою чисельного моделювання процесу визначені умови лазерного підплавлення поверхневого шару основи біметалу на задану глибину (Рис. 2.2.3-14), розроблені математичні залежності та визначено параметри витікання розплаву з фурми функціональної складової. Встановлено, що наявність локальної постійної зони розплавленого металу, її геометричні розміри, закономірності формування в сукупності зі швидкістю відносного руху визначають можливість утворення між складовими біметалу металургійної зв'язку. Дана особливість зумовлює високі експлуатаційні характеристики

біметалевої продукції і зниження руйнуючих втомних навантажень при перепадах температури.

З метою підвищення ефективності процесу за рахунок зниження в ньому частки дорогої енергії лазерного випромінювання була апробована можливість застосування підігріву основи біметалу (Рис.2.2.14) до температур 800-1000 ° С з використанням індукційного нагрівання. При лазерній обробці з $A = 50$ мм, $P = 8.5$ кВт, $V_x = 1$ м / хв глибина зони розплаву збільшується до $X = 2 \dots 2.5$ мм. В цьому випадку можна зменшувати необхідну потужність лазерного випромінювання або підвищувати продуктивність обробки шляхом збільшення швидкості її переміщення. Однак такий спосіб підвищення ефективності виготовлення біметалу доцільний лише в тому випадку, коли матеріал його складової не втрачає необхідних функціональних властивостей при високих температурах.

Для обраної схеми подачі розплаву (Рис.2.2.1) функціональної складової біметалу визначені швидкості витікання рідкого металу, витрата, висота стовпа розплаву у фурмі з урахуванням компенсації втрат на гідравлічне тертя. В результаті розрахунків були отримані залежності, які дозволяють управляти товщиною функціонального шару біметалу.

Продуктивність розробленого процесу з використанням скануючого лазерного пучка обмежена теплофізичними властивостями функціонального матеріалу. Вона може бути значно підвищена шляхом одночасного паралельного використання в одному процесі декількох джерел енергії лазерного випромінювання. Іншим досить ефективним шляхом може бути розробка спеціальних оптичних систем, що дозволяють формувати високопотужні лазерні пучки з прямокутно-гаусовим розподілом інтенсивності випромінювання в поперечному перерізі типу "Top-Hat".

2.3. Дослідження витікання розплаву з форми

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 подача розплаву під дією напірного стовпа в'язкої рідини крізь формоутворюючий канал.

Розглянутий вид течії часто має місце при формуванні процесів лиття, оскільки канали зазвичай прямокутної форми. Завдання полягає у визначенні поля швидкостей і залежності витрати від перепаду тиску.[17]

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 Рис.2.3.1.

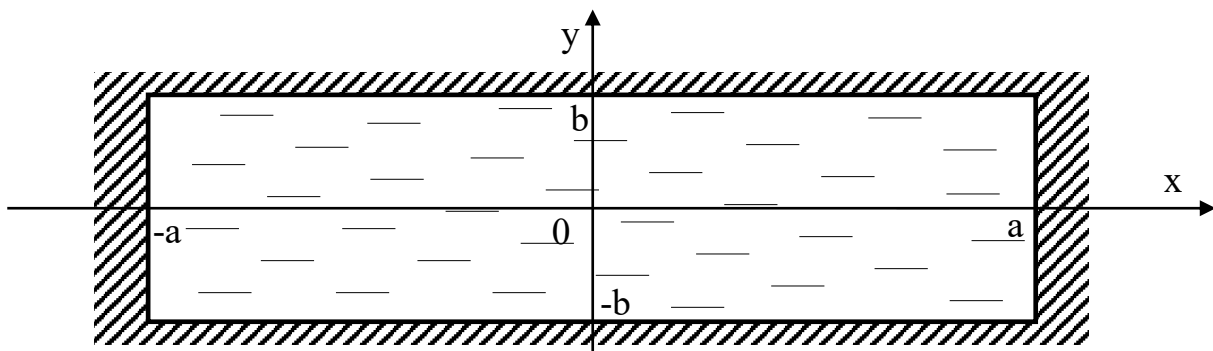


Рис. 2.3.1. Конфігурація отвору

Двовимірна течія описується рівнянням руху

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = A, \text{ де } A = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} = \text{const}. \quad (2.3.1)$$

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

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(x, y), \quad (2.3.2)$$

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

$$\varphi_i = (a^2 - x^2)(b^2 - y^2), \quad (2.3.3)$$

А найбільш наближене рішення шукаємо у формі

$$\bar{v} = c (a^2 - x^2)(b^2 - y^2), \quad (2.3.4)$$

де c -невідома постійна (індекс опущений).

З умови ортогональності «нев'язки» рівняння руху $L(c_1 \varphi_1)$ до координатної функції

$$\int_0^b \int_0^a L(c, \varphi) \varphi(x, y) x dy = 0, \quad (2.3.5)$$

У розгорнутій формі умова ортогональності «нев'язки» записується:

$$\int_0^b \int_0^a \{ 2c(b^2 - y^2) + 2c(a^2 - x^2) + A \} (a^2 - x^2)(b^2 - y^2) dx dy = 0, \quad (2.3.6)$$

Виконавши інтегрування, знаходимо невідомий коефіцієнт c

$$c = -\frac{15A}{24(a^2 + b^2)}, \quad (2.3.7)$$

У першому наближенні поле швидкостей описується виразом:

$$\bar{v} = -\frac{5A}{8(a^2 + b^2)} (a^2 - x^2)(b^2 - y^2), \quad (2.3.8)$$

Витрата рідини визначається інтегралом

$$Q = 4 \int_0^b \int_0^a \bar{v} dx dy = -\frac{10a^3 b^3}{9(a^2 + b^2)\mu} \frac{dP}{dz}, \quad (2.3.9)$$

Знайдемо середню по перетину швидкість

$$v_{cp} = \frac{Q}{4ab} = \frac{-10a^2 b^2}{36(a^2 + b^2)\mu} \frac{dP}{dz}. \quad (2.3.10)$$

Для каналу квадратного перетину ($a=b$)

$$v_{cp} = -\frac{5}{36} \frac{a^2}{\mu} \frac{dP}{dz}. \quad (2.3.11)$$

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.

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

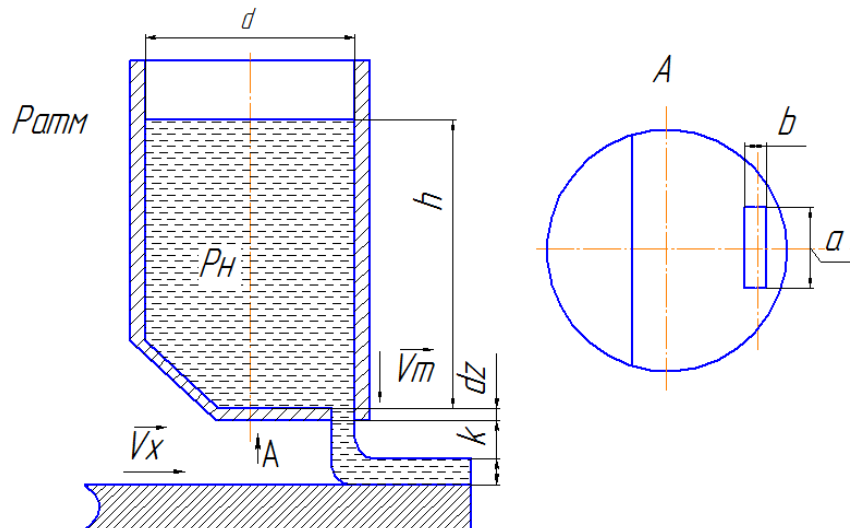


Рис. 2.3.2. Схема подачі розплаву на поверхню основи для виготовлення біметалу.

В обраній схемі заливки (Рис.2.3.2) використовується спосіб подачі рідкого металу с фурми крізь отвір прямокутного перерізу. Фурма має механізм підігріву, що дозволяє підтримувати метал для наплавки 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:

$$Q = \rho b k V_x, \quad (2.3.12)$$

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

З іншого боку:

$$Q = \rho b a V_m \quad (2.3.13)$$

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:

$$V_m = \frac{V_x \cdot k}{a} \quad (2.3.14)$$

Швидкість витікання з отвору на глибині дорівнює:

$$V_m = \sqrt{2gh} \quad (2.3.15)$$

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

$$h_v = \frac{V_x^2 k^2}{2ga^2} \quad (2.3.16)$$

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

$$V_m = \frac{Q}{4ab} = \frac{-10a^2 b^2}{36(a^2 + b^2)\mu} \frac{dP}{dz} \quad (2.3.17)$$

Виразимо з цієї формули dP :

$$dP = \frac{36(a^2 + b^2)\mu V m dz}{-10a^2 b^2} \quad (2.3.18)$$

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

$$P = \rho g h \quad (2.3.19)$$

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

$$h_L = \frac{36(a^2 + b^2)\mu v_{cp} dz}{-10a^2 b^2 \rho g} \quad (2.3.20)$$

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:

$$H = h_v + h_L \quad (2.3.21)$$

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

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. (Рис. 2.3.3) [106].

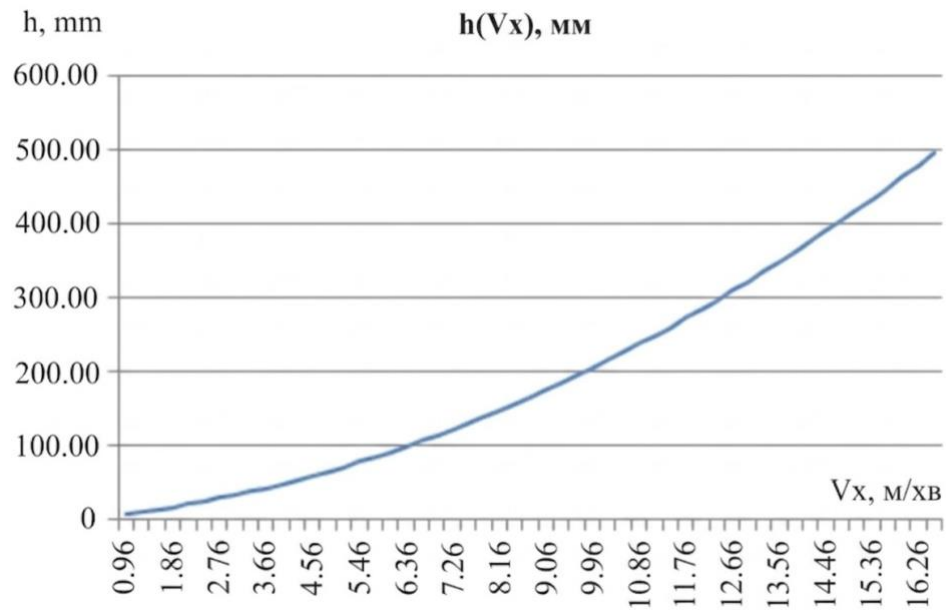


Рис. 2.3.3. Залежність висоти стовпа розплаву від швидкості переміщення основи.

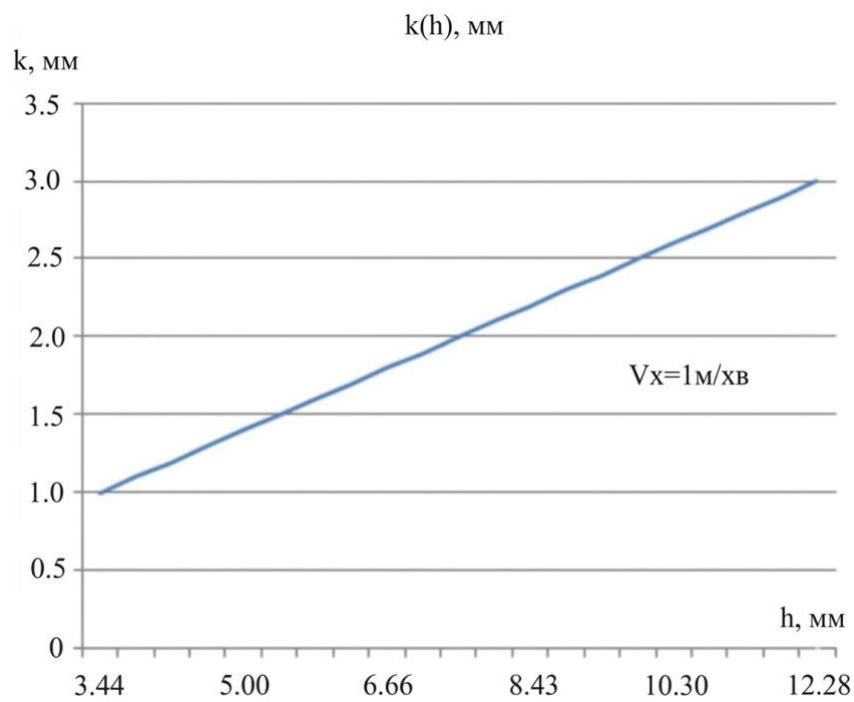


Рис. 2.3.4. Залежність товщини наплавленого шару від висоти стовпа розплаву в фурмі.

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 2.3.1

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.

2.4. Розробка комбінованого процесу виготовлення біметалевих матеріалів та його моделювання

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.

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

унеможливиює 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 плазмово-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 виготовлення 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 (рис.2). Розплавлений метал перегрівають по відношенню до температури плавлення функціональної складової біметалу.

2.4.1. Математичне моделювання процесу нанесення фактури лазером на заготовку

Оскільки постає питання попередньої обробки поверхні заготовки лазером, було вирішено провести аналіз температурних полів, що виникають в деталі при обробці її поверхні за різними схемами. Для рішення цієї задачі була обрана програма для розрахунку температурних полів. Модель для розрахунку включає в себе наступні параметри та данні: матеріал заготовки, контур по якому оброблюється, час на обробку, розміри деталі, швидкість обробки, густина потужності, розміри плями сфокусованої на поверхні заготовки, розподіл інтенсивності променя, які були використанні для розрахунку. (Рис. 2.4.1).

Моделювання температурних полів зони обробки

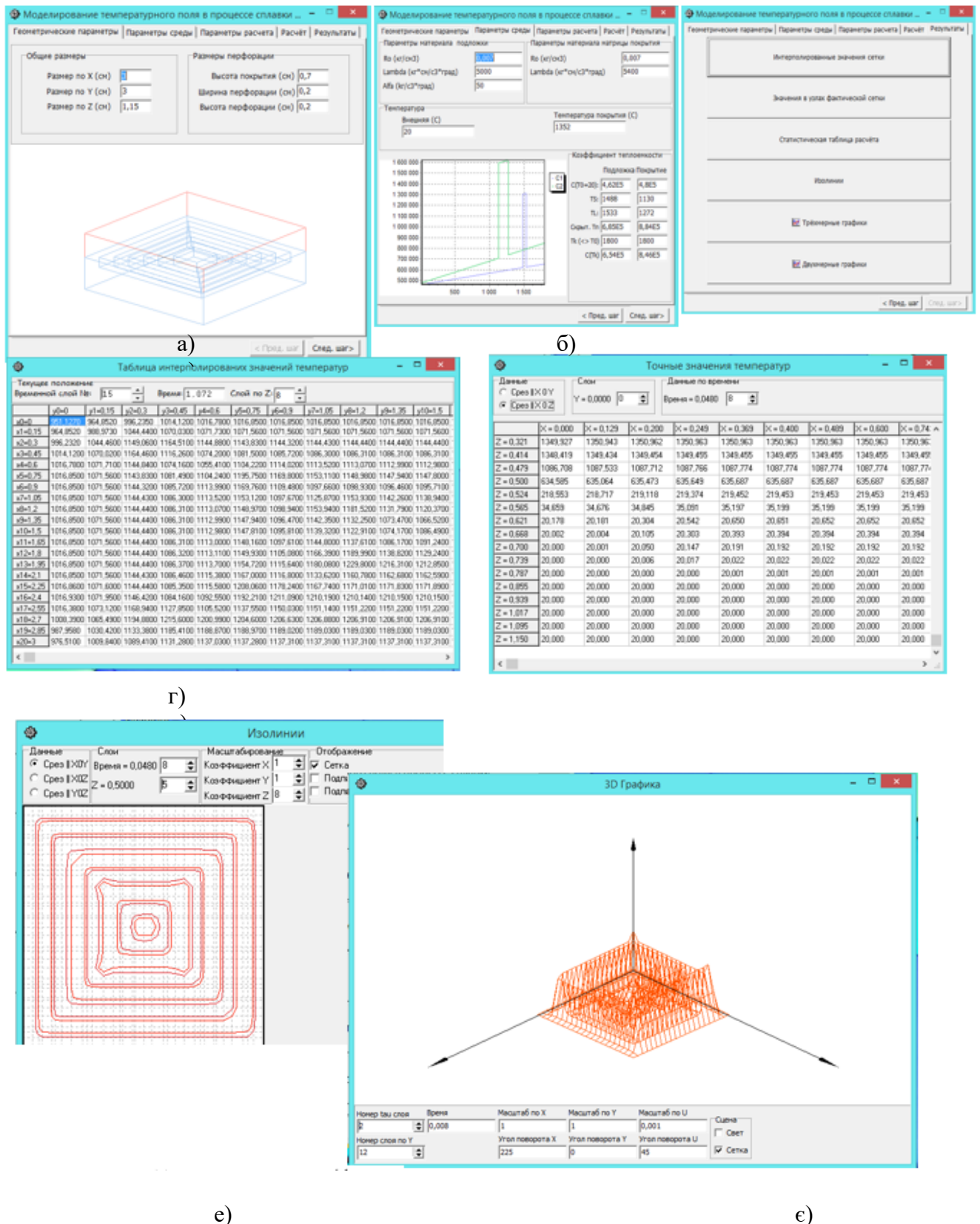


Рис. 2.4.1.1. Аналіз температурних полів, що виникають в деталі при обробці поверхні за різними схемами:

а) представлені параметри розрахунку: розміри заготовки, траєкторія обробки та розміри плями фокусування; б) приведені фізичні властивості матеріалу; в)

представлені параметри розрахунку, які включають в себе час обробки, густину потужності; г), д) результати розрахунку представлені у вигляді таблиць розподілу температур по заготовці; е) графічне зображення температурних полів в площині заготовки; є) розподіл температури, як в площині так і по глибині оброблюваної деталі.

В результаті теоретичного аналізу встановлено діапазон параметрів лазерної обробки, що забезпечує отримання заглибленої структури поверхні пластини основи біметалу. Така фактура цієї поверхні забезпечує подальше зчеплення пластин біметалу при заливанні пластини основи розплавленим металом робочого шару.

2.4.2. Математичне моделювання теплопередачі та фазових переходів при взаємодії розплаву з твердим матеріалом функціонального складу

Перед проведенням 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].

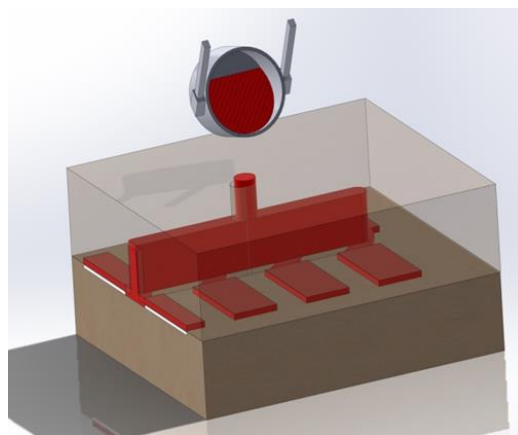


Рис.2.4.2.2. Схема заливки конструктивної складової біметалу на поверхню його функціональної заготовки

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 (рис.3). Положення цієї межі в часі обчислюється відповідно до умови балансу енергії Стефана

У таблиці 1 наведені фізичні властивості двох матеріалів, які використовуються в даному моделюванні.

Для розрахунку положення міжфазної границі використовуємо 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. Для опису залежності густини рідини від температури доцільно скористатись лінійним наближенням Буссінеска (2.4.2.1):

$$r(T) = r_0 (1 - \alpha \Delta T), \quad (2.4.2.1)$$

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 [108,110].

Таблиця 2.4.2.1

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

Cp_ Cs	460.6[J/(kg*K)]	Питома теплоємність Ст.3
Cp_ Ns	502[J/(kg*K)]	Питома теплоємність нікелевого сплаву
alpha_ Cs	7.2e-6[1/K]	Коефіцієнт теплового розширення Ст.3
alpha_ Ns	12e-6[1/K]	Теплопровідність нікелевого сплаву
nu_ Cs	8e-7[m^2/s]	Кінематична в'язкість Ст.3
nu_ Ns	9e-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

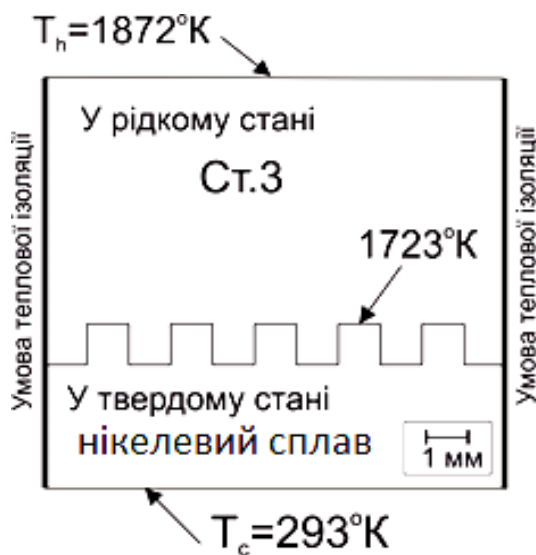
Швидкість границі розділу фаз можна визначити, як відношення густини теплового потоку на границі до питомої теплоти фазового переходу, що виходить із умови сумісності чи умови Стефана (2.4.2.2):

$$v_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_{im}}{\Delta H_{1 \rightarrow 2}}, \quad (2.4.2.2)$$

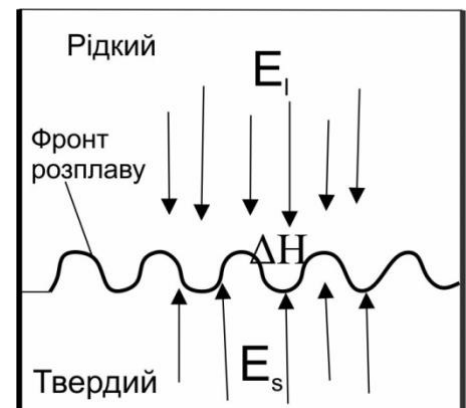
де $v_{1 \rightarrow 2}$ - швидкість границі розділу фаз (м/с), q_{im} - густина теплового потоку Вт/м², $\Delta H_{1 \rightarrow 2}$ - прихована теплота плавлення нікелевого сплаву, яка в даному випадку становить 305 кДж/кг.

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 двовірній області. Ця область, що наведена на рис.3а, представляє собою квадрат з довжиною сторони 10мм, заповнений відповідно двома матеріалами.



а



б

Рис. 2.4.2.3. 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 $T_h=1872^\circ\text{K}$ та $T_c=293^\circ\text{K}$ 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,

$$T_h - X_g / 0.1[\text{m}] * (T_h - T_c), \quad (2.4.2.3)$$

Початкова форма фронту плавлення - це криволінійна лінія, яка повторює геометрію виступів і розташована на відстані 4 мм від нижньої границі, де температура 1740°K . Частина матеріалу у рідкій фазі описується рівнянням Нав'є-Стокса в наближенні Буссінеска (1), описані в модулях *Gravity* і *The Boussinesq Approximation sections* [15]. $T_{\text{ref}} = T_f$, T_{ref} - температура на границі двох середовищ, 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:

$$\rho_0 \Delta H v \cdot n = (E_l - E_s) \cdot n, \quad (2.4.2.4)$$

де n - вектор нормалі до фронту, E_l і E_s - теплові потоки, які надходять з рідкої та твердої фаз (Вт/м^2) (рис.3б).

Вираз $(E_l - E_s) \cdot n$, залучений в рівнянні 2.4.2.4, 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 (рис.4).

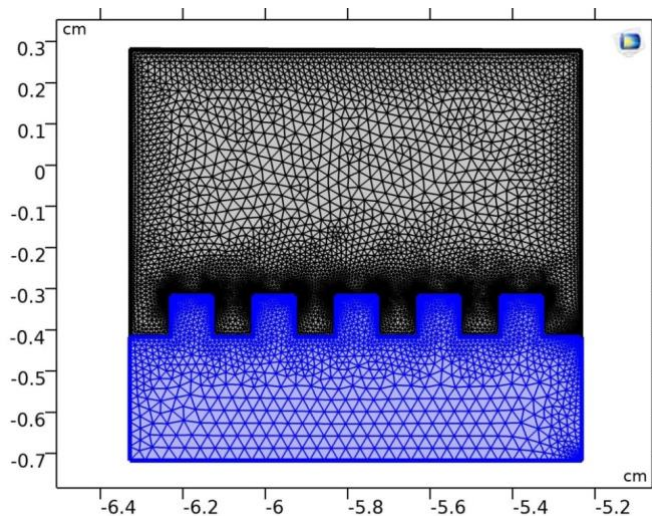


Рис. 2.4.2.4. Адаптивна сітка на межі фазових перетворень

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 Рис.2.4.2.5 і Рис.2.4.2.6 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.

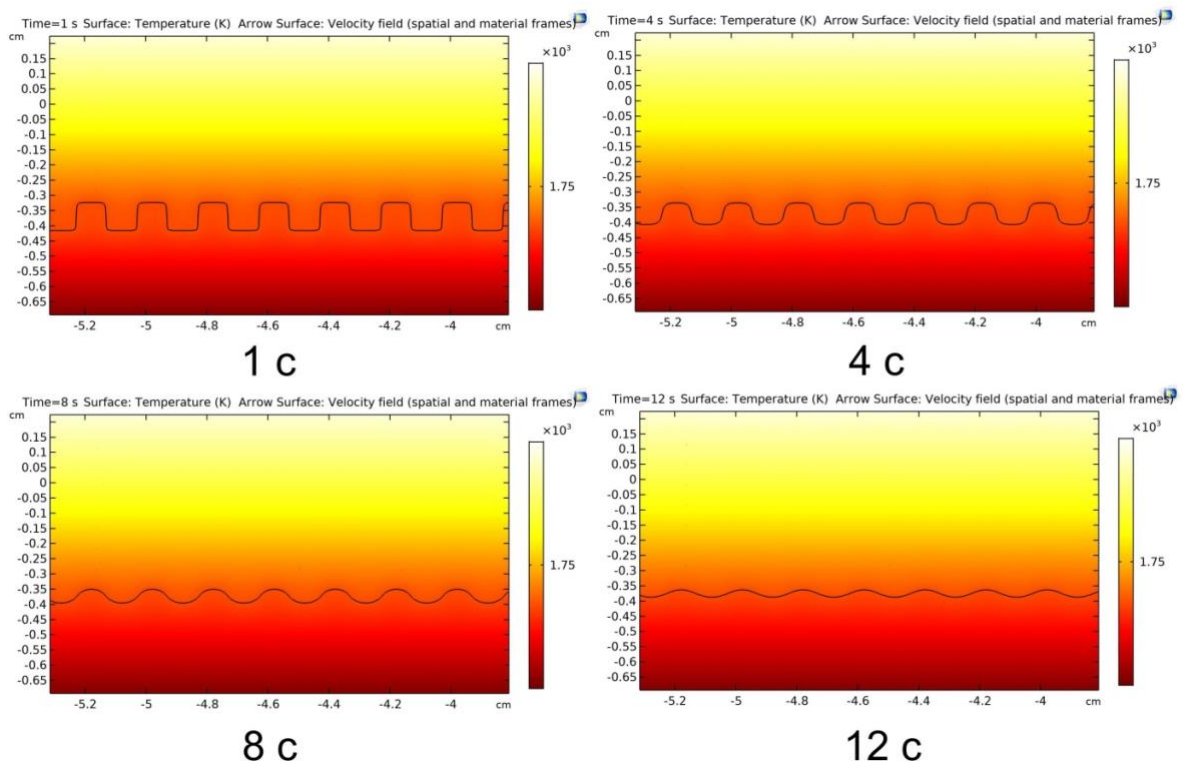


Рис. 2.4.2.5. Зміна температурного поля і межі фаз середовищ в різні проміжки часу

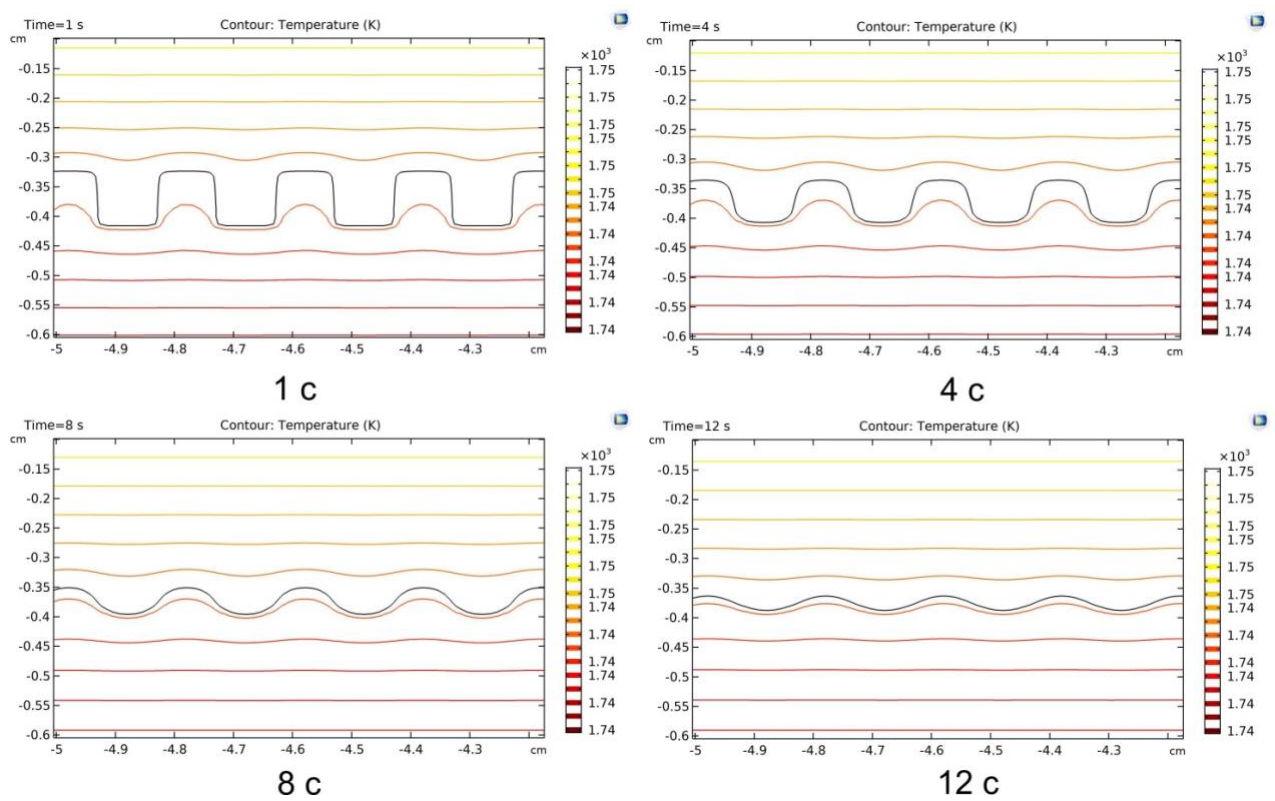


Рис. 2.4.2.6. Температурні контури теплових потоків та межа фаз в області розрахунку в різні моменти часу

На Рис.2.4.2.7 показано розподіл швидкості поля температури в рідкій області в різні моменти часу, а відповідний профіль температури для нього представлено на Рис.2.4.2.5, Рис.2.4.2.6. 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.

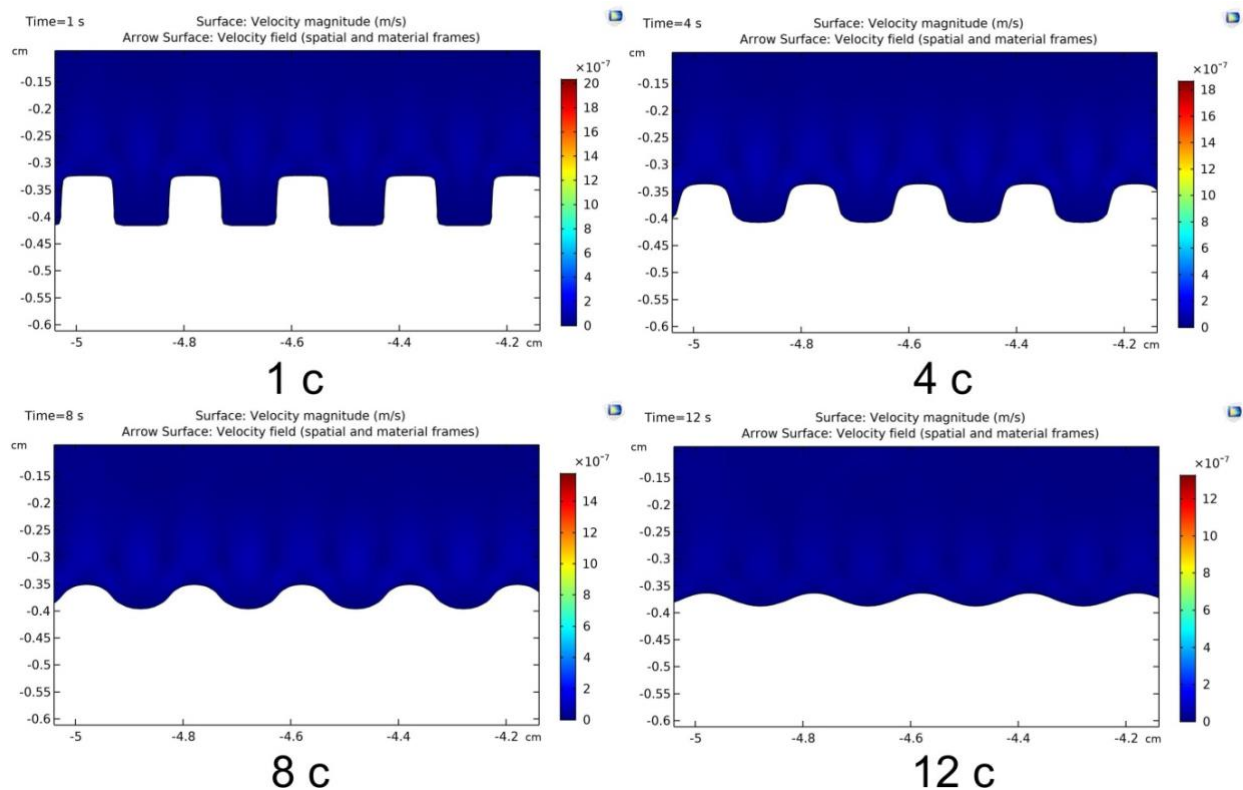


Рис. 2.4.2.7. Вигляд швидкості теплового потоку біля границі розподілу фаз в області визначення

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 Рис.2.4.2.7. 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[108-110].

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 виливка біметалу нікелевий сплав - сталь Ст.3.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Продуктивність розглянутого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів визначається параметрами сканування і потужністю лазерного променя, витратними характеристиками розплаву одного зі складових, швидкістю їх відносного переміщення.

2. Управління процесом доцільно здійснювати комплексною зміною параметрів сканування, потужності лазерного випромінювання та висоти напірного стовпа розплаву. Для отримання смуги біметалу шириною 50 мм, функціональний шар якої товщиною 2 мм виконаний з нержавіючої сталі мартенситного класу 40X13, а основний зі сталі Ст.3, товщиною 4 мм, потужність випромінювання становить $P = 8.5$ кВт, амплітуда сканування $A = 50$ мм, частота $f = 200$ Гц, швидкість переміщення основи $V_x = 1$ м / хв, висоті стовпа розплаву $h = 7.6$ мм.

3. Для підвищення продуктивності виготовлення біметалевих листів доцільно застосувати обробку з двома і більше одночасно скануючими пучками або пучком, сфокусованим в відрізок лінії з розподілом інтенсивності випромінювання типу "Top Hat".

4. 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.

5. Результати математичного моделювання та відповідні розрахункові дані дозволяють реалізувати новий процес виготовлення біметалевих композицій, розробити відповідні технологічні процеси і обладнання.

РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Матеріали для проведення лазерно-ливарного процесу

Для проведення експериментальних досліджень як матеріали біметалу було обрано конструкційну вуглецеву сталь Ст.3 та жаростійкий нікелевий сплав ХН60ВТ, легований молибденом. Вибір зазначених матеріалів зумовлений сукупністю технологічних, експлуатаційних та наукових чинників.

Сталь Ст.3 є одним із найбільш поширених конструкційних матеріалів у промисловості, що обумовлено її доступністю, доброю технологічністю, задовільними механічними властивостями та широким застосуванням у машинобудуванні, енергетиці та будівельних конструкціях. Використання сталі Ст.3 як основного (несучого) шару біметалу дозволяє оцінити ефективність запропонованої технології для типових промислових умов.

Жаростійкий сплав ХН60ВТ, легований молибденом, обрано як функціональний (робочий) шар біметалу з огляду на його високі показники жаростійкості, зносостійкості та корозійної стійкості за підвищених температур. Такі властивості роблять сплав перспективним для використання в умовах інтенсивних термомеханічних навантажень та агресивних середовищ.

Крім того, поєднання сталі Ст.3 та сплаву ХН60ВТ є технологічно складним з точки зору формування якісного металургійного з'єднання, а наявна науково-технічна інформація щодо виготовлення біметалів із зазначеної пари матеріалів є обмеженою. Це підкреслює наукову новизну дослідження та доцільність проведення експериментів, спрямованих на вивчення процесів формування перехідного шару та властивостей отриманого біметалу.

Хімічний склад сплавів представлений в таблиці 3.1.1 та механічні властивості в табл.3.1.2

Таблиця 3.1.1

Хімічний склад зразків

Матеріал	Хімічний склад [%]
----------	--------------------

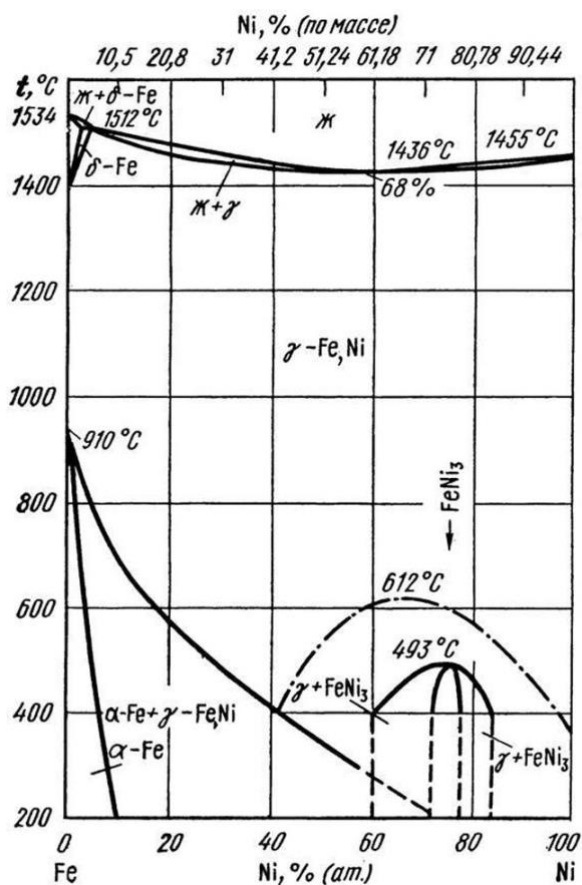
	C	S i	M n	C r	N i	M o	W	Ti	A l	F e
Ст.3	0 , 2 2	0 , 3 3	0 , 6 5	0 , 3 5	0 , 1	-	-	-	-	9 7
ХН60 ВТ+ Мо	-	0 , 3 4	0 , 1	2 3 , 5	5 3 , 7	1 , 2 3	1 3 , 7	0.3 5	0 , 4 9	3 , 1

Таблиця 3.1.2

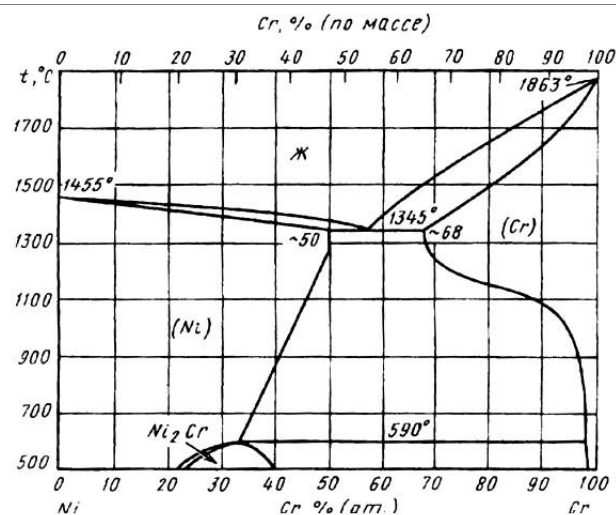
Механічні властивості зразків

Матеріал	Механічні властивості					
	σ_B [МПа]	σ_T [МПа]	δ [%]	E [ГПа]	μ	ρ [кг/м ³]
Ст.3	380-490		25			
ХН60ВТ+Мо	750		40			8800
σ_B - границя міцності, σ_T - границя плинності, δ - відносне видовження, E - модуль пружності (Юнга), μ - коефіцієнт Пуассона, ρ - густина матеріалу						

Жароміцний хромонікелевий сплав ХН60ВТ (ЕІ868) з 13-15% вольфраму відноситься до гомогенним сплавів на основі γ -твердого розчину, володіє хорошими технологічними властивостями і досить високу окаліностойкістю [97]. Температура інтенсивного окалинообразования на повітрі - 1100 ° С [98]. Він добре штампується і, що дуже важливо, добре зварюється. Введення вольфраму в ніхромову сплав з 24% хрому підвищує його механічні властивості при високих температурах. Сплав ХН60ВТ застосовують для виробів, що працюють при температурах до 1000 ° С і невеликих навантаженнях, але більш високих, ніж для виробів зі сплавів ХН78Т (ЕІ435) і ХН75МБТЮ (ЕІ602)



а



б

Рис.3.1.1 Дослідний матеріал: а) діаграма стану Ni-Fe; б) діаграма стану Ni-Cr [97]

З боку подвійної системи залізо - нікель спостерігається широка область γ -твердих розчинів; з боку залізо - хром - область твердих розчинів α з о. ц. к. кристалічною решіткою. При температурах нижче 950-960 ° С виявлено присутність σ -фази.

Період решітки α -твердого розчину в залежності від складу змінюється в межах 0,2862-0,288 нм; γ -фази - в межах 0,3576-0,3585 нм; σ -фази від $a = 0,863$ нм; $z = 0,4559$ нм при $c / a = 0,528$ до $a = 0,8768$ нм; $z = 0,4530$ нм при $c / a = 0,517$. Структура σ -фази відображати в структурі типу β -U.

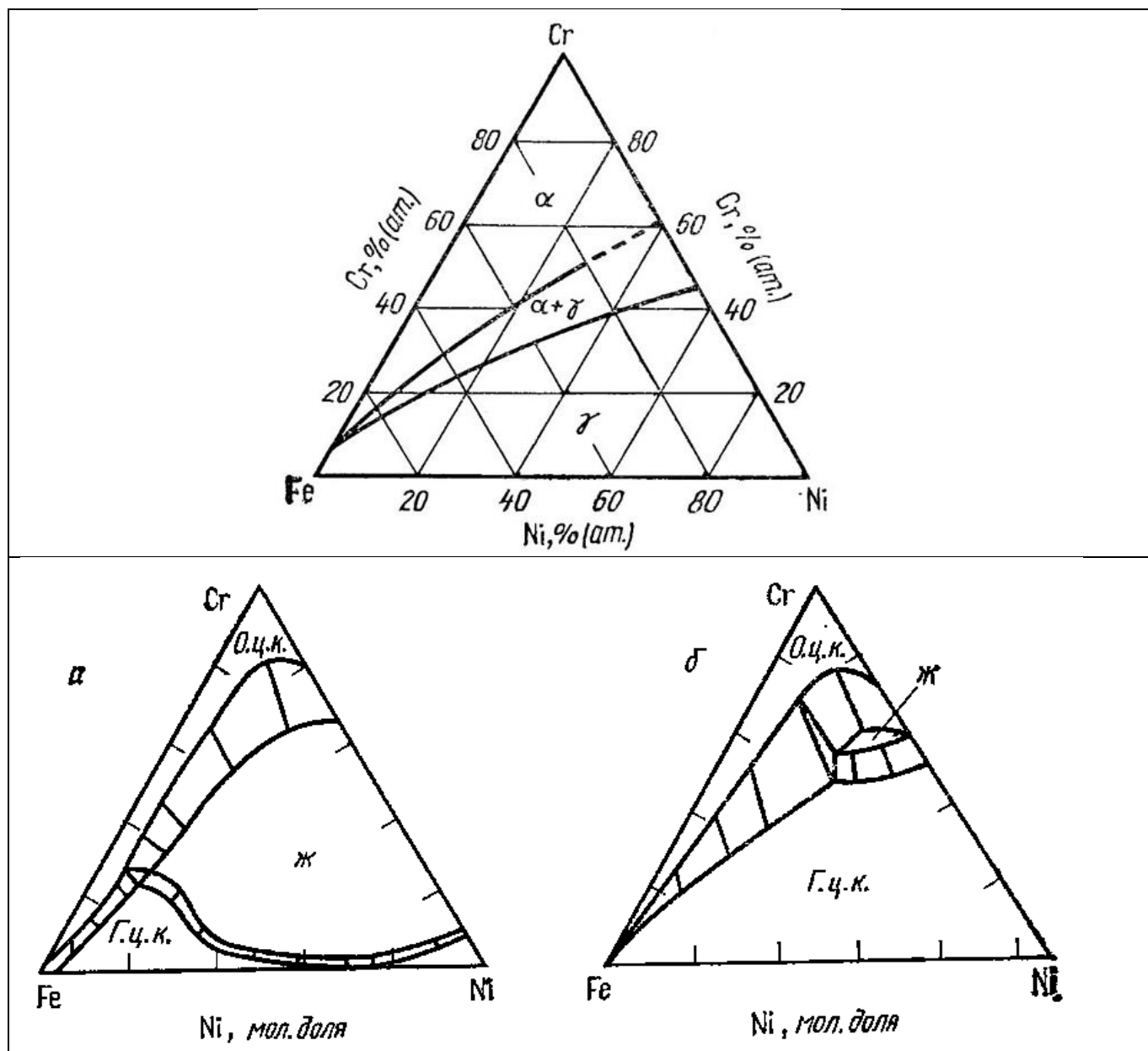


Рис.3.1.2. Изотермичний розріз системи залізо-нікель-хром при температурі 1300K [97]

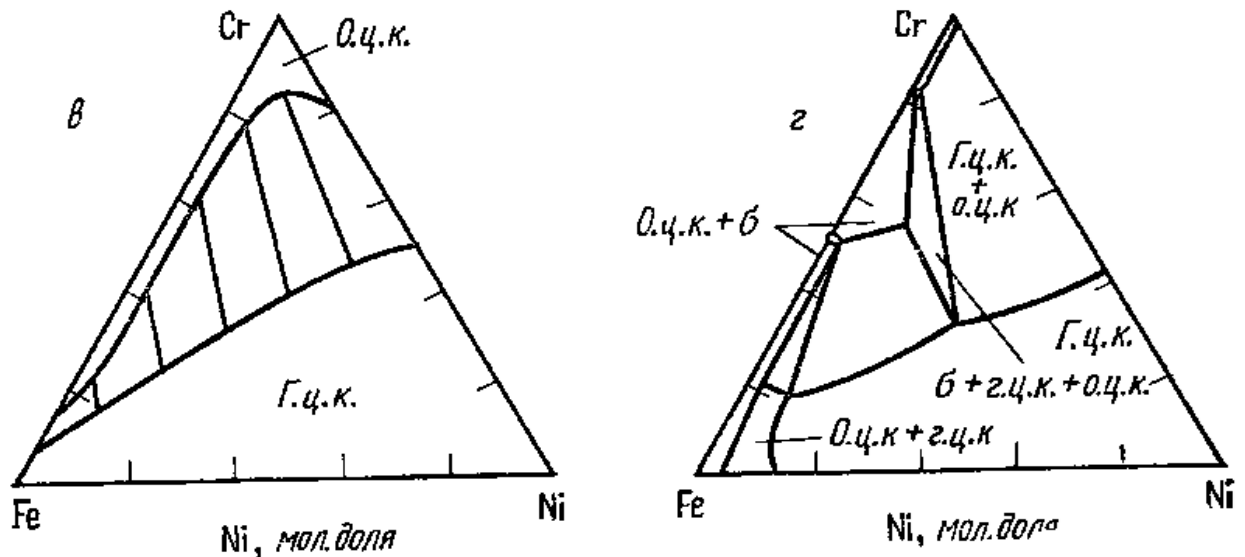


Рис.3.1.3 Ізотермічні розрізи системи залізо-нікель-хром при температурах 1700, 1600 1373К, 923К [97]

На Рис.3.1.2 наведені ізотермічні розрізи системи при температурах 1700; 1600; 1373 і 923 К, побудовані на підставі термодинамічних розрахунків в наближенні регулярних розчинів.[97-100]

3.2 Експериментальне обладнання

3.2.1 Технологічний лазерний комплекс для формування регулярного макрорельєфу

Для нанесення фактури на поверхню складової функціонального матеріалу використали технологічний лазерний комплекс, який розроблений і виготовляється компанією «Aramis» LTC75 (Рис.3.2.1.1), з характеристиками наведеними в табл.3.2.1 [101].



Рис. 3.2.1.1. Загальний вигляд лазерного комплексу Aramis LTC75*Таблиця 3.2.1*

Модель	LTC75-500
Тип лазера	Твердотільний: волоконо леговане ітербієм
Передача променя	через оптоволокну
Середня потужність випромінювання, Вт	500
Режими випромінювання / різь	імпульсний, безперервний
Довжина хвилі лазерного випромінювання, нм	1070
Координатний стіл: тип приводу	Лінійний привід
Кінематична схема	Портальна, лист нерухомий
Прискорення, що розвиваються	до 1,5 G
Базовий розмір поля обробки, мм	3000×1500
Хід координати Z, мм	150
Точність позиціонування по координаті X, мм	±0.01
Точність позиціонування по координаті Y, мм	±0.01
Дискретність завдання положення, мкм	1
Максимальна швидкість переміщень X, Y, м/хв	80
Діапазон швидкостей різь, м/хв	от 0,4 до 9
Максимальна товщина листового металу, мм	6
Система підтримки фокусу	безконтактна
Напруга живлення	~380±18%; 50Гц; 3- фазы
Потужність споживання, не більше, кВт	9
Габаритні розміри комплексу, мм	6,4 x 4,5 ≈ 29 м2
Маса комплексу, кг	2950

Координатний стіл портального типу з числовим програмним керуванням (ЧПК) та програмним забезпеченням «Metallix-2013 IT-A», дозволяє працювати з усіма стандартними конструкторських графічних файлів і відповідає всім вимогам верстатів з ЧПК в розмірній обробці металу та гравіюванні. При роботі

комплексу лист, що обробляється, залишається нерухомим. Комплекс обладнаний висувним столом, що забезпечує вільний доступ до робочого поля для зручності завантаження листа.

В основі техпроцесу нанесення фактури лежить класична технологія газо-лазерного різання металу, яка формує і реалізує одночасно два фізичних процесу: нагрів до плавлення металу (підкладки) лазерним променем з високою концентрацією енергії та видув продуктів плавлення і різі із зони розкрою потоком технологічного газу під високим тиском. В якості такого газу використовувався – азот.

В результаті теоретичного аналізу та попередніх експериментальних досліджень встановлено діапазон технологічних параметрів та даних: матеріал заготовки, контур по якому оброблюється, час на обробку, розміри деталі, швидкість обробки, густина потужності, розміри плями сфокусованої на поверхні заготовки, розподіл інтенсивності променя (Табл.3.2.1.1).

Таблиця 3.2.1.1

Параметри та дані процесу лазерної обробки для вибраних матеріалів

№	P [Вт]	S[м/хв]	p	d	A
1	400-500	1-2м/хв	2-3атм	0.4-0.5мм	0,85
<i>P</i> - потужність лазера, <i>S</i> - швидкість переміщення лазерної головки, <i>p</i> - тиск, <i>d</i> – діаметр пучка, <i>A</i> – коефіцієнт поглинання					

На їх поверхні випромінюванням волоконного лазера в режимі випаровування у сукупності з механічною обробкою виготовлявся регулярний макрорельєф у вигляді виступів квадратної форми з поперечними розмірами 1х1 мм. Висота виступів на всіх зразках становила $h = 0,5; 1,0; 1,5$ мм, крок між виступами по двом координатам становив 1,0; 1,5 і 2,0 мм (Рис. 3.2.1.2.).

Це забезпечує отримання заглибленої структури поверхні пластини функціональної складової біметалу для наступної операції комбінованої лазерно-ливарної технології.

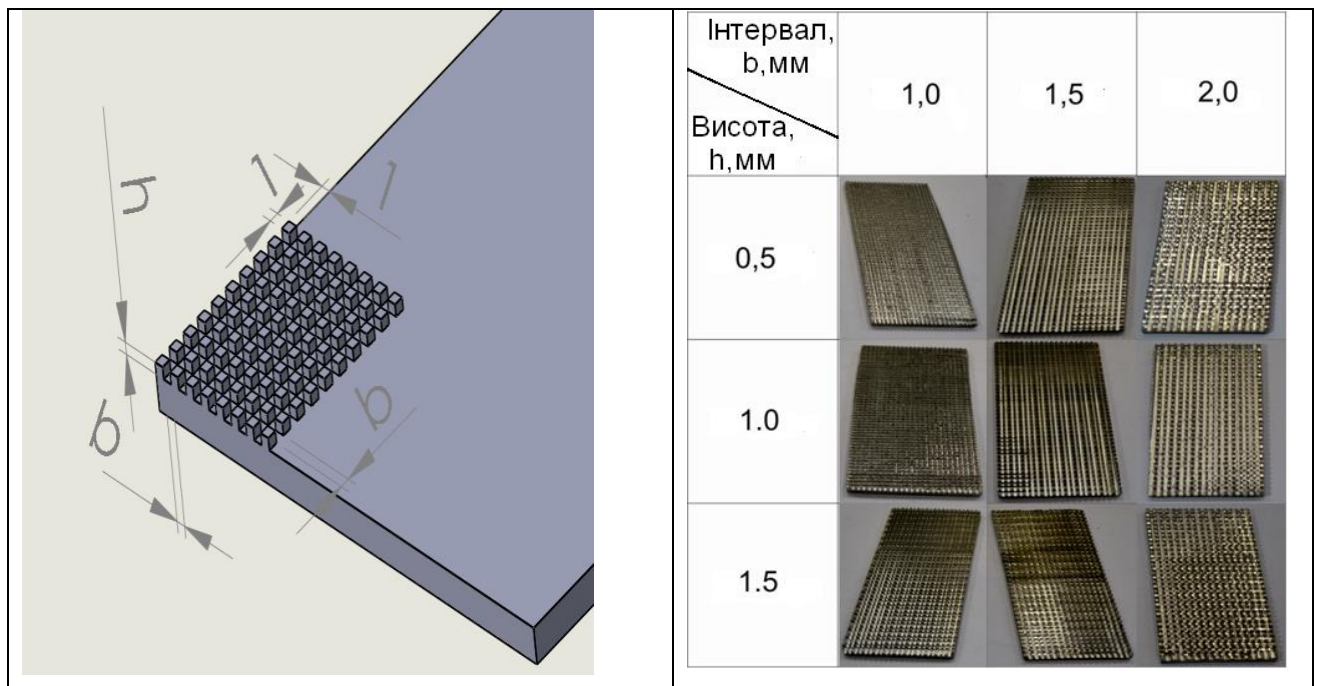


Рис. 3.2.1.2. Зразки функціонального матеріалу з нанесеним макрорельєфом

Така фактура цієї поверхні забезпечує подальше зчеплення пластин біметалу при заливанні пластини основи розплавленим металом робочого шару.

3.2.2 Ливарна установка для нанесення конструктивної складової

Заливання конструктивною складовою біметалів на підготовлені поверхні функціональної складової здійснювали з використанням індукційної тигельної електропечі марки ІЧТ-006, ємністю 60кг з кислою футеровкою (Рис.3.2.1) і була виготовлена піщана форма (рис.3.2.2), яка розбирається, з камерами в нижній частині, де були заформовані пластини із функціонального матеріалу (нікелевого сплаву) з попередньо підготовленою макроструктурою на поверхні.

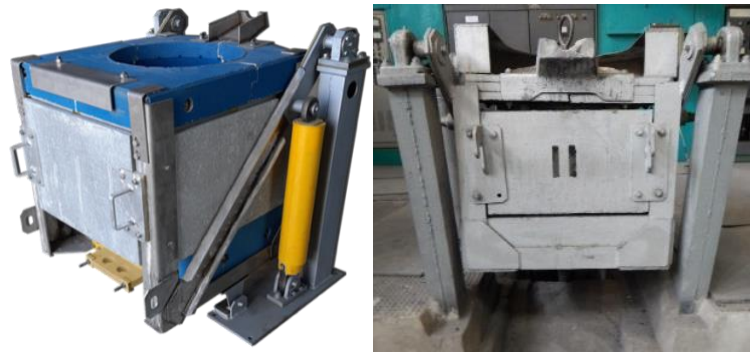


Рис. 3.2.2.1. Індукційна тигельна електропіч марки ІЧТ-006

Ливарна форма виготовлялась із піщано-глінястої суміші. Склад суміші наведено у табл. 3.2.1

Таблиця 3.2.2.1

Склад формувальної суміші

Компоненти	Вміст компонента, %
Пісок марки 1К ₁ О ₂ 016	97,0...100,0
Глина формувальна	1,0...3,0
Вологість	2,4...3,0

Форму виготовляли у двох опоках по нероз'ємним моделям. Спочатку формували нижню напівформу, для цього на дерев'яну плиту встановлювали моделі вихідного злитка, живильника та нижню опоку, потім насипали формувальну суміш і ущільнювали спец інструментом. Далі нижню напівформу кантували на 180°, встановлювали верхню опоку і модель ливникової системи. Насипали на верхню опоку формувальну суміш і ущільнювали. Після цього піднімали верхню напівформу, кантували її на 180° і витягували моделі виливка та ливникової ситеми з форми. Після виготовлення форми просушували у сушильній печі при температурі 100..1005°C на протязі 4 годин (рис.)



Рис. 3.2.2.2. Сушильна піч

Перед збиранням ливарної форми у виготовленні камери для злитків встановлювали та закріплювали підготовлені пластини із функціонального матеріалу з нанесеною факторую зі сторони контакту із рідким компонентом(Рис.3.2.2а)



Рис. 3.2.2.3. Загальний вигляд ливарної форми: а - нижня напівформа(опока), ливарно форма в зібраному вигляді

В якості основних шихтових матеріалів для індукційного плавлення використовували: зворот власного виробництва у кількості 65% та сталевий брукх у кількості 35%. Марка сталі для шихтових матеріалів близька до марки сталі Ст3.

Технологічний процес плавлення в індукційній печі включав наступні операції: завантаження шихтових матеріалів, нагрівання і перегрів металу та доведення його за хімічним складом.

Вихідний розплав схильний до кристалізації за діаграмою Fe - C з печі випускали у ручний мірний ківш ємністю 5...7 кг (Рис.3.2.4), який був попередньо підігрітий до температури 450...500 °С , та заливали до ливарної форми крізь ливникову систему 1 (Рис.3.2.3)

Температуру конструктивної складової перед заливанням форм контролювали вольфрам-ренієвою термопарою, яка була занурена у захисному кварцовому наконечнику з реєстраційним цифровим мультиметром марки DT-848 DIGITAL MULTIMETR (рис.3.2.5).

Температура розплаву у печі складала 1550...1600 °С. Тривалість плавлення становила близько 1,0...1,5 години. Після заливки зразки разом з формою охолоджувались на протязі 4 годин.

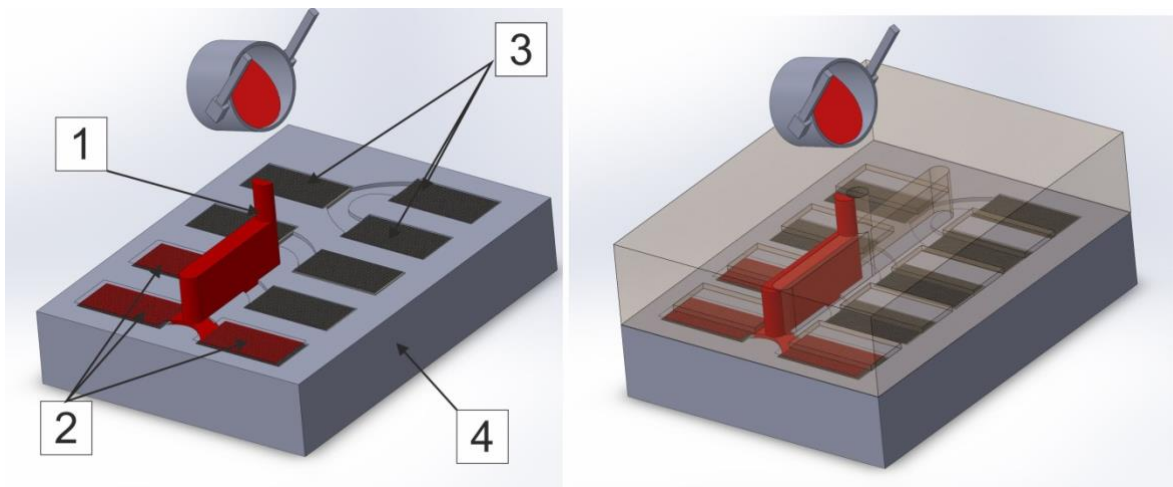


Рис. 3.2.2.4. Схема підведення рідкого металу: 1 ливникова система, 2 -рідкий компонент конструктивної складової, 3 - пластини функціонального матеріалу, 4 нижня напівформа(опока)

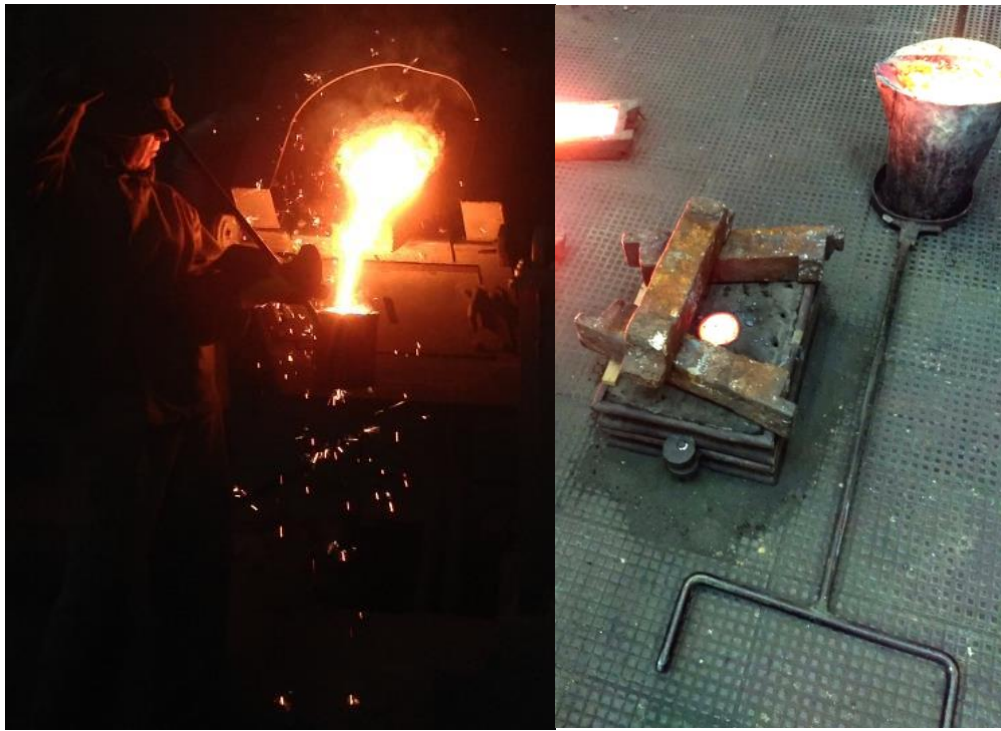


Рис. 3.2.2.5. Випуск із печі вихідного розплаву сталі Ст.3

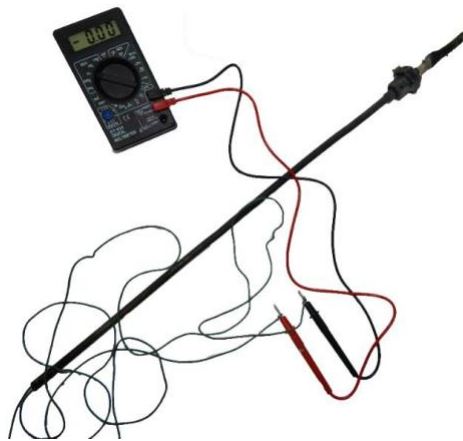


Рис. 3.2.2.6. Цифровий мультиметр марки DT-848 з вольфрам-ренієвою термопарою

На виході отримували виливки з розмірами 50*100*10мм, в яких близько 4 мм була товщина функціонального матеріалу і 6 мм конструктивної. Далі отримані виливки піддавались наступним дослідженням.

3.2.3 Пристрій для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів

Дослідження фізико-механічних властивостей зразків біметалів проводилось на приладі «Micron-Gamma». Відмінною особливістю приладу є застосування диференціального датчика малих переміщень, принцип роботи

якого полягає у вимірюванні глибини впровадження індентора відносно поверхні досліджуваного зразка, а не станини приладу[102-103].

Основні технічні характеристики "Мікрон-гамма":

Діапазон навантажень, які можна задати, сН.....	0,01 - 400
Вимірювана глибина впровадження, мкм.....	0,01 - 200
Швидкість навантаження, сН/сек.....	0.01 - 200
Час витримки під навантаженням, хв.....	0 - 10
Діапазон сканування, мм.....	25x25
Швидкість сканування, мкм/сек.....	20 і 60
Роздільна здатність відео камери, МР.....	2,0
Збільшення мікроскопа	x10-500

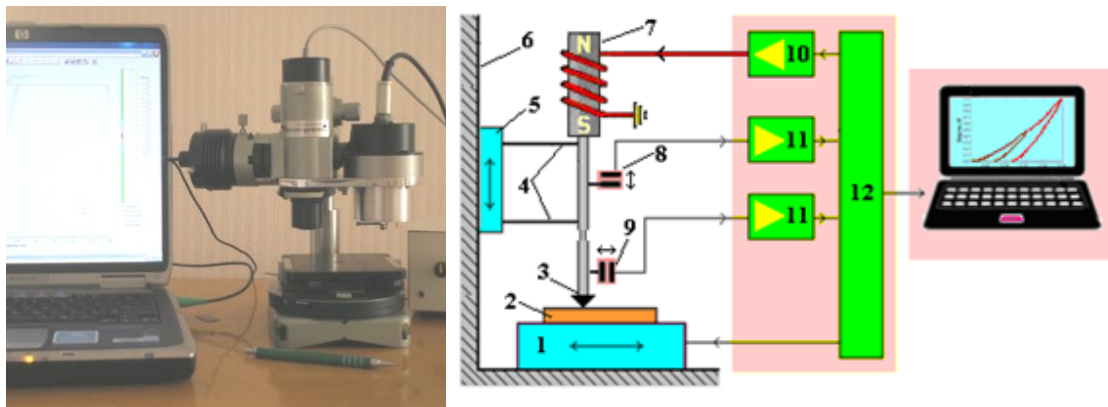
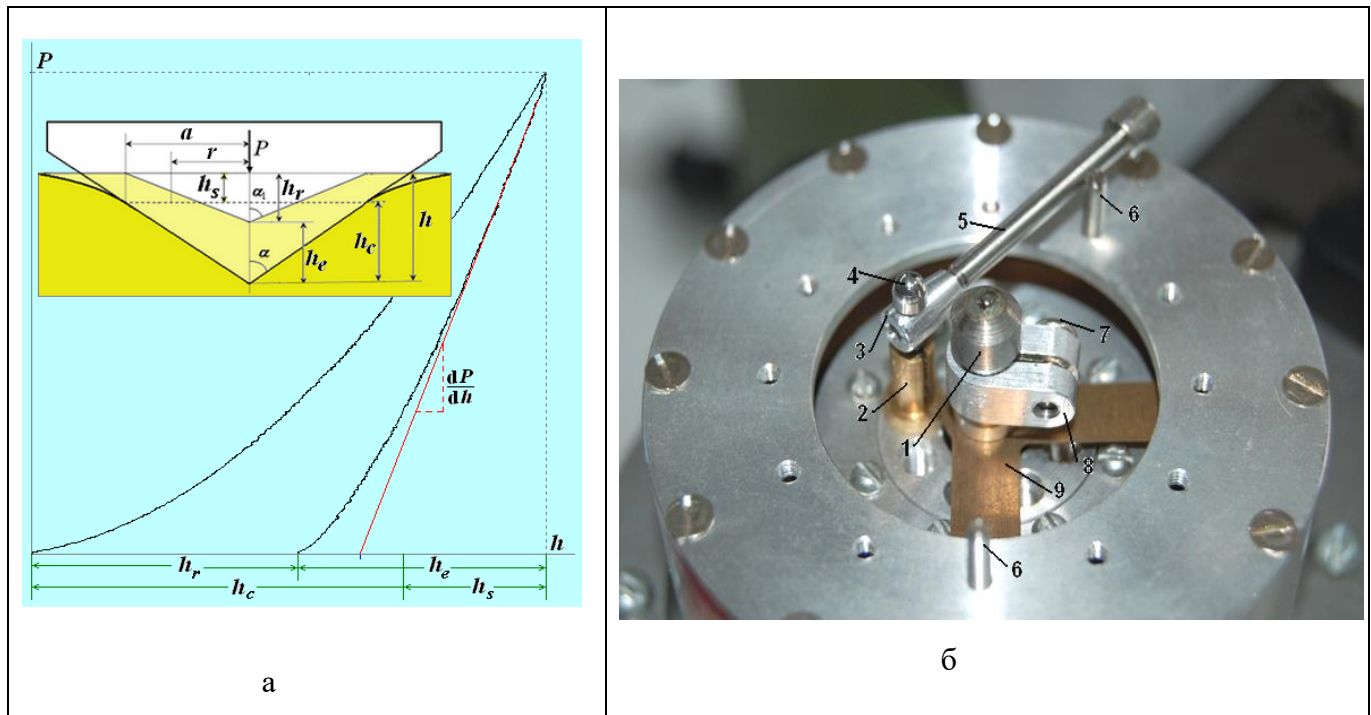


Рис. 3.2.3.1. Зовнішній вигляд приладу і блок-схема «Мікрон-гамма».

Аналіз і обробка діаграм ідентифікування для визначення мікротвердості і контактного модуля пружності по кінетиці впровадження індентору виконувався автоматично з використанням програмного забезпечення приладу, що базується на методі Олівера і Фара, який прийнятий у якості міжнародного стандарту.



В

Рис. 3.2.3.2. Схематичне уявлення відбитка(а): h - максимальна глибина впровадження; h_r - глибина відновленого відбитка; h_c - контактна глибина; h_s - зміщення контактної поверхні при вдавлюванні; h_e - пружне відновлення відбитка; $2a$ - розмір відбитка після зняття навантаження; α ; α_1 - кути між віссю і гранню при навантаженні і після зняття навантаження, відповідно; вигляд навантажувача знизу(б): 1 - індентор; 2 - патрон щупа; 3 - муфта; 4 - щуп; 5 - рукоятка; 6 - обмежувачі; 7 - гвинт індентора; 8 - хомут індентора; 9 - пружина індентора; діаграма впровадження індентора (в) (демонстрація чутливості і повторюваності)

"Мікрон-гамма" складається з моторизованого предметного столу 1, на якому встановлюється зразок 2. індентором 3 зі штоком прикріплений за допомогою двох м'яких плоских пружин 4 до направляючої 5, яка може

переміщатися по вертикалі щодо корпусу 6. навантажувати індентор безконтактним електромагнітним навантажувачем 7, який підключений до ЦАП 10. Нормальні (і тангенціальні - опціонально) переміщення індентора вимірюються, відповідно, датчиками 8 і 9, які підключені до АЦП 11. Реєстрація та управління здійснюється мікроконтролером 12 підключеному до ЕОМ [102-103].

3.3. Методи дослідження структури отриманих біметалів

3.3.1. Оптична металографія

Металографічні шліфи із зразків біметалів, які пройшли попередні механічні випробування і нерозшарувались, готували за загальною методикою металографічного аналізу. Отримані виливки розміром $50 \times 100 \times 10$ розрізали на електроерозійному верстаті дротяним електродом в напрямку заливання конструктивною складовою на дві рівні частини (Рис.3.3.1). Одна половина була контрольним зразком. З іншої половини на поверхні різку (для виключення впливу кінцевих ефектів) приготавлявся за стандартною методикою металографічний шліф.

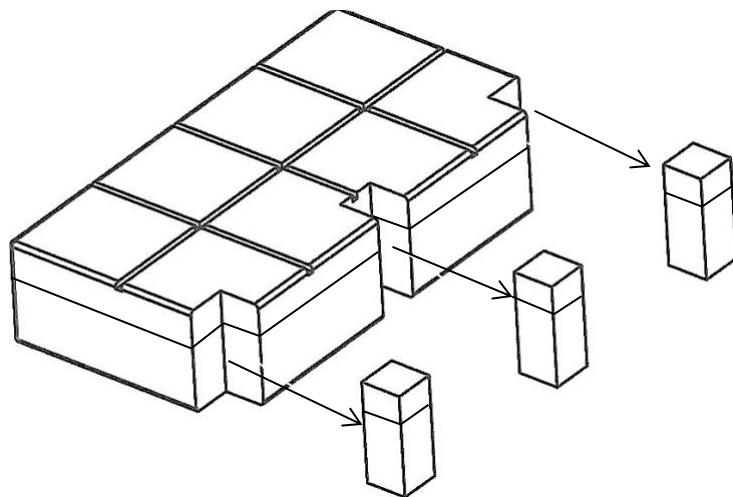


Рис.3.3.1.1 Схема вирізання мікрошліфів з виливків

Перед травленням поверхню шліфів знежирювали спиртом. Для виявлення мікроструктури шліфи піддавали травленню 4% розчином «Nital» (4% азотної кислоти і 96% етанолу/дистильованої води) протягом 5...10 с. Для дослідження

мікроструктури металевих зразків використовували оптичний мікроскоп МІМ-6, МІМ-8 (фотомікроскоп відбитого світла дає збільшення від X50 до X1000). Обробка зображення і вимір лінійних розмірів фазових, а також структурних складових здійснювали за допомогою програми «Infinity capture», яка призначена для поліпшення якості зображень, калібрування розмірів, ручних і автоматичних вимірювань по зображеннях, статистичній обробці та експорту результатів вимірювання.

Металографічні мікроскопи були вдосконалені шляхом оснащення їх цифровою камерою Nikon D3100, підключеної до комп'ютера.

Мікроскопи забезпечували можливість візуального спостереження і фотографування мікрошліфів металів в світлому полі при прямому і косому освітленні, а також в темному полі і поляризованому світлі.

Оцінка якості зчеплення шарів (визначення видимих дефектів типу відслонень, пор, тріщин, макровключень) і вимір товщини функціонального і основного шарів зразків біметалу, полягала в візуальному огляді поперечного перерізу. З цією метою були виготовлені макрошліфи, які відрізалися від одного з торців заготовок листового прокату. Підготовка макрошліфів проводилася відповідно до ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методи випробувань і оцінки мікроструктури».

Для кращого розгляду шарів біметалу, макрошліфи двошарової сталі травилися спеціальними розчинами відповідно до Додатку № 1 до ГОСТ 10243-75 «Рекомендовані реактиви і режими травлення».

3.3.2. Растрова (скануюча) електронна мікроскопія (SEM) і мікрорентгеноспектральний аналіз (EDS)

Особливості формування зони з'єднання складових біметалу вивчалися із застосуванням електронного мікроскопа РЕМ-106І з системою енергодисперсійного мікроаналізу (EDX) для мікроаналізу складу компонентів біметалів та зони сплавлення. Основні характеристики приладу: вакуум до 5×10^{-6} мм рт. ст.; прискорювальна напруга - від 0,5 до 30 кВ; роздільна здатність у

вторинних електронах в режимі високого вакууму - 4 нм, в режимі низького вакууму - 6 нм; вольфрамовий (W) катод(Рис.2).



Рис.3.3.2.1. Скануючий(растровий) електронний мікроскоп REM-106I

РЕМ-106I має високу роздільну здатність, велику глибину фокусування, достатньо простий в користуванні, має сучасне програмне забезпечення для отримання високоякісних РЕМ-зображень. Основні характеристики приладу наведені у табл. 2.

Таблиця 3.3.2.1

Режим роботи	високовакуумний режим (до 5×10^{-6} мм рт. ст.)
Прискорювальна напруга	від 0,5 до 30 кВ
Діапазон збільшень	від 15^{\times} до $300\,000^{\times}$ (крат)
Роздільна здатність у вторинних електронах	в режимі високого вакууму - 4 нм, в режимі низького вакууму - 6 нм
Максимальний розмір зразка	діаметр - до 50 мм, висота - до 30 мм
Катод	W (вольфрам)
Система відкачування повітря	дифузійний насос + ротаційний насос
Програмне забезпечення	для Windows XP
Формат запису файлів	BMP
Розміри робочого місця	2100x1046x1850 мм
Енергоспоживання	не більше 2,5 кВА

3.3.3. Рентгенофазовий аналіз

Для визначення фазового складу отриманих біметалів проводився рентгеноструктурний аналіз з використанням « Θ - 2Θ » методу на рентгенівському дифрактометрі Rigaku Ultima IV (рис.) з графітовим монохроматором у мідному випромінюванні $\text{CuK}\alpha = 0,15418$ нм. Напруга - 30 кВ; сила струму - 30 мА; ширина щілини, яка обмежує рентгенівський промінь - 6 мм. При дослідженні використовувалась схема фокусування за Брегом-Брентано. Умови досліджень: інтервал кутів $2\Theta = 25 - 140^\circ$, крок зйомки - $0,04^\circ$, час витримки у точці - 2 с; тривалість зйомки одного зразка - 90 хв.

Аналіз отриманих рентгенівських спектрів та проведення кількісного та якісного фазового аналізу здійснено з використанням програмного забезпечення PDXL, міжнародної бази даних дифракції ICDD (PDF-2) та відкритої бази кристалографічних даних COD.

Методика рентгеноструктурного фазового аналізу

З плоских виливків біметалів Нікелевий сплав - сталь Ст.3 вирізались мікрошліфи із утвореними перехідними зонами, отримані при заливанні розплавом конструктивної складової зі сталі Ст.3 на підкладку з функціонального матеріалу із нікелевого сплаву з різною топографією зі сторони сплавлення перед зйомкою піддавалися механічному поліруванню.

Розрахунок дифрактограм проводився за стандартною методикою.

З рівняння Вульфа-Брегга

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.3.3.1)$$

випливає, що міжплощинна відстань визначається за формулою:

$$\frac{d}{n} = d_{HKL} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.3.3.2)$$

Так як довжина хвилі характеристичного випромінювання - λ , в якому велася зйомка, відома, то визначення межплосткостних відстаней $\frac{d}{n}$ зводиться до знаходження кутів відповідних всіх лініях дифрактограм.

На дифрактограмах кут θ для вузьких інтерференційних ліній з достатньою точністю визначається положення максимуму інтенсивності. Для розщеплених

або розмитих ліній визначається положення центра ваги кожної α_1 і α_2 лінії. Якщо проводиться розрахунок кутів, відповідних центрам тяжкості рентгенівських ліній без поділу k_α - дублета, то для розрахунку d_{HKL} необхідно використовувати значення довжини хвилі $\lambda_{ц.м.}$.

$$\lambda_{ц.м.} = (2\lambda_{\alpha 1} + \lambda_{\alpha 2}) \cdot \frac{1}{3} \quad (3.3.3.3)$$

При безперервного запису виникає спотворення форми дифракційних ліній і зміщення їх максимумів тим більше, чим більше швидкість обертання лічильника і чим більше постійна часу.

Зйомка рентгенограм від плоского зразка призводить до виникнення ефекту дефокусування ліній. Щоб отримати чітку картину для певної лінії, необхідно налаштувати камеру відповідно до формули Г.В. Курдюмова:

$$\operatorname{tg} \psi = \sin 2\theta / \left(\cos 2\theta + \frac{R}{r} \right) \quad (3.3.3.4)$$

де R - відстань зразка від плівки,

r - відстань зразка від вхідної щілини діафрагми,

ψ - кут повороту зразка по відношенню до первинного пучку.

Для отримання чіткої картини для всіх ліній, необхідно знімати один і той же зразок кілька разів при різних кутах повороту шліфа.

Розрахунок рентгенограм і дифрактограм проводився на комп'ютері із застосуванням спеціальної програми.

Фазовий склад досліджуваного ділянки зони сплавлення встановлювався шляхом порівняння розрахованих значень міжплощинних відстаней $\frac{d}{n_{HKL}}$ з наявними табличними даними з літературних джерел.

Для більш повного дослідження фазового складу зон сплавлення проводився пошаровий рентгенівський аналіз.

3.4. Методи досліджень фізико-механічних властивостей

3.4.1 ДюрOMETричні дослідження

Для вимірювання мікротвердості застосовувався Мікротвердоміри ПМТ-3 по методу Вікерса. Мікротвердість вимірювали втискуванням 4х-гранної алмазної піраміди з кутом при вершині 136° в випробовуваний зразок при навантаженні на індентор 100 г. По діагоналі відбитка з урахуванням ціни ділення окуляра мікроскопа розраховувались значення мікротвердості, як

$$H_\mu = 1854,4 P/d^2, \text{ кгс/мм}^2 \quad (3.4.1.1),$$

де P - нагрузка, гс, d – діагональ відбитка, мм.

Для визначення мікротвердості також застосовувався прилад «Micron-Gamma» методом безперервного вчавлювання алмазного індентору Берковича при навантаженні 50 гс і автоматичній фіксації глибини його впровадження. Швидкість навантаження становила 5 г/с. На кожному зразку проводилось по 15 вимірів з кроком 100 мкм між уколами). Аналіз і обробка діаграм ідентифікування для визначення мікротвердості виконувався автоматично з використанням програмного забезпечення приладу, що базується на методі Олівера і Фара, який прийнятий у якості міжнародного стандарту (ISO/FDIS 14577-1: 2002).

3.4.2 Дослідження середньої міцності поверхневого та оцінка неоднорідності властивостей

Для дослідження середньої міцності перехідного шару отриманих біметалів та для оцінки неоднорідностей властивостей був використаний пристрій Micron-gamma та метод статичного сканування індентором. Метод статичного сканування базується на безперервній реєстрації опору руху індентора по поверхні із заданим постійним навантаженням. Визначення статистичних зв'язків між опорами локальних мікрооб'ємів матеріалу контактному деформуванню методами теорії випадкових процесів.

На рис. 3 представлена модель, яка пояснює сутність методу статичного сканування. Якщо досліджувана поверхня вздовж траси сканування індентора

складається з твердих (і дрібних L2) і м'яких (і великих L1) фрагментів, обробивши трібограму як випадковий процес, можна отримати спектральний портрет поверхні. По спектральній густині можна судити про розміри, кількість і про міцність фрагментів на трасі сканування.

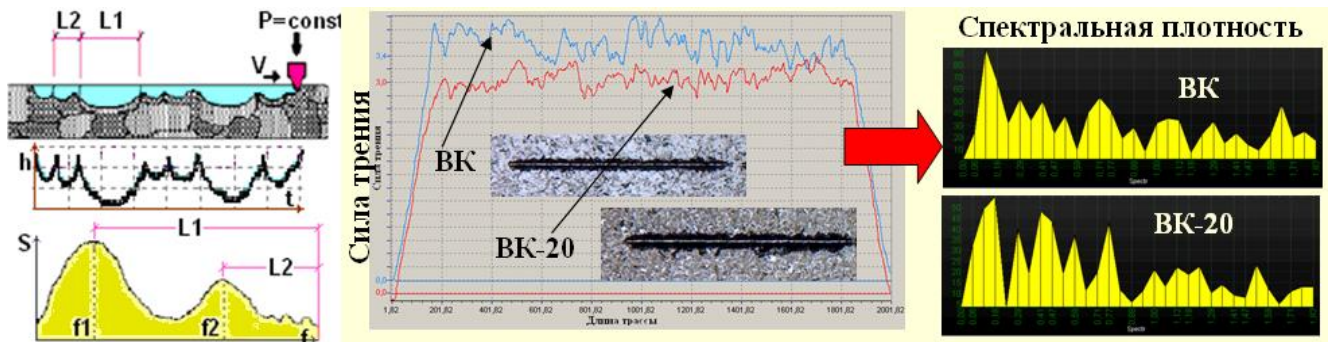


Рис.3.4.2.1. Модель і приклади застосування спектральної густини

Твердість дряпанням по ГОСТ 21318-75: для Берковича $H_{\Delta}=3,138P/b^2$, для Віккерса $H_{\blacksquare}=3,708P/b^2$, де b – ширина подряпини $[37,08P(\Gamma)/b(\text{мкм})^2=\Gamma\text{Па}]$

3.4.3 Дослідження зносостійкості та втомного руйнування

Зносостійкість перехідного шару біметалів та стійкість поверхні до втомного руйнування ми вивчали на пристрої Micron-gamma по методу повторного (малоциклового) дряпання. Метод заснований на багаторазових повторних проходах індентора.

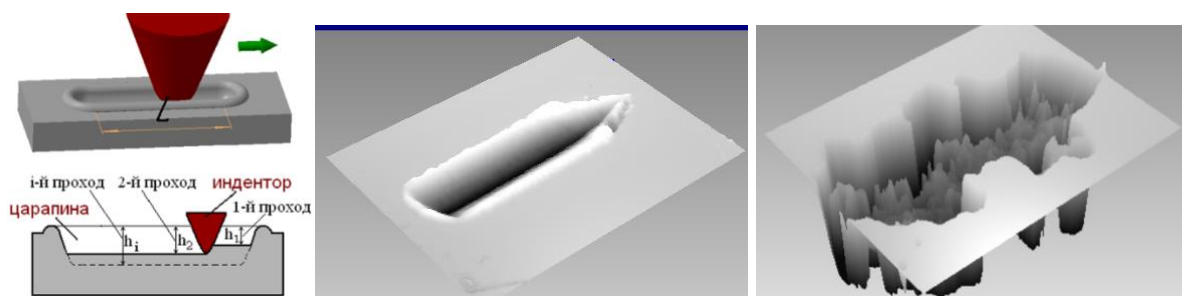
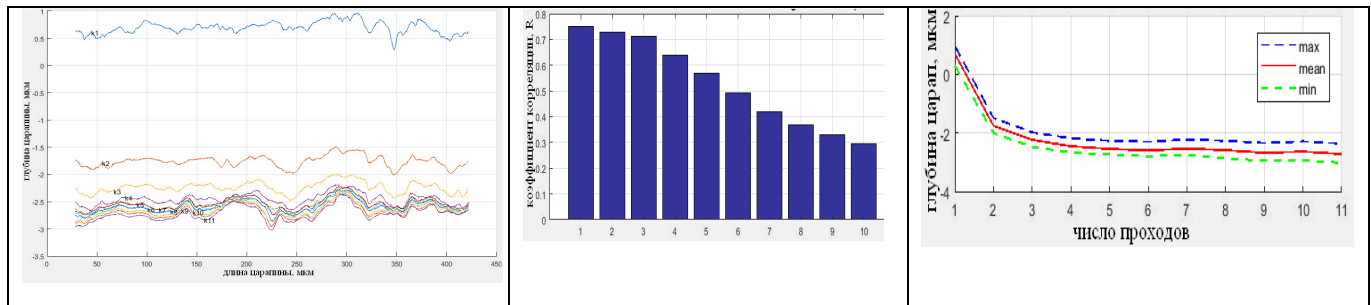


Рис.3.4.3.1. Модель повторного сканування і сліди подряпин на склі ТФ після 8-ми повторних проходів на повітрі і 2-х повторних проходів у воді.

Індентор Берковича, навантаження 100 гс, довжина 150 мкм

Статистична обробка склерограмм (нормальних переміщень індентора, рис.9, а) і трибограм (сили дряпання, рис. 4) дозволяють визначати кореляцію між першою і наступними склерограммами (рис. 9, б) і реєструвати інтенсивність зміни глибини подряпини після кожного проходу (рис. 9, в). Це може характеризувати стійкість до малоциклового дряпання і втомного руйнування.



а

б

в

Рис.3.4.3.2. Профілограмма і склерограмми 10-ти повторних проходів індентора по твердому сплаву (а), коефіцієнти кореляції між першою і наступними склерограммами (б) зміна глибини і розкиду після кожного проходу (в)

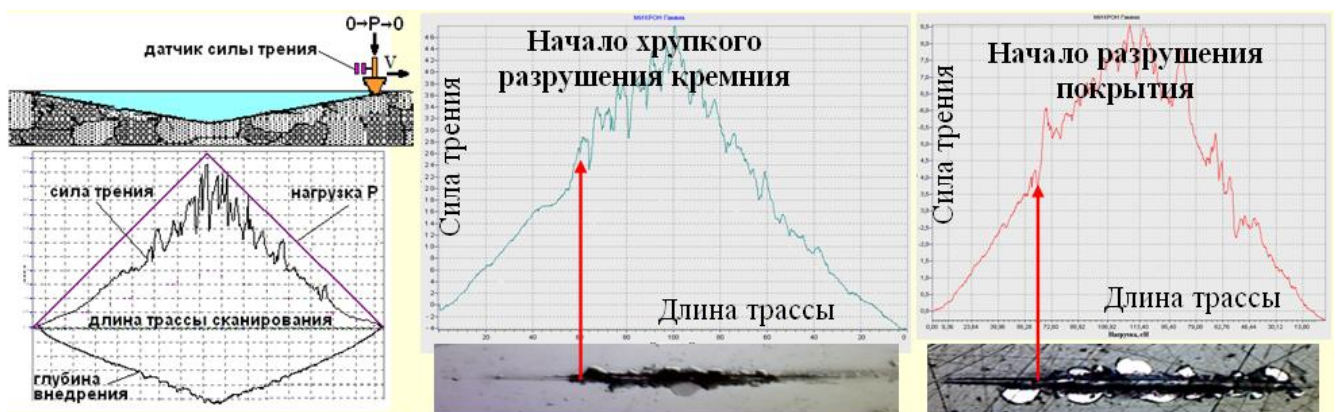


Рис.3.4.3.3. Модель і приклади застосування при реєстрації сили тертя

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Визначено коло вихідних матеріалів, що застосовуються для отримання досліджуваних біметалевих матеріалів. Відпрацьовано технологію підготовки мікрошліфів для металографічних досліджень. Освоєна методика світлової і скануючої електронної мікроскопії, енергодисперсійного і рентгеноструктурного аналізу, вимірювання мікротвердості. Обрані типи і схеми навантаження біметалів для перевірки на відшаровування.

Обґрунтовано умови і режими застосовуються в роботі технологічних операцій, використовуваних при отриманні досліджуваних матеріалів (лазерно-ливарний процес). Обрана математична модель для опису кінетики дифузійних процесів на границі взаємодії двох матеріалів.

Відпрацьована методика дослідження фізико-механічних властивостей перехідного шару біметалевого композиту нікелевий сплав-сталь Ст3. Освоєно математичні пакети для розрахунку параметрів міцності, зносостійкості, втомної міцності по діаграмам динамічного сканування індентором перехідної зони біметалу.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ БІМЕТАЛУ

Серед багатьох факторів, що визначають кінцеву структуру та експлуатаційні властивості біметалевих матеріалів, найбільш значущими є температура заливання розплаву, геометричні параметри регулярної фактури поверхні (інтервали між виступами, їх форма та розміри), теплофізичні характеристики матеріалів, які взаємодіють у твердо-рідкому стані, інтенсивність тепловідводу та швидкість охолодження, а також склад. Особливості впливу зазначених технологічних параметрів на формування структури та властивостей біметалів залишаються недостатньо висвітленими у працях вітчизняних і зарубіжних дослідників.

У даному розділі наведено результати досліджень біметалевих композитів системи «нікелевий сплав – сталь Ст.3», отриманих із застосуванням комбінованих лазерно-ливарних процесів у межах виконання науково-дослідної роботи № 2028п «Розробка високопродуктивного процесу виготовлення біметалевих матеріалів різного призначення та відповідного технологічного обладнання».

Зокрема, представлено результати металографічних досліджень перехідної зони з'єднання нікелевого сплаву з розплавом сталі Ст.3, а також проведено оцінку впливу параметрів регулярного мікрорельєфу поверхні функціональної складової та енерговпливу під час взаємодії з розплавом конструктивної складової на формування вихідної структури готового біметалевого композиту. Водночас у більшості опублікованих на сьогодні робіт глибокі структурні дослідження багатошарових металевих композитів типу «нікелевий сплав – вуглецева сталь» практично не проводилися.

В даному розділі особлива увага приділялася дослідженням мікроструктури на межі з'єднання функціональної та конструктивної складової з використання 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.

У цьому розділі особливу увагу приділено вивченню мікроструктури в зоні з'єднання функціональної та конструктивної складових із використанням методів світлової мікроскопії, растрової (скануючої) електронної мікроскопії, а також аналізу процесів формування біметалевих композитів шляхом математичного моделювання в програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.5 із застосуванням методу рухомих границь.

Сукупність отриманих експериментальних та розрахункових даних дозволяє сформувати більш повне уявлення про закономірності перебігу комбінованого лазерно-ливарного процесу та механізми формування структури і властивостей біметалевих матеріалів.

4.1 Дослідження впливу конфігурації виступів (висоти, інтервалу, форми) на якісні параметри перехідного шару

Розроблені типи фактур під заливку лазерно-ливарним методом представлені на Рис. 4.1.1.

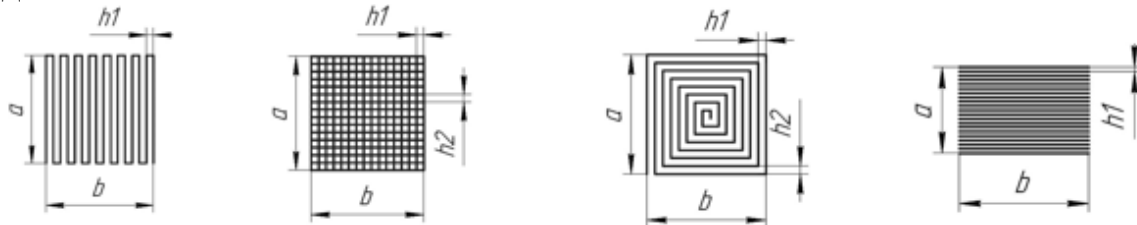
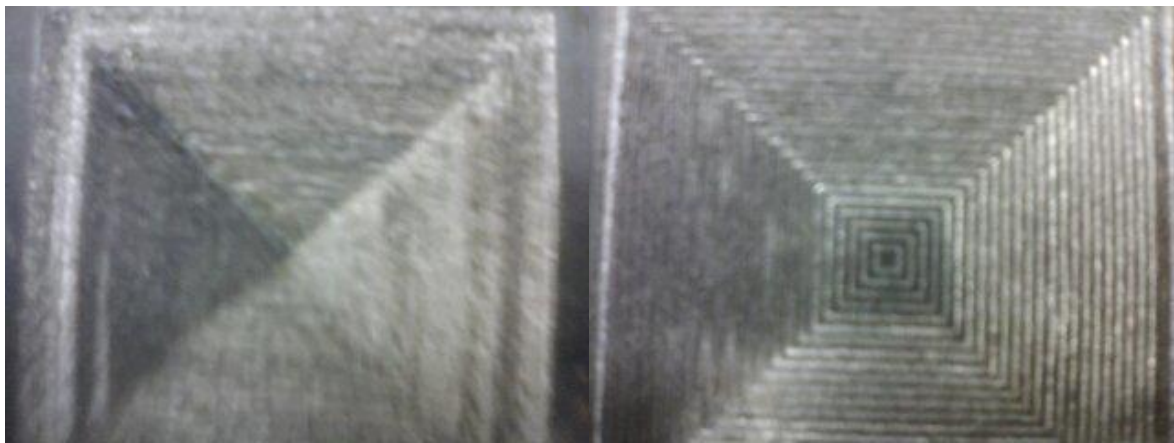


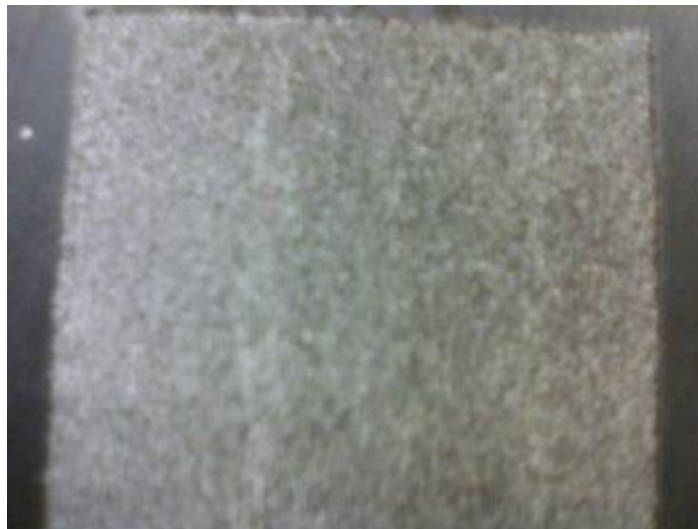
Рис. 4.1.1. Схеми заготовок з різними фактурами при попередній обробці пластин основи лазерним випромінюванням: а) крок «по лінії» з невеликою глибиною фактури; б) малий крок типу «змійка»; в) великий крок «по колу»; г) крок «по лінії» з глибокою глибиною фактури.

Для попередніх експериментальних досліджень були обрані представлені нижче схеми утворення фактур при підготовці поверхні функціональної складової біметалу під заливку. При цьому лазером наноситься структура на лист, що переміщається робочим столом лазерного комплексу. Стіл лазера викреслює потрібну лінію (лінії) на виробі, і ми отримуємо потрібну фактуру (Рис. 4.1.2.). Після обробки лазерний випромінювач відводиться, після чого лист переміщується в наступну зону обробки для заливки робочим шаром біметалу.



а)

б)



в)

Рис. 4.1.2. Зразки отриманих фактур під заливку:

а) середній крок «по колу» (0,5мм), глибина фактури 0,5мм; б) великий крок «по колу» (1мм), глибина фактури 0,8мм; в) малий крок «змійка» (0,2 мм), глибина фактури 0,2мм.

Також по схемам даного методу були отримані наступні зразки (Рис. 4.1.2.)

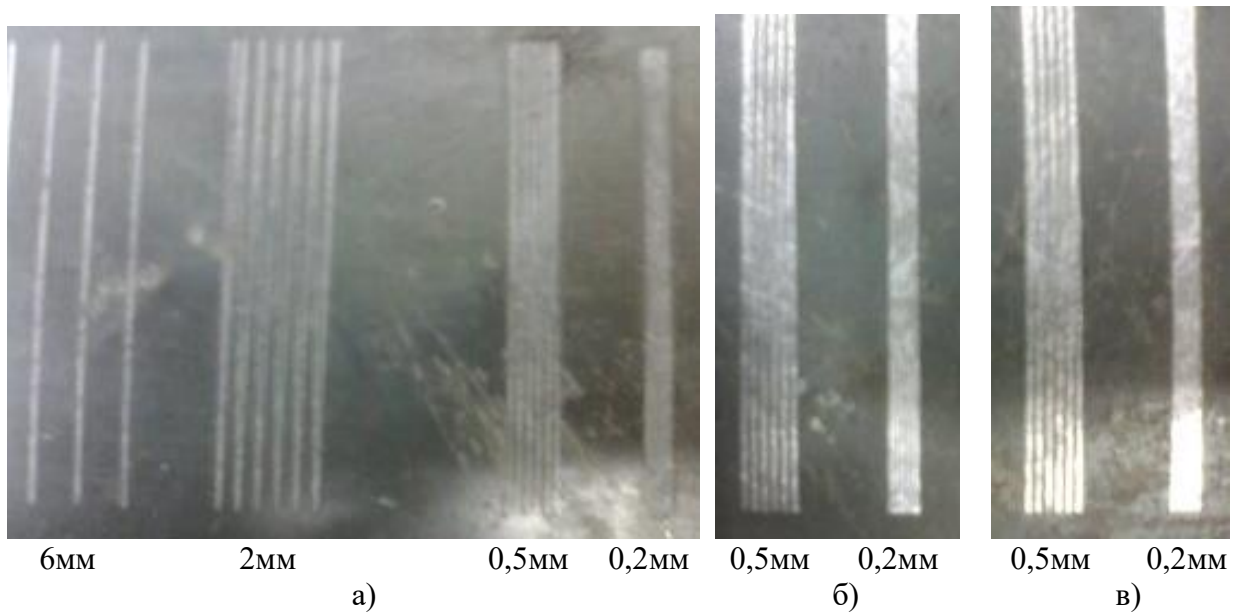


Рис. 4.1.3. Практичні зразки отриманих фактур під заливку:
а) крок «по лінії» глибина фактури 0,2мм; б) крок «по лінії» глибина фактури 0,5мм; в) крок по «лінії» глибина фактури 0,8мм.

Була проведена експериментальна перевірка зразків з різним кроком та глибиною фактури. В результаті проведених експериментів виявили, що найкраще щеплення між основою та робочим шаром забезпечується при мінімальному кроці від 0.5 мм до 0.2 мм. та при максимальній (серед досліджуваних зразків) глибині 0.8 мм.

Наявність двох-координатного стола в лазерному комплексі дозволила перевірити вплив виду рисунка фактури на якість щеплення. Результати показали, що форма рисунка, відмінна від прямолінійної, коли вона має другу координату (наприклад коло, квадрат і т.д) підвищує якість щеплення та забезпечує надійну фіксацію в двох координатах. Зразки проходили перевірку на розрив та зсув. Як оптимальна, була обрана фактура з малим кроком по колу та з глибиною фактури 0.8 мм. Результати заливки таких фактур розплавом для отримання робочого шару представлені на Рис. 4.1.4., а) та б).

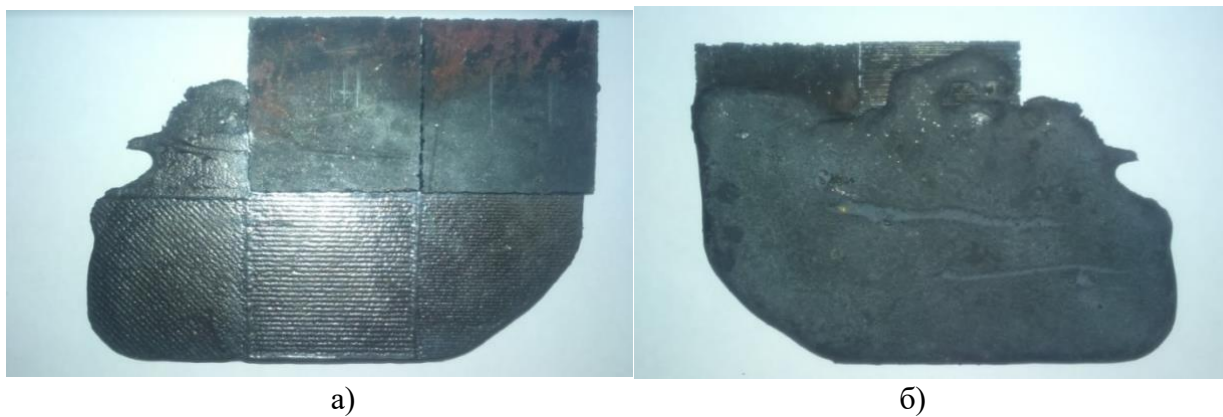


Рис. 4.1.4. Виливок після заливки рідким металом зі структурою: а) з прямолінійною структурою; б) з прямокутною структурою.

Отримані біметали після нанесення фактури лазером і заливки рідким металом робочого шару, охолоджувались до кімнатної температури. Далі проводилася їх механічна обробка для надання деталі кінцевого вигляду і розмірів (Рис. 4.1.5.).

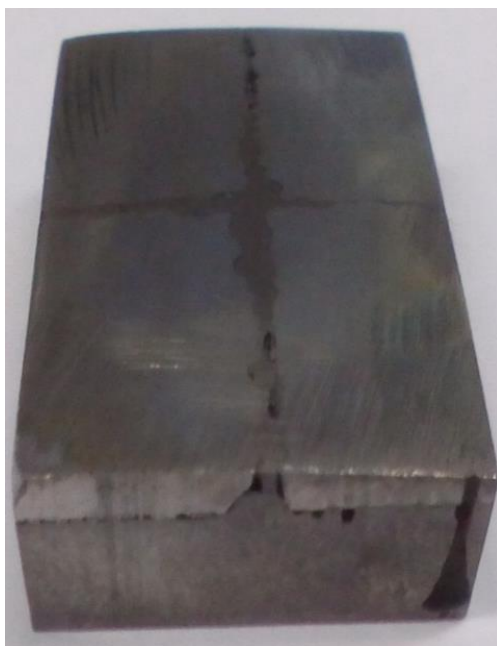


Рис. 4.1.5. Зразок біметалу з нанесеною лазером фактурою, після заливки та механічної обробки.

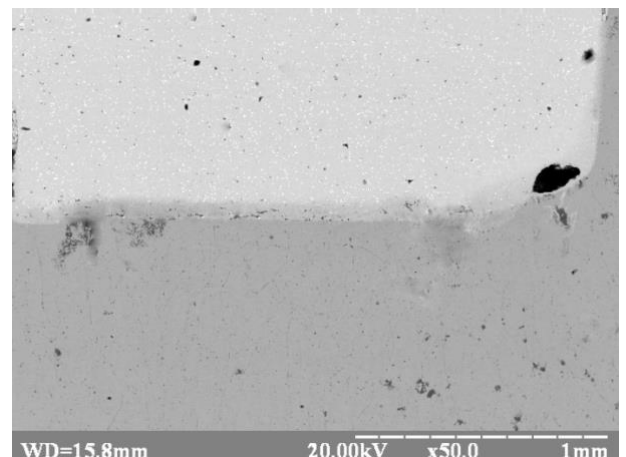
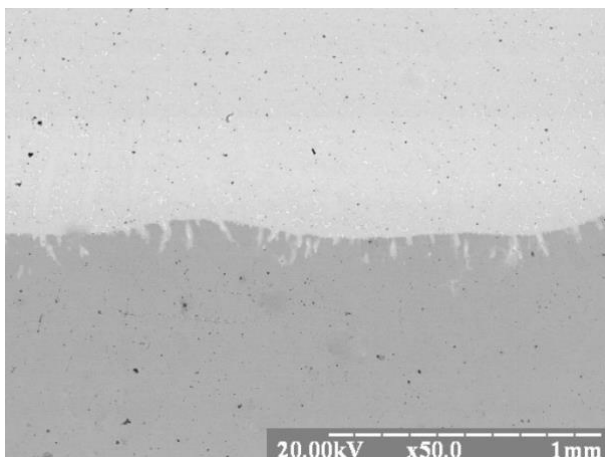
На другому етапі експериментальних досліджень перевіряли як впливає інтервал нанесених структур та їх висота на якість з'єднання складових біметалу. З попереднього етапу було визначено, що оптимальна форма структур западин/виступів прямокутної форми з площею вершини рівна 1 мм^2 , достатня

при якій відбувається їх підправлення з локалізацією ділянок з металургійним з'єднанням.

4.2 Дослідження структури, складу і властивостей зони зчеплення шарів отриманих біметалів

Після попередніх механічних випробувань були виявлені зразки, які розшаровувались і їх було відбраковано. У решти зразків спостерігається 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.

Мікрофотографії зони з'єднання зливків «Нікелевий сплав Н60ВТ+Мо-сталь Ст3» свідчить про те, що в результаті взаємодії розплаву маловуглецевої сталі з підготовленою поверхнею функціональної складової утворюються хвилеподібна зона з'єднання Рис.4.1., яка відповідає дифузійному характеру. Фронт дифузії рухається рухається в напрямку маловуглецевої сталі та охоплює два матеріали.



а

б

Рис. 4.2.1. Зона з'єднання нікелевого сплаву Н60ВТ+Мо і вуглецевої сталі Ст3: а - зразка $b \times h = (1 \times 0,5)$, б - зразка $b \times h = (2 \times 1,5)$

На Рис. 4.2.2. показані мікроструктури границі з'єднання і прилежних шарів функціонального і конструкційного матеріалів біметалу, отримані з використанням пластин функціонального складу з різними параметрами регулярного макререльєфу.

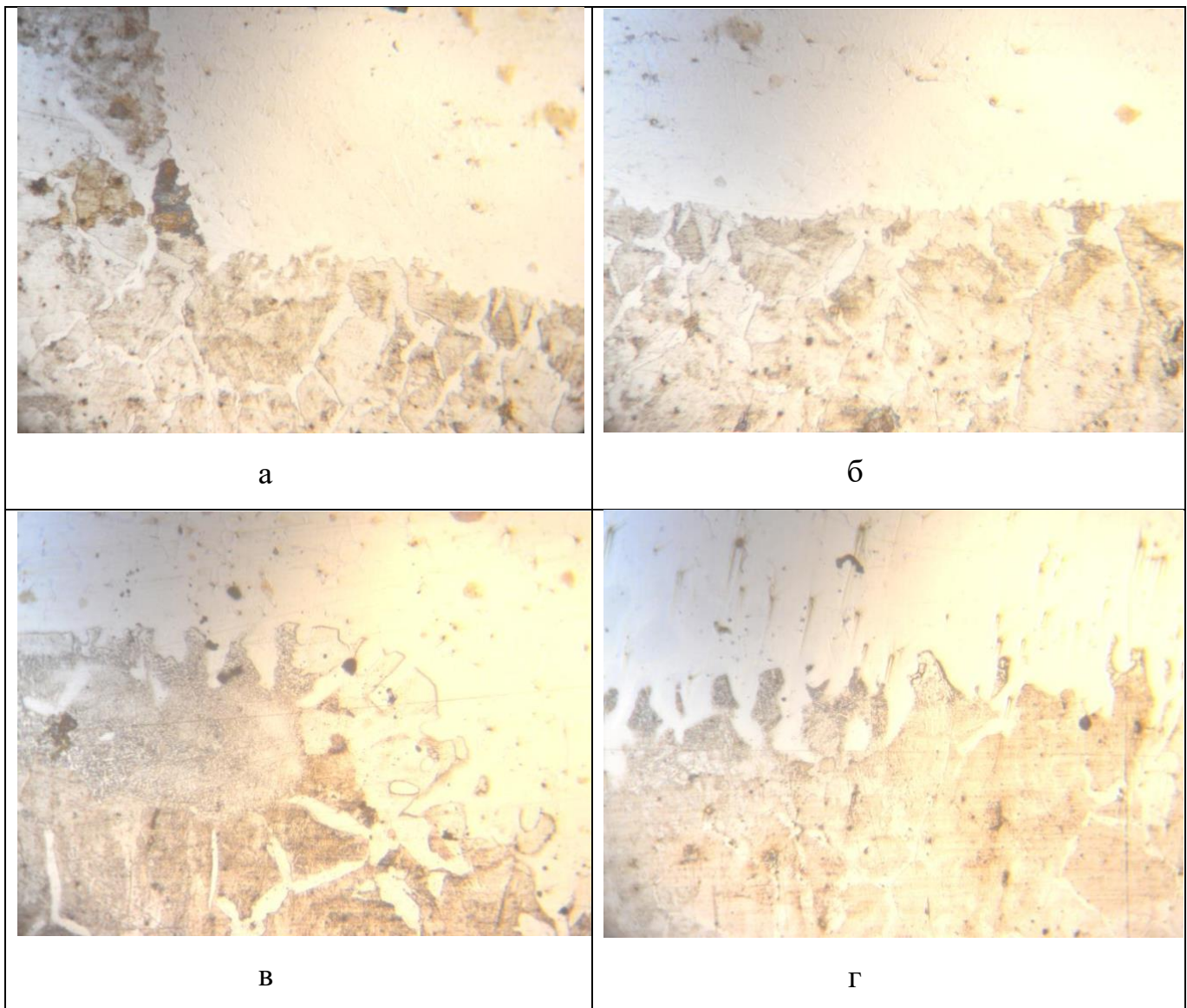


Рис. 4.2.2. Мікроструктури границі з'єднання зразків біметалів з різними параметрами нанесених макроструктур $b \times h$: а – $(2,0 \times 1,5)$; б – $(1,5 \times 1,0)$; в – $(1,5 \times 1,5)$; г – $(1,5 \times 0,5)$, при збільшенні 200х

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 (Рис. 4.2.3.). Границя з'єднання (рис.4.2.3.) зразка $b \times h: (2,0 \times 1,5)$ мм виглядає як полоса з незначними розмитими краями, що ймовірно пов'язано із взаємним проникненням легуючих елементів із одного шару в інший, товщиною 70-115 мкм, який розділяє конструкційний та функціональний шар.

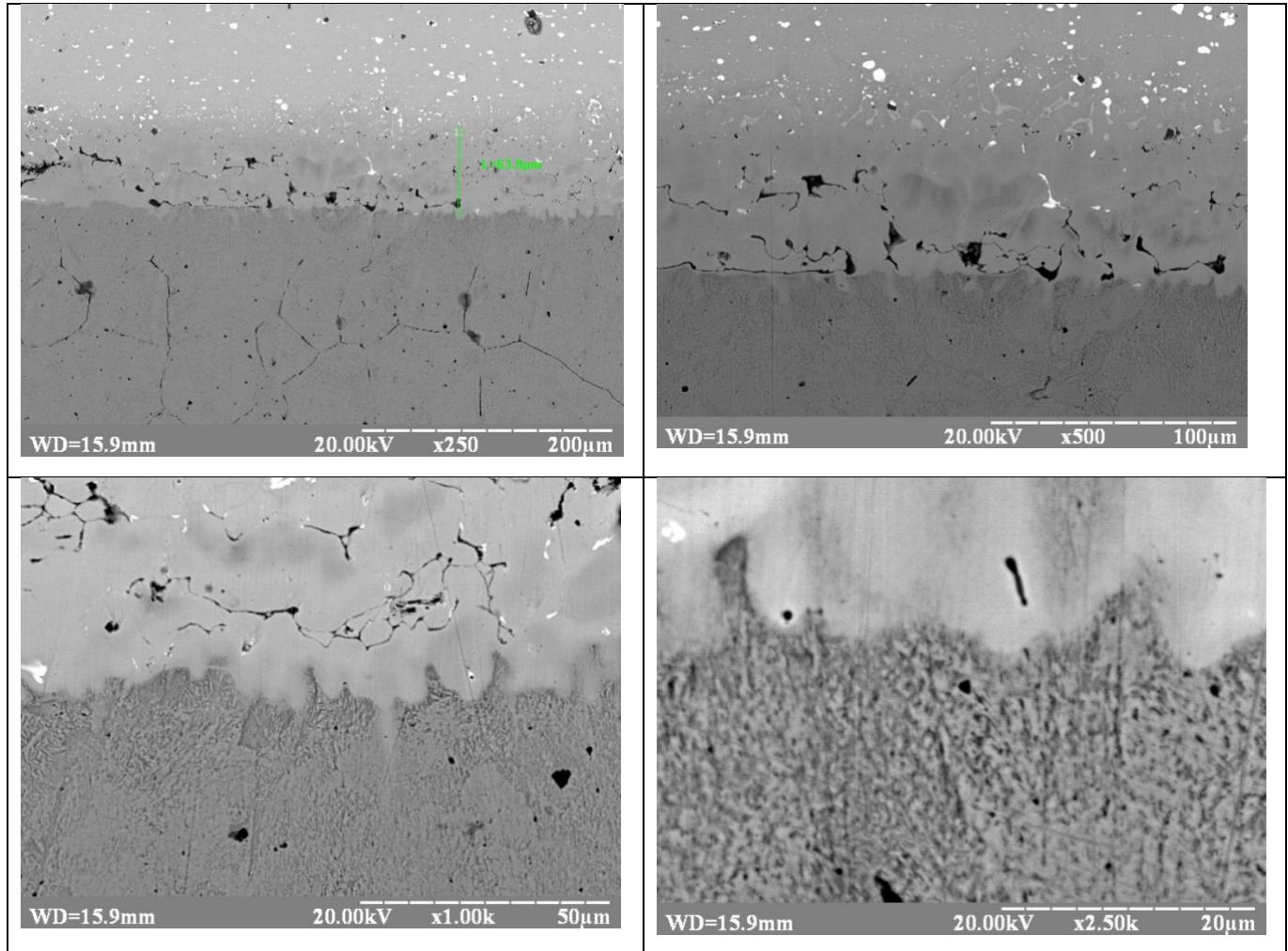


Рис. 4.2.3. Фотографії мікроструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (2 \times 1,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 1,5 мм і кроком 2,0 мм при збільшеннях: 250х, 500х, 1000х, 2500х

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 (Рис. 4.2.4. а). 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 напруг, і з яких починається відшаровування складових (Рис. 4.2.4. а)). По цій же причині можна пояснити і поява 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 Рис. 4.2.4. б) границі з'єднання повинен добавляти біметалу високий опір при відриві та зрізу, але маючи концентратори напруг і підвищену мікротвердість на етапі охолодження утворюються мікротріщини та відшаровування.

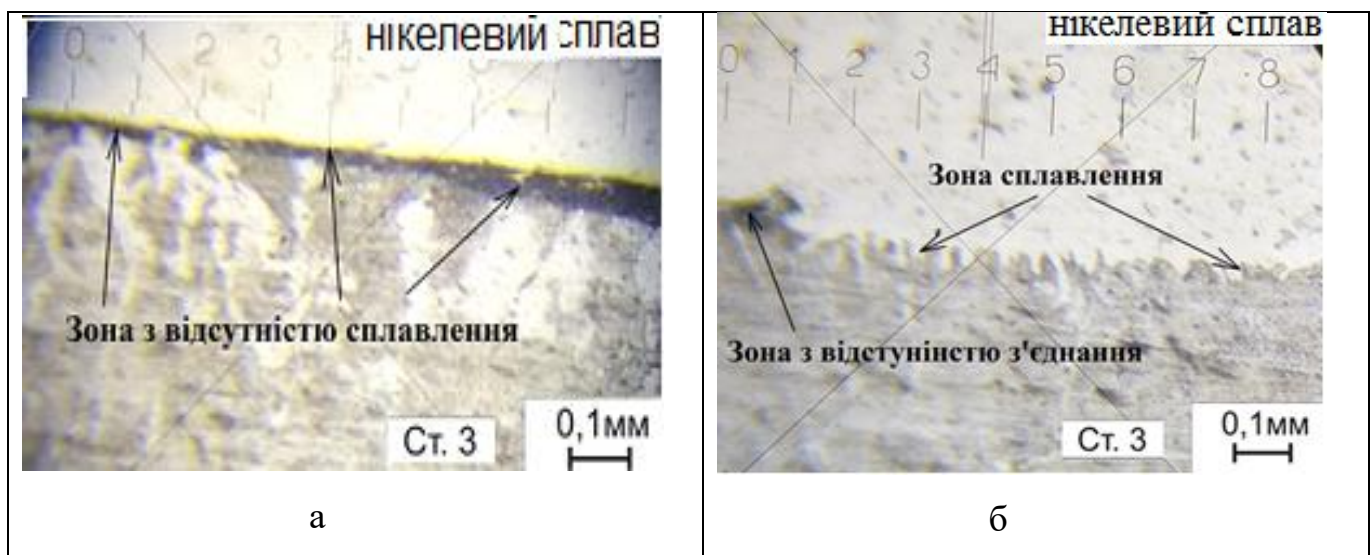


Рис. 4.2.4. Мікроструктури зони з'єднання зразка $b \times h = (2 \times 1,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, де спостерігаються дефекти у вигляді пор та розшарувань внаслідок напружень, які виникають на етапі охолодження

При розгляді зразків біметалів із регулярним рельєфом $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм Рис. 4.2.5., 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.

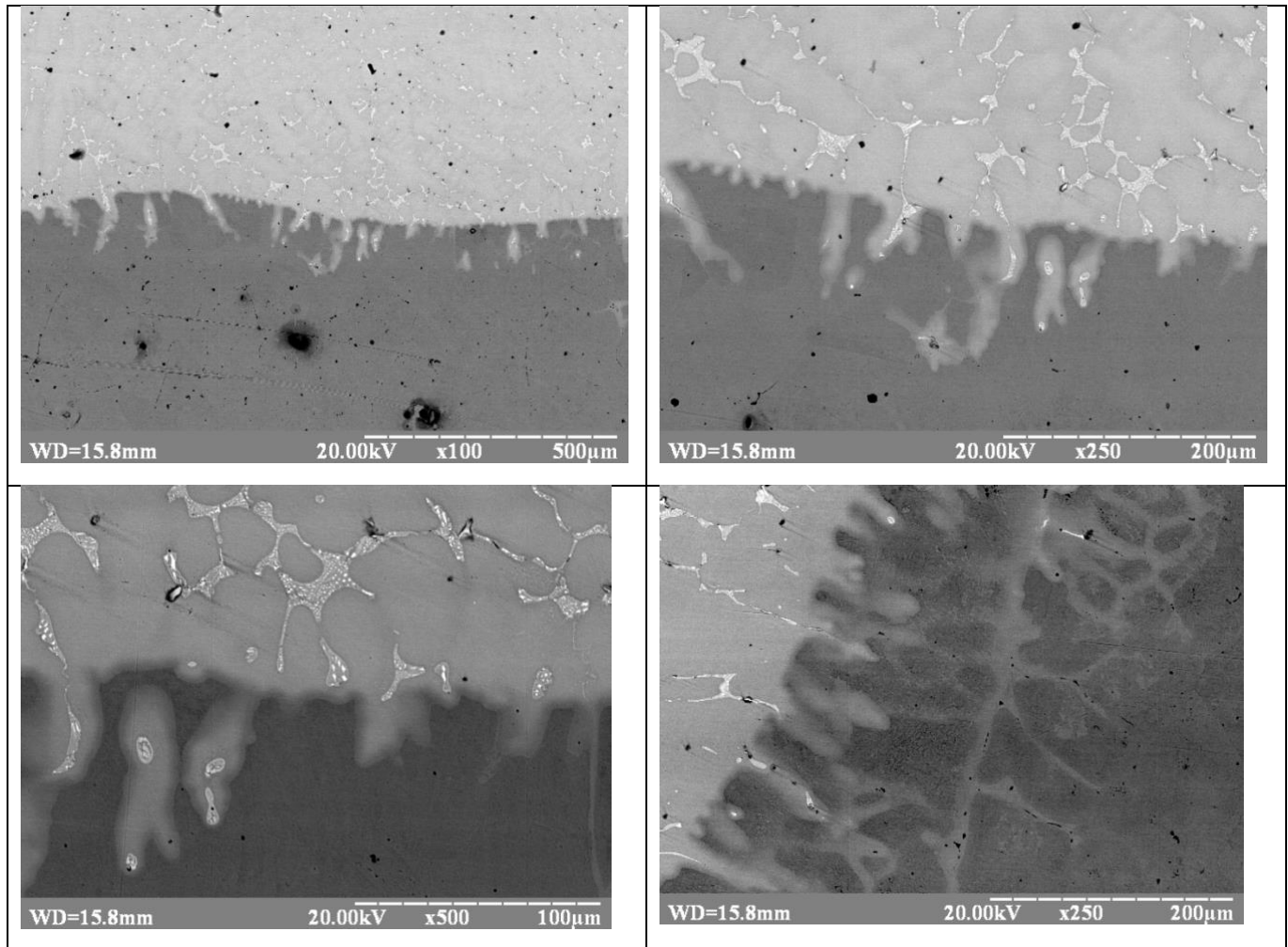


Рис. 4.2.5. Фотографії мікроструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 0,5мм і кроком 1,5 мм при збільшеннях: 100х, 250х, 500х, 250х

При розгляді будови зони сплавлення (Рис. 4.2.6.) 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.

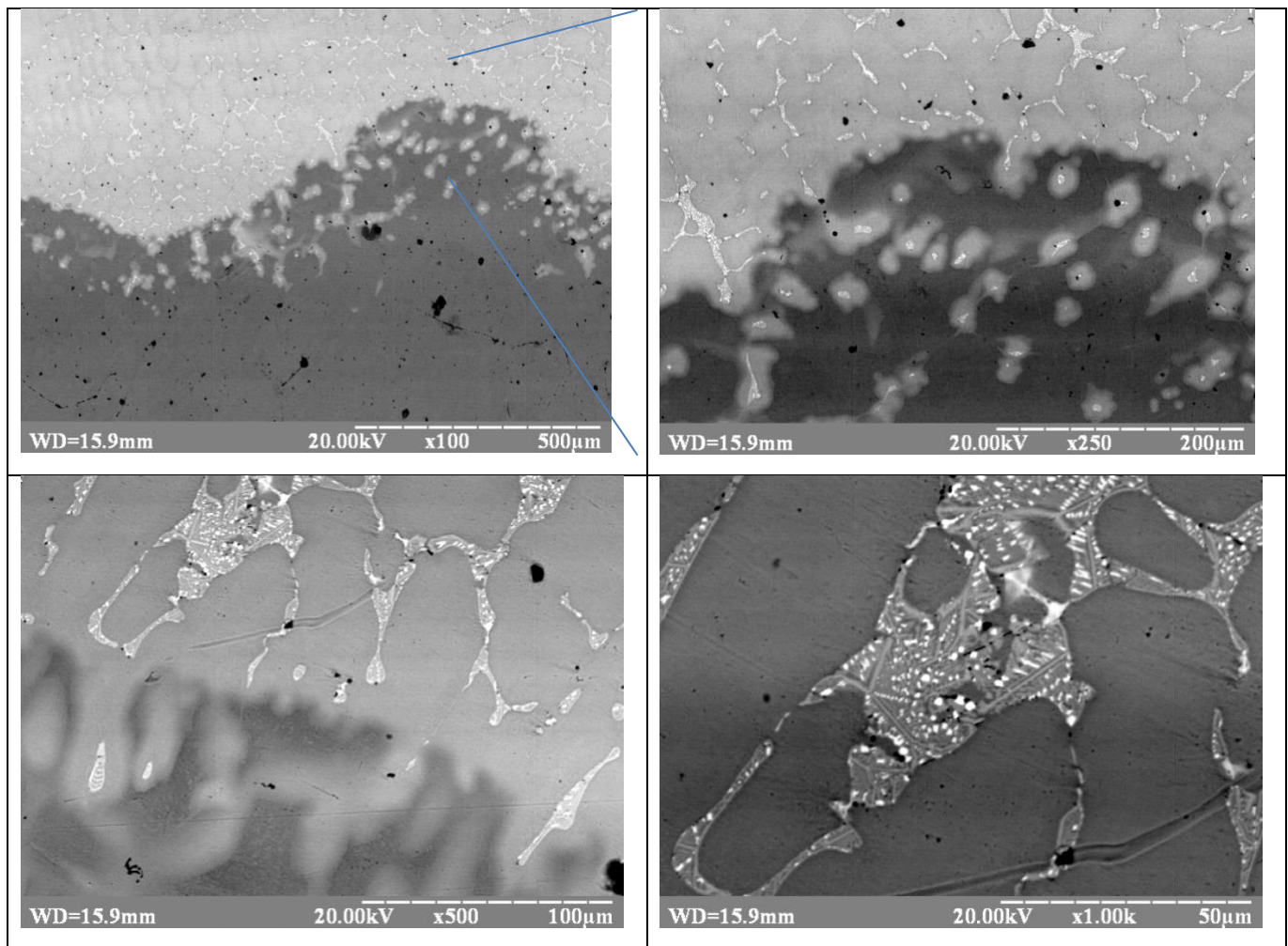


Рис. 4.2.6. Фотографії мікроструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (1,5 \times 1,0)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 0,5мм і кроком 1,5 мм при збільшеннях: 100х, 250х, 500х, 1000х

На 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 (Рис. 4.2.7.)

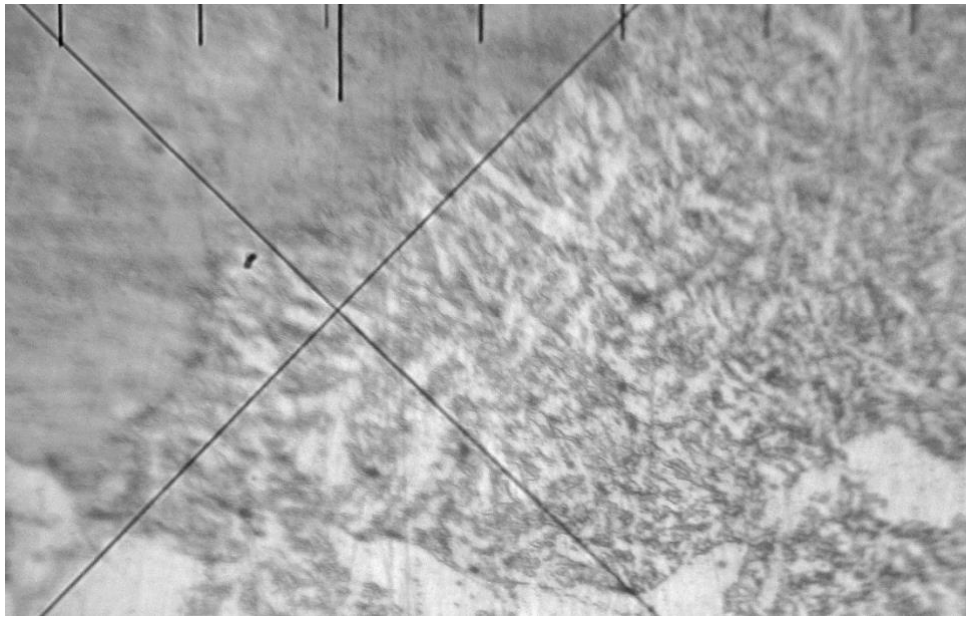


Рис. 4.2.7. Утворення мартенситних структур в перехідній зоні між нікелевим спалвом та маловуглецевою сталлю виливків біметалу із топографією $b \times h = (1,5 \times 1,0)$, збільшення $\times 500$

На Рис. 4.2.8. показана лита ферито-парлітна структура нанесеної Ст3, нанесеної наплавкою на нікелевий сплав марки ХН60ВТ+Мо. Добре видно дендридна будова литої сталі.

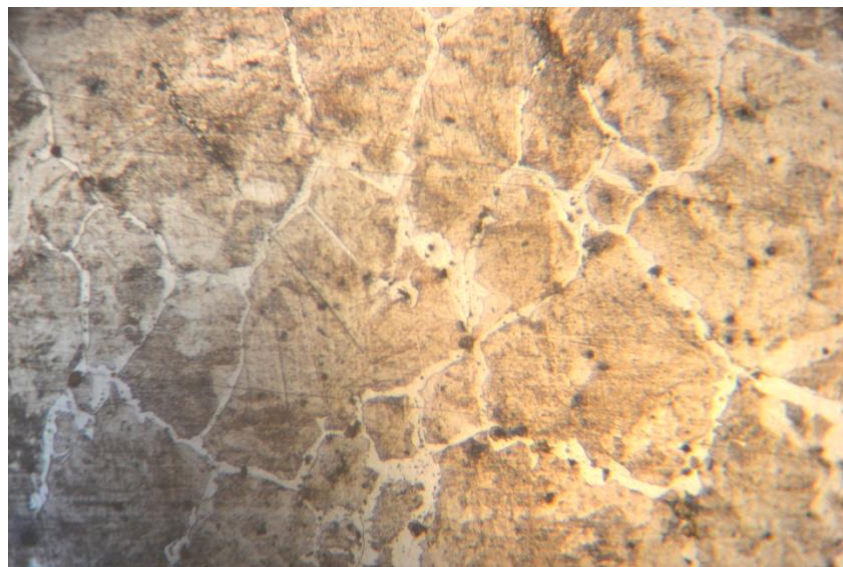


Рис. 4.2.8. Будова наплавленого шару сталі Ст3 в литому стані при збільшенні $\times 200$

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

растрового(скануючого) електронного мікроскопа, обладнаного мікрорентгеноспектральною приставкою.

На Рис. 4.2.9. та в таблиці 4.2.1 наведено вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення і в закристалізованому шарі сталі Ст.3.

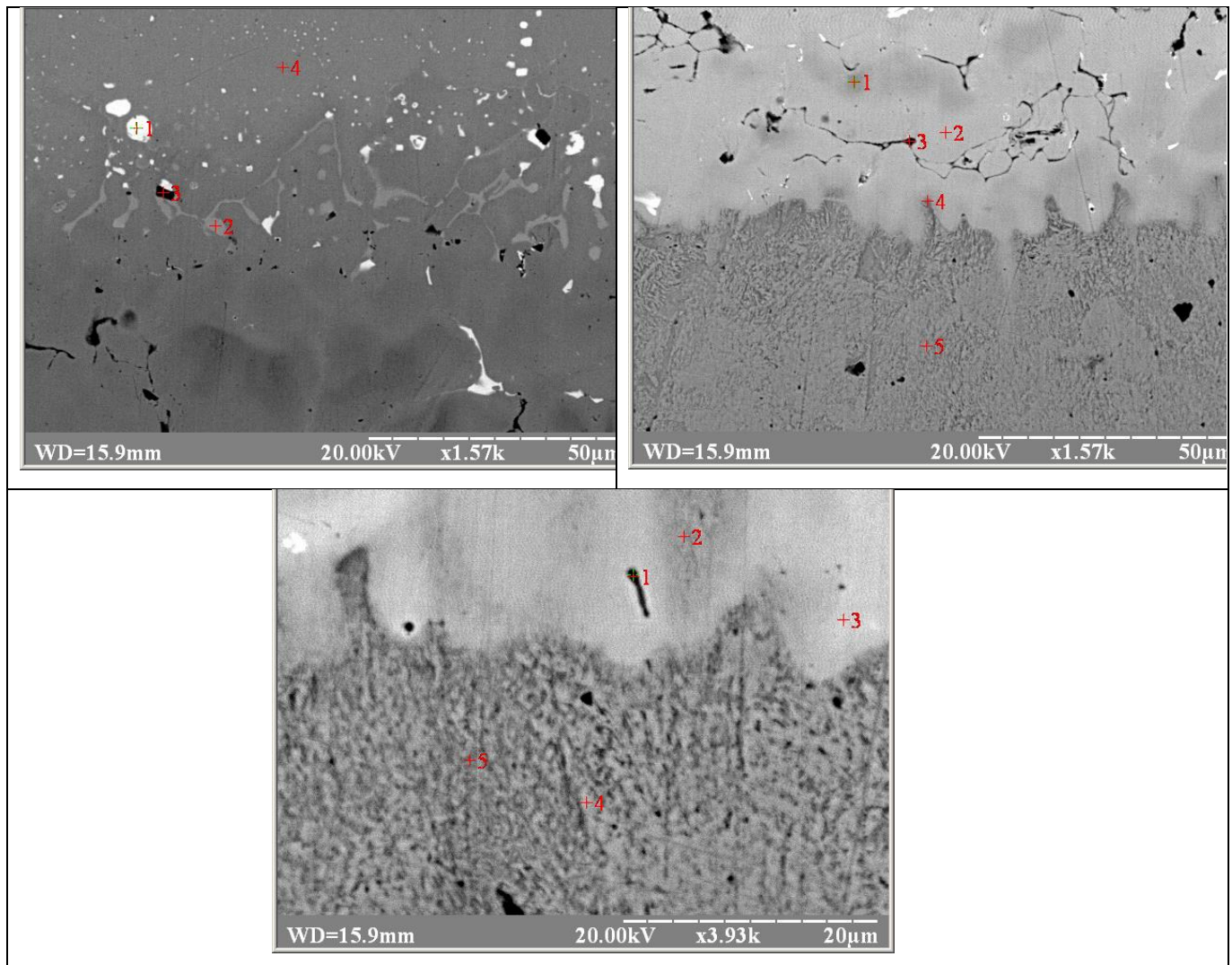


Рис. 4.2.9. Структура (а,б) і зміна змісту в перехідній зоні біметалу Н60ВТ+Мо – Ст3 при збільшені 1570х, 1570х, 3930х

Таблиця 4.2.1

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

№	Елементи, %	
---	-------------	--

	S	Ti	Cr	Fe	Ni	W	Шар біметалу
1	3.1	-	14. 36	1.1 3	13. 14	68. 27	Перехідн ий
2	1.9 3	-	56. 63	24. 28	2.9 8	14. 18	Перехідн ий
3	0	92. 5	4.2 8	1.5 8	0.5 6	1.0 8	Перехідн ий
4	0.8 1	0.4 1	27. 9	4.1 6	61. 04	5.6 7	Перехідн ий
№	Елементи, %						Шар біметалу
	S	Ti	Cr	Fe	Ni	W	
1	0.1 9	0.0 8	0.4 9	96. 75	2.0 8	0.4	Перехідн ий
2	0.4 8	0.4 7	8.8 7	56. 96	30. 51	2.7	Перехідн ий
3	0.1 9	0.6 4	6.9 4	68. 83	21. 5	1.9	Перехідн ий
4	0.0 7	0.0 6	0.3 8	99. 28	0.0 3	0.1 7	Сталь Ст.3
5	0.0 6	0.0 2	0.0 6	99. 76	0	0	Сталь Ст.3

№	Елементи, %						Шар біметалу
	S	Ti	Cr	Fe	Ni	W	
1	10. 36	0.1 5	12. 84	72. 6	3.6 1	0.4 3	Перехідн ий
2	0.1 2	0	0.2 3	99. 22	1.2 5	0.1 8	Перехідн ий

3	0.3 6	0	4.8 7	78. 76	14. 47	1.5 3	Перехідн ий
4	0	0	0	99. 63	0	0.3 4	Перехідн ий
5	0.1 9	0.0 3	0.1	99. 55	0	0.1 4	Сталь Ст.3

На основі аналізу розподілу елементів, представленого на Рис. 4.2.10. і Рис. 4.2.11., та Таблиці 4.2.2, встановлено, що перехідна зона біметалу «ХН60ВТ – сталь Ст3» з макрорельєфом 2,0×1,5 мм має протяжність близько 100–110 мкм, де спостерігається інтенсивна взаємна дифузія та механічне перемішування компонентів. Характерною особливістю даного профілю є нелінійна зміна концентрації нікелю (Ni) та хрому (Cr) у зоні сплавлення (ділянка 90–190 мкм), де фіксуються локальні максимуми вмісту легуючих елементів (зокрема, сплеск Ni до 60% на позначці 150 мкм), що свідчить про глибоке проникнення об'ємів нікелевого сплаву в залізну основу завдяки розвиненій поверхні контакту. Поступове заміщення основних компонентів сплаву ХН60ВТ залізом (Fe) завершується на межі з основним металом (Ст3) після 200 мкм, що підтверджує формування надійного металургійного зв'язку та ефективність використання заданого макрорельєфу для стабілізації хімічного складу перехідного шару.

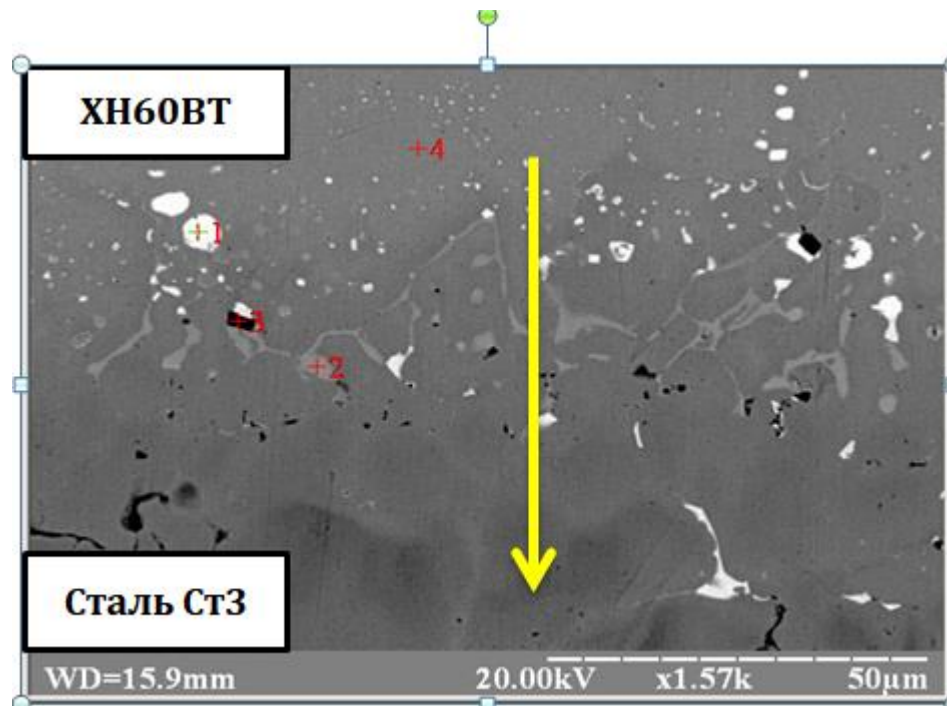


Рис. 4.2.10. Мікрофотографії перехідної зони зразка $b \times h = (2,0 \times 1,5)$ мм біметалу ХН60ВТ – Ст.3, зі збільшенням $\times 785$

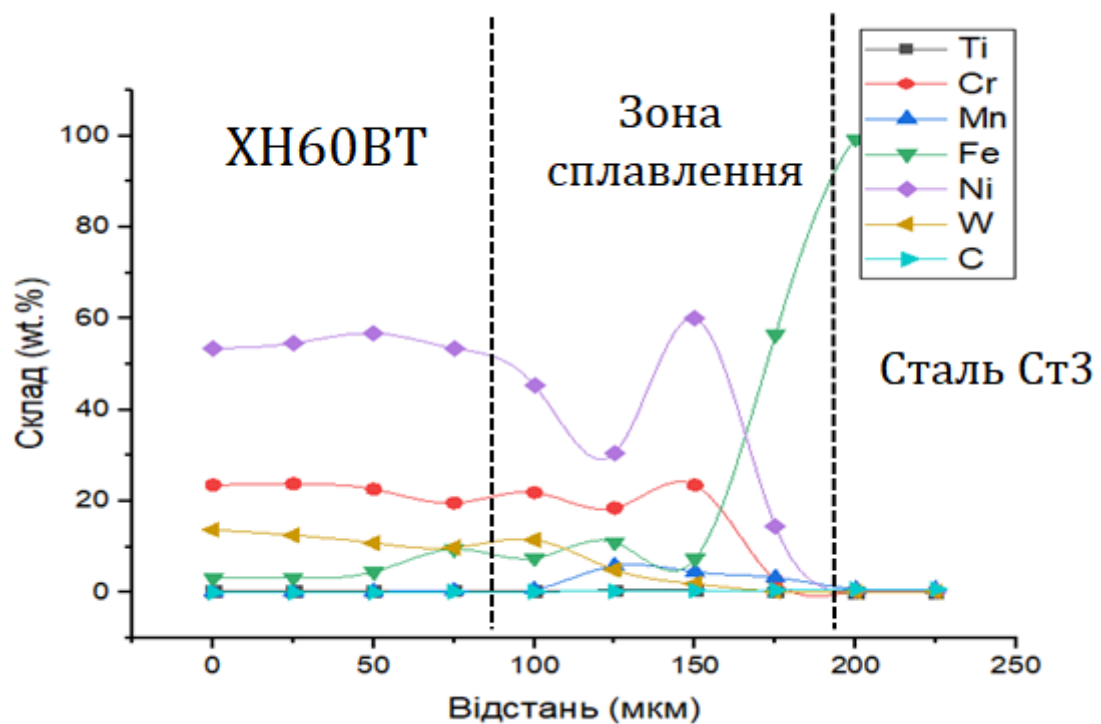


Рис. 4.2.11. Зміна хімічного складу в перехідному шарі біметалу «ХН60ВТ - сталь Ст.3» з макрорельєфом $(2,0 \times 1,5)$ мм на поверхні функціональної складової сплаву

Таблиця 4.2.2

Вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення $b \times h = (2,0 \times 1,5)$ мм нікелевого сплаву - сталі Ст.3.

	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 Рис. 4.2.12. наведено дифрактограму, зняту з ділянки поперечного перерізу біметалу діаметром 6 мм симетричну відносно умовної лінії з'єднання.

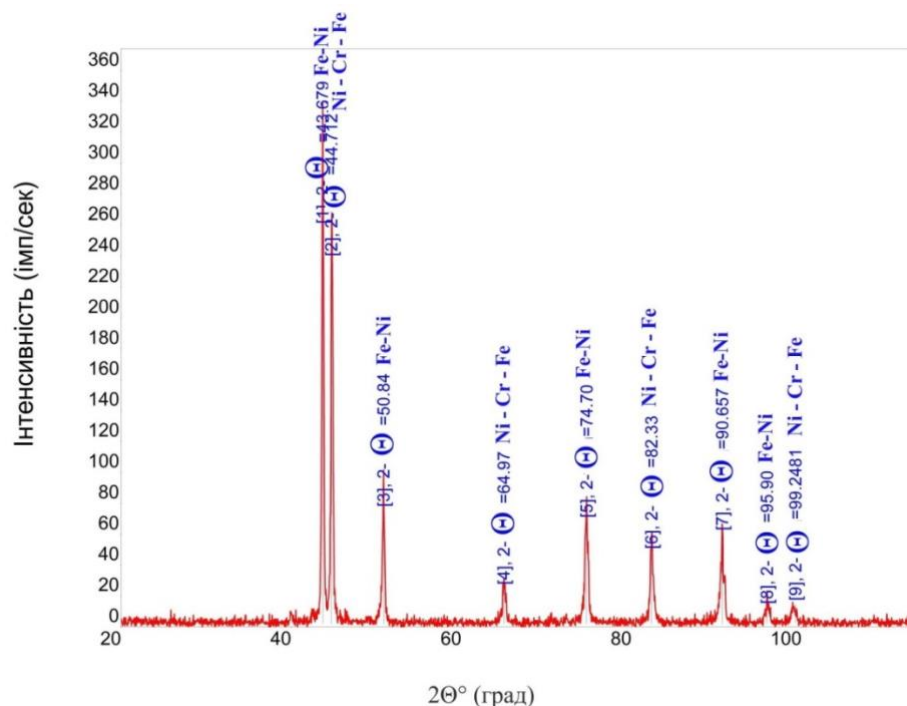


Рис. 4.2.12. Дифрактограма перехідного шару біметалу «нікелевий сплав - сталь Ст.3» з макрорельєфом на поверхні сплаву $b \times h = (2 \times 1,5)$ мм

Фазовий склад визначався із зони, в якій переважно був присутнім нікелевий сплав, при цьому частина ділянки, де відбулось сплавлення складових

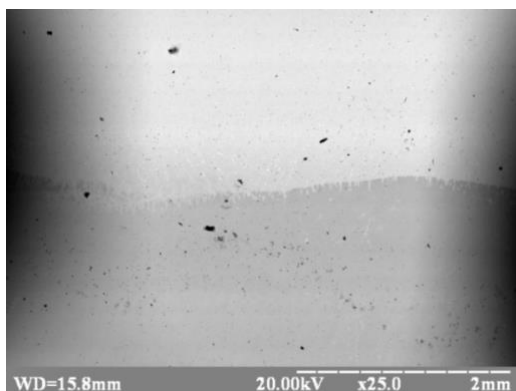
біметалу, становила лише 20-30%. Вміст фази Ni - Cr – Fe складає 89,1%, а фази Fe 0.507 Ni 0.493 (тетратаєніту) – 10,9%.

Далі 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.

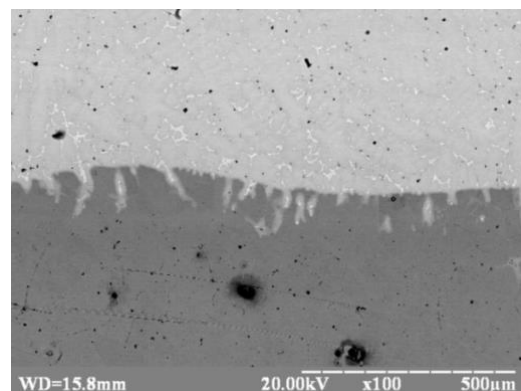
На Рис. 4.2.13. а) представлено фотографію макроструктури шліфа зразка біметалу, функціональна складова якого мала регулярний макрорельєф, висота виступів якого становила 0,5 мм, крок між виступами - 1,5 мм.



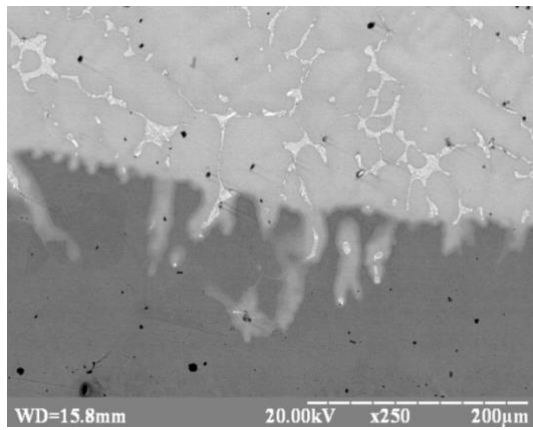
а



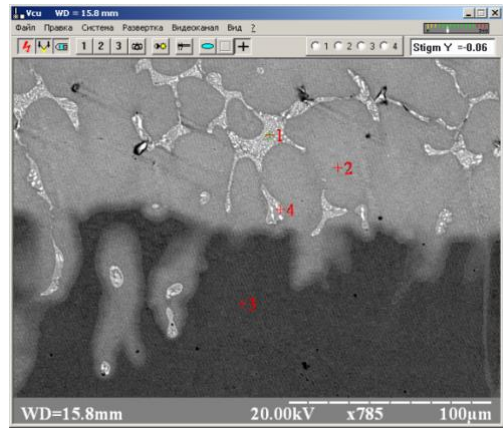
б



в



Г



Д

Рис. 4.2.13. 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)

Наведене свідчить, що виступи на функціональній складовій практично повністю розплавившись, 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 97-98%.

На фотографіях мікроструктур чітко виділяються два основні шари біметалу. У верхній частині зразка розташований шар, мікроструктура якого практично не проявляється при травленні стандартними металографічними реактивами, що є характерною ознакою нікелевого сплаву. З даним шаром безпосередньо межує ферито-перлітна структура вуглецевої сталі Ст.3 (Рис. 4.2.13., б–г), яка чітко проявляється після травлення та відповідає типовій структурі низьковуглецевої конструкційної сталі.

При збільшенні на межі зі сталлю Ст.3, а також локально в прилеглих ділянках перехідної зони, спостерігаються скупчення зерен світлого (білого) кольору різних розмірів, які погано піддаються травленню (Рис. 4.2.13., д). Згідно

з результатами локального хімічного аналізу (Табл. 4.2.3), ці ділянки характеризуються підвищеним вмістом Cr, Ni та W, що свідчить про їх належність до високолегованих фаз або інтерметалідних утворень.

Особливий інтерес представляють мікроструктури зон сплавлення, отримані при різних величинах збільшення (рис. 12, б–д), де простежується поступова зміна морфології та контрасту фаз. У світлих зонах структури чітко виділяються ділянки білого кольору, для яких характерна підвищена концентрація Ni та W (табл. 4.2.3). Наявність таких ділянок свідчить про локальну хімічну неоднорідність перехідного шару, зумовлену інтенсивним перемішуванням розплаву та дифузійними процесами під час комбінованого лазерно-ливарного процесу.

Аналіз мікроструктури (Рис. 4.2.14) та розподілу хімічних елементів (Рис. 4.2.15) у перехідній зоні біметалу «ХН60ВТ – сталь Ст3» з макрорельєфом 1,5x0,5 мм свідчить про формування розширеного дифузійного шару протяжністю близько 220 мкм (від 90 до 310 мкм), що характеризується значною неоднорідністю складу через активне гідродинамічне перемішування розплавів. Згідно з даними мікрорентгеноспектрального аналізу (Табл. 4.2.3), у зоні сплавлення спостерігається чергування ділянок з різним ступенем легування: від зон, збагачених нікелем (до 60,64% Ni у точці 2), до локальних скупчень вольфраму (до 42,99% W у точці 4), що корелює з осцилюючим характером концентраційних кривих на графіку. Така флуктуація хімічного складу в межах перехідного шару 1–3 свідчить про складний механізм масопереносу на межі розділу, де інтенсивне розчинення залізної основи (вміст Fe у перехідних шарах коливається в межах 7,35–11,01%) сприяє створенню розвиненого металургійного зчеплення між функціональним нікелевим сплавом та конструкційною сталлю.

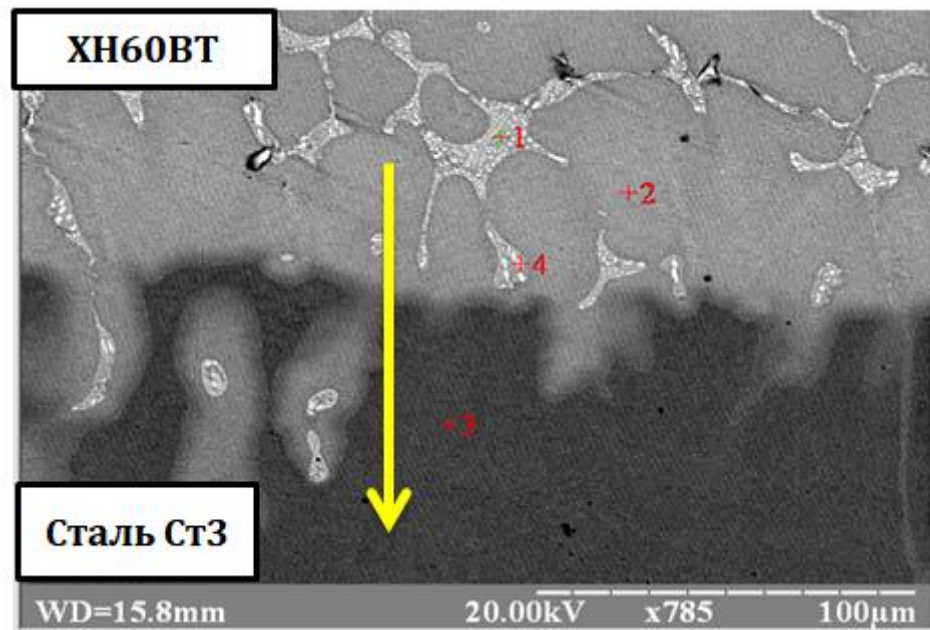


Рис. 4.2.14. Мікрофотографії перехідної зони зразка $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм біметалу ХН60ВТ – Ст.3, зі збільшенням $\times 785$

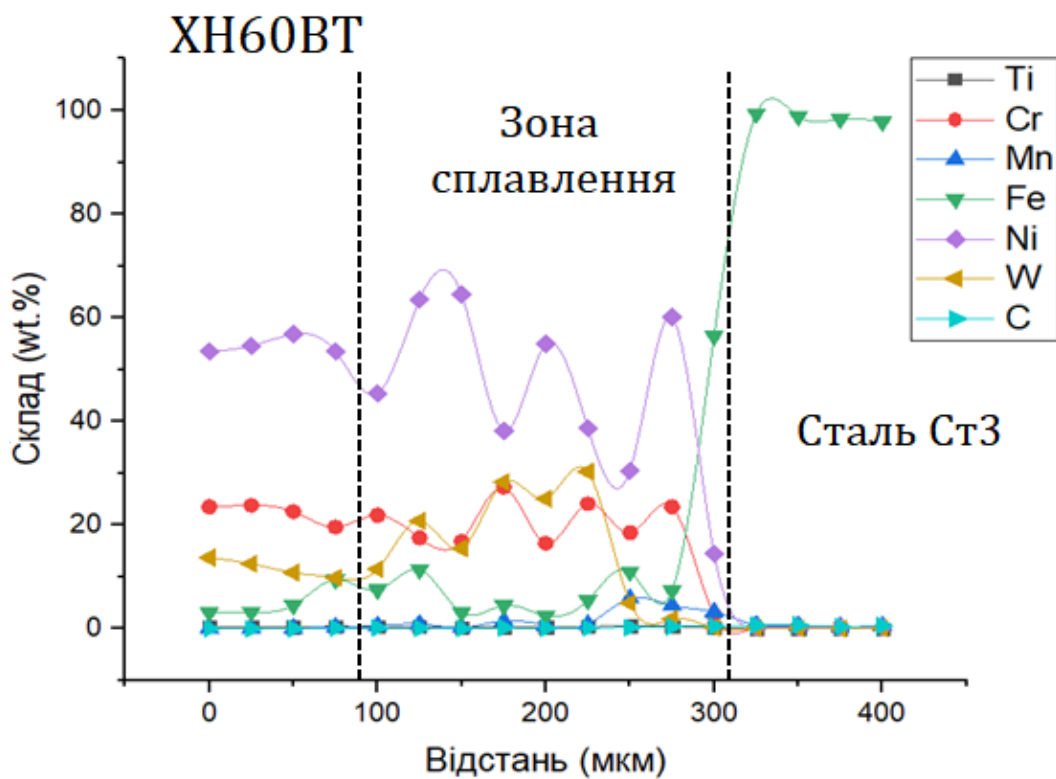


Рис. 4.2.15. Зміна хімічного складу в перехідному шарі біметалу «ХН60ВТ - сталь Ст.3» з макрорельєфом $(1,5 \times 0,5)$ мм на поверхні функціональної складової сплаву

Таблиця 4.2.3

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

Формування зазначених світлих фаз у перехідній зоні сприяє градієнтному розподілу легуючих елементів між нікелевим сплавом і сталлю Ст.3, що, в свою чергу, забезпечує металургійне з'єднання шарів та зменшення різких структурних і властивісних переходів у зоні контакту.

Локальний хімічний аналіз підтвердив формування багатокомпонентного перехідного шару між сталлю Ст.3 та наплавленим високолегованим шаром, що забезпечує надійне металургійне з'єднання складових біметалу. Сталь Ст.3 характеризується залізною основою з мінімальним вмістом легувальних елементів, що відповідає її типовому хімічному складу.

Перехідна зона відзначається поступовою зміною хімічного складу — від Ni- та Cr-збагачених ділянок з переважно аустенітним характером структури до областей з підвищеним вмістом W. Такий розподіл елементів свідчить про інтенсивні дифузійні процеси в зоні сплавлення, що сприяють зниженню градієнта фізико-механічних властивостей між шарами. Формування найбільш легованої частини перехідного шару створює передумови для утворення карбідів або інтерметалідних фаз, які забезпечують підвищення жаро- та зносостійкості зони з'єднання.

На Рис. 4.2.16. наведено дифрактограму, яка, як і у попередньому випадку, знята з ділянки зразка, розташованої по центру зони з'єднання нікелевого сплаву зі сталлю Ст.3 з макрорельєфом 1,5х0,5.

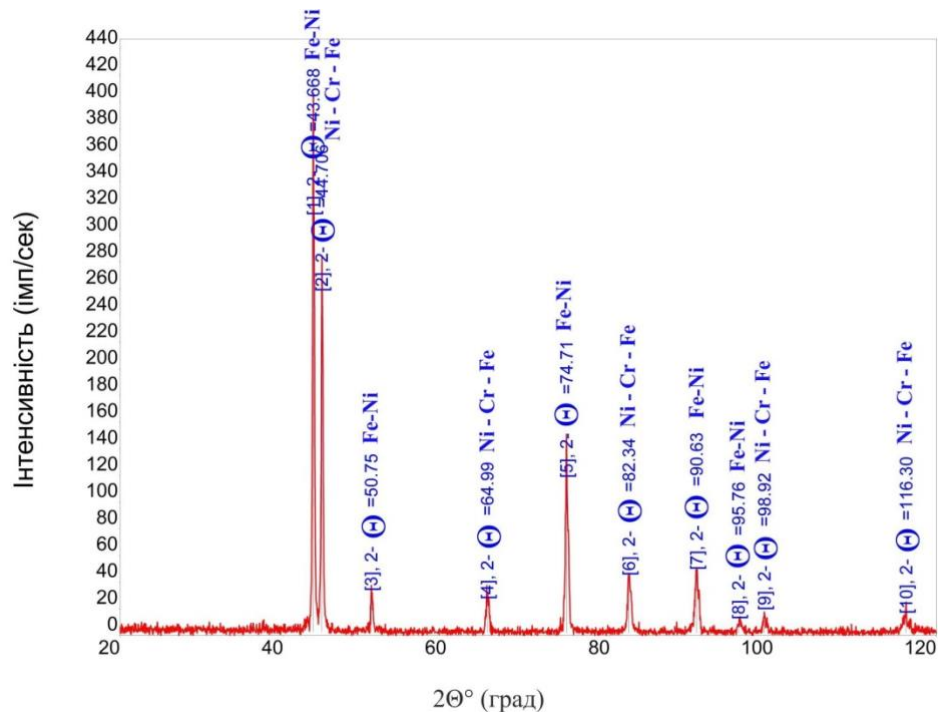


Рис. 4.2.16. Дифрактограма перехідного шару біметалу «нікелевий сплав - сталь Ст.3» з макрорельєфом (1,5х0,5) мм на поверхні функціональної складової сплаву

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, визначався розподіл мікротвердості в напрямку перпендикулярному зоні з'єднання від поверхні до вуглецевої сталі при навантаженні 50г. На Рис. 4.2.17. представлені результати вимірювання мікротвердості, значення якої достатньо плавно зменшуються від 5-7 ГПа в нікелевому сплаві до 4-5 в зоні сплавлення і 3-4 ГПа у вуглецевій сталі.

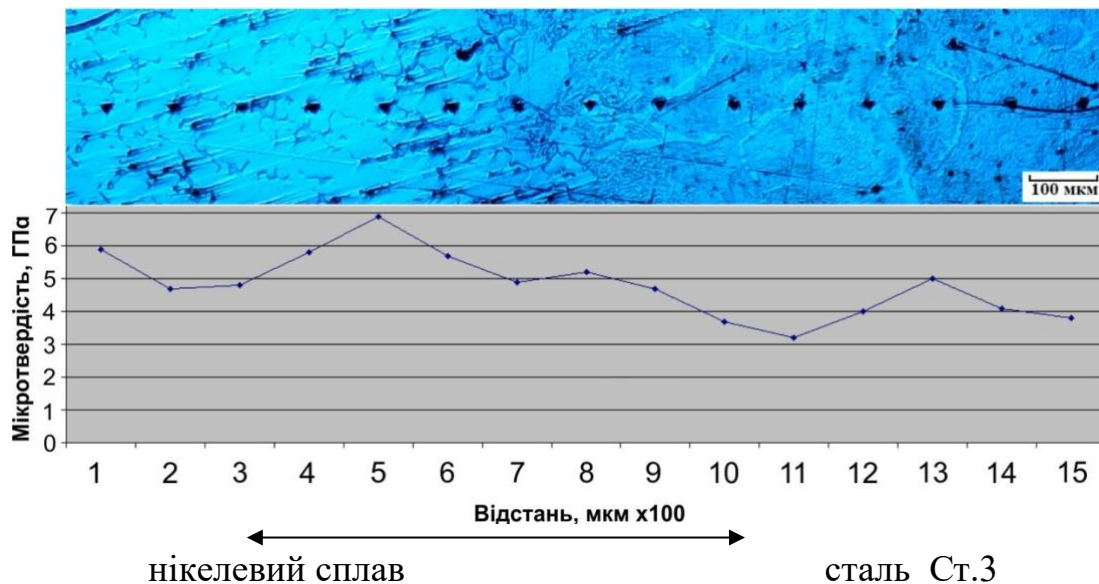


Рис. 4.2.17. Розподіл мікротвердості поперек зони сплавлення нікелевого сплаву и вуглецевої сталі Ст.3.

4.3. Фізико-механічні характеристики перехідного шару отриманих біметалів

Для встановлення оптимальної геометрії стикової поверхні досліджено три варіанти хвилястого макрорельєфу: $1,5 \times 0,5h$, $1,5 \times 1,0h$ та $1,5 \times 1,5h$. Параметр h_a — відносна висота макрорельєфу при фіксованому кроці 1,5 мм. Усі зразки досліджено методом статичного scratch-індентування на приладі Micron-Gamma (індентор Берковича, $P = 50$ г): отримано склерограми, профільні криві відновленого профілю та криві сили дряпання.

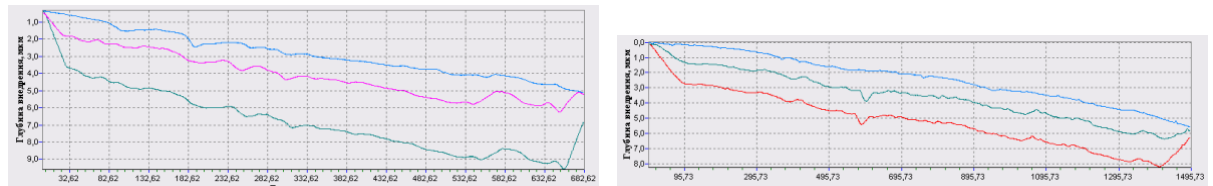


Рис. 4.3.1. Склорограми: а) 1,5×0,5h; б) 1,5×1,0h. Синя/ціанова — Ст3/ХН60ВТ; червона — перехідний шар

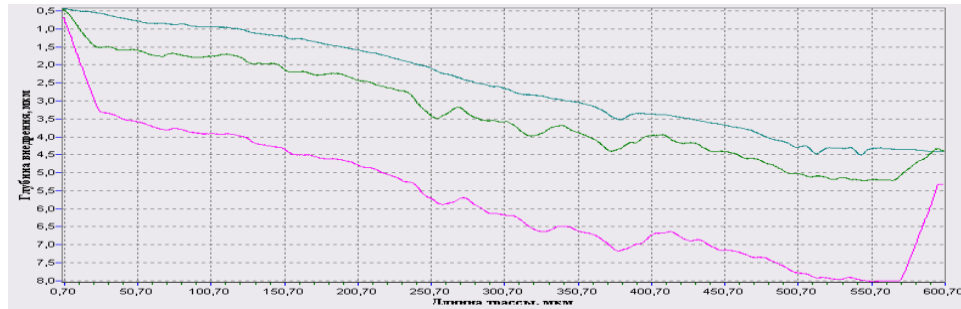


Рис. 4.3 Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів

.2. Склорограма 1,5×1,5h: синьо-зелена — Ст3; зелена — ХН60ВТ; рожева — перехідний шар

Таблиця 4.3.1

Зведені фізико-механічні характеристики перехідного шару трьох варіантів макрорельєфу

Параметр	1,5×0,5h	1,5×1,0h	1,5×1,5h
h _a _сер Ст3, мкм	2,88±1,11	2,06±1,33	2,33±1,12
CV Ст3, %	38,6	64,6	47,9
h _a _сер ХН60ВТ, мкм	3,95±1,21	3,08±1,38	3,33±1,32
CV ХН60ВТ, %	30,6	44,6	39,5
h _a _сер перехідний, мкм	6,22±1,57	4,51±1,58	5,46±1,32
CV перехідний, %	25,3	35,0	24,1
Відн. твердість перехідного (до Ст3)	0,214	0,209	0,182
h _a _залиш (відн.профіль), мкм	1,146±0,241	1,059±0,291	0,897±0,143
Пружне відновлення, %	64,4	65,6	71,5
Пластична деформація, %	35,6	34,4	28,6
μ (коеф. тертя)	0,201	—	0,200–0,203
CV сили тертя, %	16,0	—	3,1–9,1

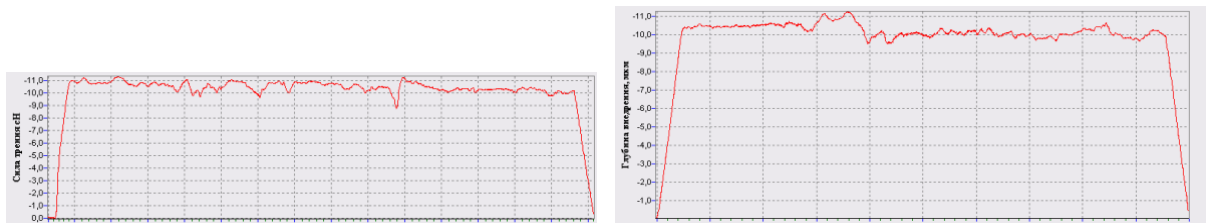


Рис. 4.3.3. Сила дряпання: а) зразок $1,5 \times 0,5h$ ($\mu=0,201$, $CV=16\%$); б) зразок $1,5 \times 1,5h$ ($\mu=0,203$, $CV=3,1\%$)

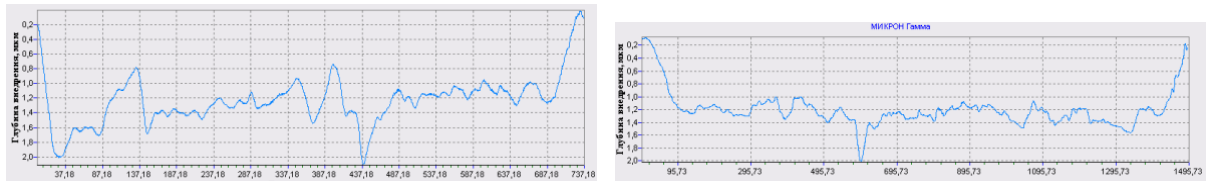


Рис. 4.3.4. Відновлені профілі: а) $1,5 \times 0,5h$ ($h_{\text{залиш}}=1,146$ мкм, $ER=64,4\%$); б) $1,5 \times 1,0h$ ($h_{\text{залиш}}=1,059$ мкм, $ER=65,6\%$)



Рис. 4.3.5. Відновлений профіль зразка $1,5 \times 1,5h$ ($h_{\text{залиш}}=0,897$ мкм, $ER=71,5\%$)

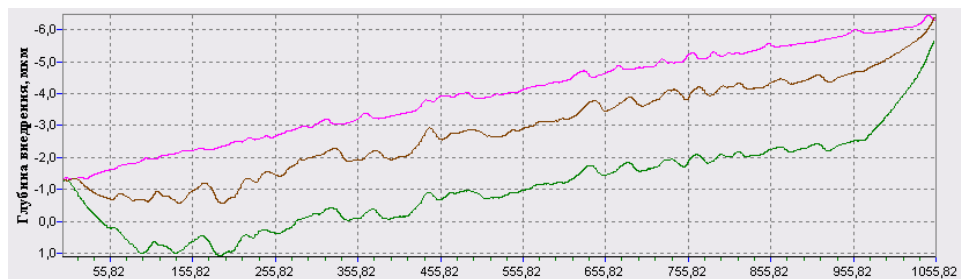


Рис. 4.3.6. Малоциклове дряпання зразка $1,5 \times 0,5h$: рожева — 1-й; коричнева — 2-й; зелена — 3-й прохід

Таблиця 4.3.2

Параметри малоциклового дряпання зразка $1,5 \times 0,5h$ ($P = 50$ г, 3 проходи)

Прохід	$h_{a_сер}$, мкм	CV , %	Приріст до 1-го
1-й прохід (рожева)	1,278	90,1	1,00×
2-й прохід (коричнева)	2,302	50,0	1,80×
3-й прохід (зелена)	4,010	24,0	3,14× (+214%)

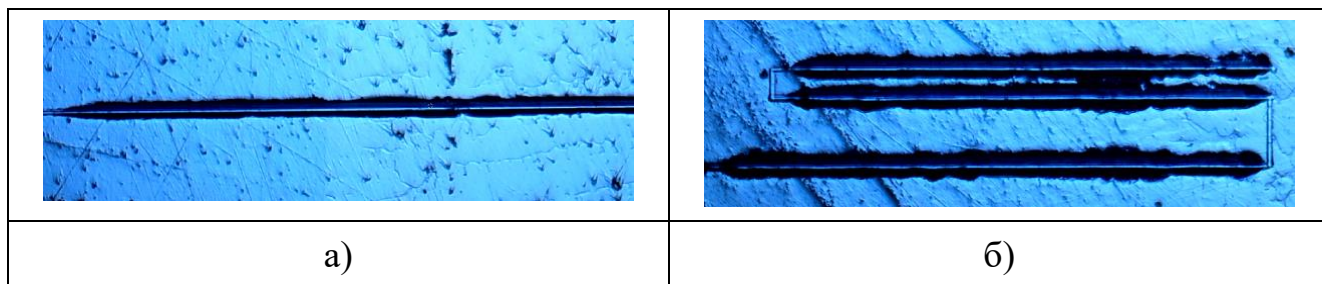


Рис. 4.3.7. Мікрофотографії слідів подряпин: а) $1,5 \times 0,5h$ (нерівний край, ознаки деламінації); б) $1,5 \times 1,0h$ (рівномірний слід)

На Рис. 4.3.7. а) зображено один слід подряпини з рівномірною шириною уздовж більшої частини траси. Ліворуч чітко ідентифікується зона стику між шарами біметалу у вигляді зміни текстури поверхні. На рис. 4.3.7. б) показано два паралельних сліди (повторне сканування по суміжних трасах): рівна ширина обох слідів підтверджує однорідність навантаження та стабільність роботи індентора.

Ширина слідів є якісною характеристикою твердості: більша ширина відповідає меншій твердості. Візуальний аналіз мікрофотографій показує, що ширина сліду в зоні ХН60ВТ (лівіше від стику) дещо більша, ніж у зоні Ст3 (правіше), що відповідає отриманим кількісним даним склерограми ($h_{\text{ХН60ВТ}} > h_{\text{Ст3}}$).

Твердість перехідного шару. Середня глибина впровадження h_a у перехідному шарі залежить від амплітуди рельєфу нелінійно: найнижча (найтвердіший шар) при $1,5 \times 1,0h$ ($h = 4,51$ мкм), проміжна при $1,5 \times 1,5h$ ($h = 5,46$ мкм) і найвища при $1,5 \times 0,5h$ ($h = 6,22$ мкм). Перехід $0,5h \rightarrow 1,0h$ підвищує ефективну твердість перехідного шару на 27%. Водночас відносна твердість (нормалізована до Ст3 через $1/h_a^2$) практично однакова для всіх варіантів: 0,182–0,214 — що підтверджує незмінність фундаментального механізму формування зони термічного впливу.

Однорідність структури. CV перехідного шару: $1,5 \times 0,5h = 25,3\%$, $1,5 \times 1,0h = 35,0\%$, $1,5 \times 1,5h = 24,1\%$. Проміжна амплітуда ($1,0h$) дає найвищу неоднорідність

— ймовірно, через перехідний режим кристалізації, де взаємодія геометрії рельєфу і теплових потоків формує неоднорідну мікроструктуру. Найбільш однорідні перехідні шари — при граничних значеннях амплітуди ($0,5h$ та $1,5h$).

Пружне відновлення закономірно зростає зі збільшенням амплітуди: $64,4\% \rightarrow 65,6\% \rightarrow 71,5\%$. Зразок $1,5 \times 1,5h$ демонструє значно вищу пружну складову, що є перевагою для виробів, які працюють в умовах циклічного навантаження. Більш розвинена стикова поверхня забезпечує краще механічне зчеплення шарів і вищу пружну реакцію зони з'єднання.

Коефіцієнт тертя $\mu \approx 0,20$ однаковий для всіх варіантів та не залежить від геометрії макрорельєфу — що підтверджує домінуючу роль хімічного складу пари ХН60ВТ–Ст3. Натомість CV сили тертя суттєво різняться: зразок $1,5 \times 0,5h$ ($CV = 16\%$) значно нестабільніший за $1,5 \times 1,5h$ ($CV = 3\text{--}9\%$). Більша амплітуда рельєфу забезпечує стабільніший трибологічний контакт.

Малоциклова стійкість (зразок $1,5 \times 0,5h$). За 3 проходи глибина дряпання зросла у 3,14 рази (з 1,28 до 4,01 мкм, приріст 214%). Зниження CV від 90% (1-й прохід) до 24% (3-й) свідчить про пластичну консолідацію поверхні. Отримані дані є кількісною мірою швидкості накопичення втомних пошкоджень і можуть використовуватись для порівняльної оцінки ресурсу біметалевих з'єднань.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. На основі пошукових експериментальних досліджень встановлено, що варіація схем проходів лазерного маніпулятора при нанесенні макрорельєфу безпосередньо впливає на конфігурацію поверхні контакту. Визначено оптимальну стратегію сканування, яка дозволяє формувати регулярну фактуру з чітко заданими параметрами кроку (b) та висоти (h), що є ключовим фактором для стабілізації металургійного зв'язку під час подальшої заливки сталі.
2. Встановлено, що морфологія та ширина перехідної зони суттєво залежать від геометричних параметрів регулярного макрорельєфу. Для зразків з параметрами $b \times h = (2,0 \times 1,5)$ мм характерна нерівномірна границя з'єднання з локальними зонами неповного сплавлення та порами. Зменшення висоти виступів до $h = 0,5 \dots 1,0$ мм сприяє формуванню рівномірної хвилястої зони сплавлення з повним охопленням мікро- та макронерівностей розплавом конструктивної складової.
3. Визначено, що ширина перехідної зони (зони сплавлення) корелює з висотою макрорельєфу: для параметрів $(2,0 \times 1,5)$ мм вона становить близько 90–110 мкм, тоді як для рельєфу $(1,5 \times 0,5)$ мм спостерігається інтенсифікація дифузійних процесів, що призводить до розширення цієї зони до 220 мкм (у діапазоні від 90 до 310 мкм відносно поверхні).
4. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено градієнтну зміну хімічного складу. У зразку з макрорельєфом $(2,0 \times 1,5)$ мм перехід концентрацій елементів (Ni, Cr, W) до сталевих основи є більш різким. Натомість для макрорельєфу $(1,5 \times 0,5)$ мм зафіксовано осцилюючий характер кривих розподілу елементів, що свідчить про активне гідродинамічне перемішування. Зокрема, виявлено локальні ділянки зі значним легуванням (до 60,6% Ni) та зони скупчення вольфраму (до 42,99% W), що підтверджує формування неоднорідних за складом, але суцільних перехідних шарів.
5. Мікроструктурні дослідження показали, що перехідна зона має дифузійно-змішаний характер. Вона представлена твердим розчином Ni-Cr-Fe (86–89%)

та фазою $\text{Fe}_{0.507}\text{Ni}_{0.493}$ (тетратаєніт) у кількості 10–14%. При зменшенні параметрів макрорельєфу зростає однорідність фазового складу та спостерігається подрібнення зерна в зоні термічного впливу.

6. Вимірювання мікротвердості підтверджують структурно-фазові зміни: спостерігається плавне підвищення значень від 4,5–5 ГПа у нікелевому сплаві ХН60ВТ до пікових 6,8–7 ГПа безпосередньо в перехідній зоні, з подальшим поступовим зниженням до 3 ГПа, що відповідає вихідному стану сталі Ст3. Такий розподіл мікротвердості свідчить про відсутність різких механічних контрастів і високу якість металургійного зв'язку.
7. На основі аналізу якості зони сплавлення (відсутність тріщин, пор та порожнин, комплексного аналізу структурних, фазових характеристик) визначено, що оптимальна висота виступів макрорельєфу становить 0,5–1,0 мм. Це забезпечує компроміс між продуктивністю лазерного формування фактури та міцністю зчеплення шарів біметалу.
8. Отримані результати доводять, що керування параметрами регулярного макрорельєфу, сформованого за обраною оптимальною схемою лазерного сканування, є ефективним інструментом цілеспрямованого формування структури та властивостей перехідної зони біметалів.

РОЗДІЛ 5

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ У ПРОМИСЛОВOSTІ

5.1 Технологічне забезпечення процесу

Для реалізації комбінованого лазерно-ливарного процесу розроблено та модернізовано комплекс технологічного обладнання, що базується на інтеграції лазерних і ливарних систем в єдину керовану виробничу платформу.

Основним елементом комплексу є технологічна лазерна установка типу Aramis LTC75 або LTS500 з волоконним джерелом випромінювання, інтегрована з індукційною тигельною електропечю типу ІЧТ-006. Така компоновка забезпечує можливість синхронного керування процесами формування макрорельєфу та подачі розплаву.

Система керування побудована на базі координатного столу портального типу з числовим програмним керуванням та спеціалізованим програмним забезпеченням «Metallix-2013 IT-A», що забезпечує точність позиціонування до $\pm 0,01$ мм.

Новим технічним рішенням є розробка автоматизованого пристрою з ємнісним датчиком, який у режимі реального часу контролює відстань між фронтом розплаву та локальною лазерною ванною. Отримані сигнали передаються до системи керування, яка коригує швидкість переміщення заготовки або лазерного модуля, забезпечуючи стабільність формування перехідної зони.

Установка призначена для виготовлення:

- біметалевих листів шириною до 1 м і більше;
- силових перехідників несучих рам автобусів (автомобільна промисловість);
- корпусів каталізаторів (автомобільна промисловість);
- деталей вентиляційних систем;
- елементів нафтохімічного обладнання.

Розроблений комплекс може бути використаний у навчальному процесі Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» для підготовки магістрів і аспірантів за спеціальністю «Матеріалознавство».

Практичні рекомендації щодо інструментарію та обладнання

Для впровадження методу на підприємствах різного масштабу (від експериментальних цехів до великих заводів) сформульовано наступні рекомендації:

Типи обладнання: Для масового виробництва доцільно впроваджувати автоматизовані конвеєрні лінії, що включають вузли розмотування рулонів, лазерні модулі для макрорельєфу та індуктори попереднього нагріву.

Оптимізація сканування: Для підвищення продуктивності рекомендується заміна однопучкової обробки на схеми сканування двома лазерними пучками, що рухаються реверсивно, або застосування оптичних систем з розподілом інтенсивності типу «Тор-Нат» для рівномірного прогріву.

Використання двох незалежних або синхронізованих лазерних головок на порталі ЧПК (як показано на Рис. 5.1.1) вирішує головну проблему лазерного нанесення — низьку швидкість обробки великих площ.

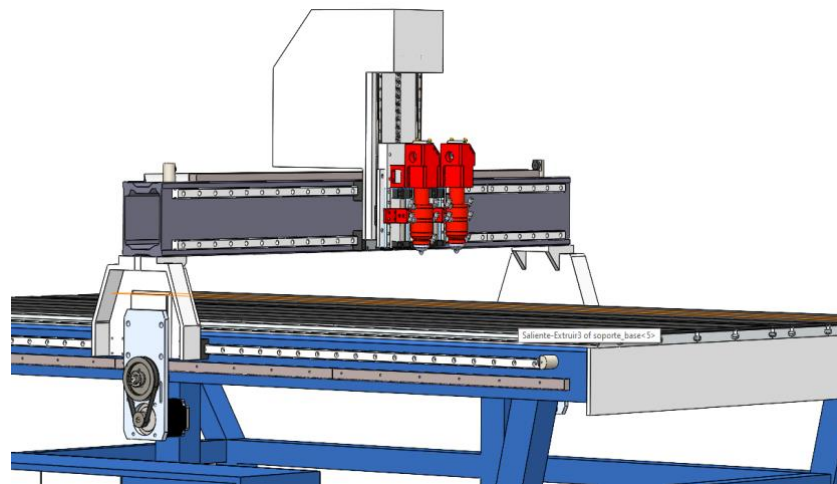


Рис. 5.1.1. Спроектований верстат з ЧПК для нанесення макрорельєфу на поверхню функціональної складової

Геометрія зчеплення: Для досягнення суцільності з'єднання на рівні 97–98% встановлено оптимальні параметри макрорельєфу: висота виступів 0,5–1,0 мм, крок — 1,5 мм.

Захисне середовище: Обов'язковим є використання інертного газу (аргону або азоту) через коаксіальні сопла під тиском 2–3 атм для запобігання окисленню зони нанесення макрорельєфу.

Спроековано та запропоновано конструкцію автоматизованого пристрою для реалізації ливарного процесу, що включає стіл з ЧПК та встановлену фурму для контрольованого заливання рідкого конструкційного металу по площині листа з блоком керування, датчиками та приводами для прецизійного переміщення інструментів.(Рис. 5.1.2.)

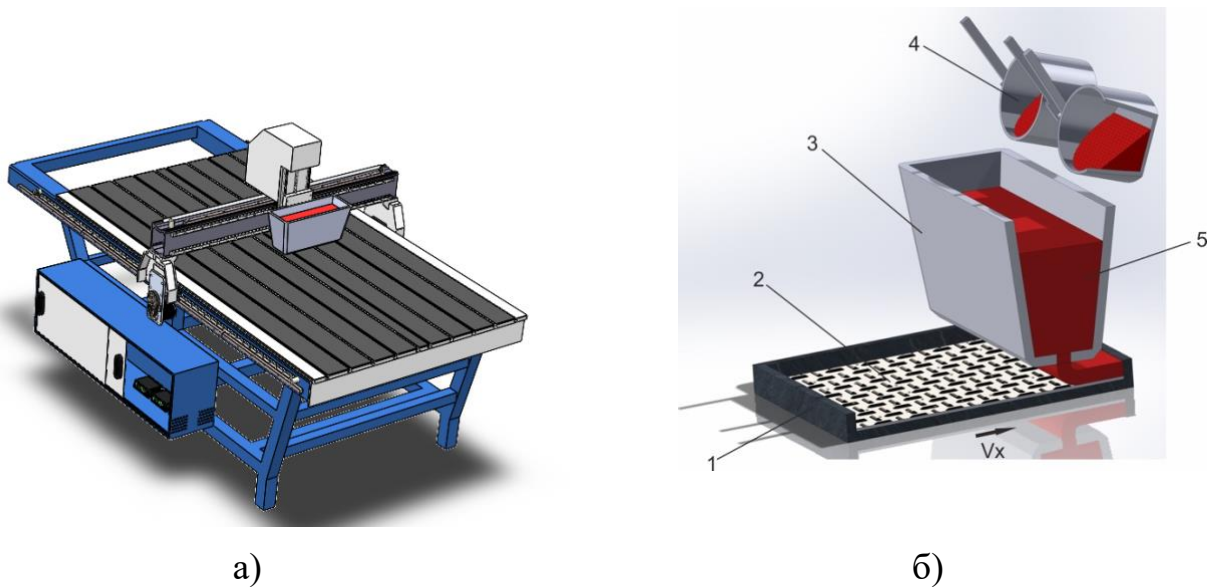


Рис.5.1.2. Комбінована установка з ливарним модулем (а) та схема формування біметалічного з'єднання (б): 1 — функціональний компонент; 2 — лазерний макрорельєф; 3 — щілинна фурма; 4 — подача розплаву з індукційної печі; 5 — конструкційний метал. Стрілкою V_x позначено вектор контрольованого руху заливки.

Структурно-логічна модель та фізико-хімічні основи впровадження комбінованої лазерно-ливарної технології виготовлення біметалевих композитів

Комбінований лазерно-ливарний процес базується на синергії концентрованих потоків енергії та традиційної теплофізики ливарного виробництва. Основна концепція методу полягає у попередній лазерній підготовці поверхні твердої заготовки (функціонального компонента) з подальшим заливанням розплаву конструкційного металу. Такий підхід дозволяє нівелювати основні недоліки традиційного лиття біметалів, такі як недостатня адгезія та наявність дефектів у зоні з'єднання, шляхом створення регулярного макрорельєфу, який виконує роль як механічного замка, так і інтенсифікатора дифузійних процесів.

Логіка впровадження технології структурується за п'ятьма критичними етапами, кожен з яких охоплює специфічний набір фізичних явищ: від квантово-оптичної взаємодії лазерного випромінювання з металом до масопереносу в рідкій фазі та твердофазної дифузії. Реалізація цієї моделі дозволяє отримувати металургійний зв'язок, міцність якого наближається до міцності основних матеріалів, при одночасному зниженні витрат на дорогі нікелеві сплави на 60–80%.

Етап 1. Аналіз та підготовка вхідних даних

Проводиться оцінка металургійної сумісності пари «конструкційна основа — функціональний шар». Для сталі Ст3 та сплаву ХН60ВТ (UNS 6230) ключовим є врахування різниці температур плавлення та коефіцієнтів термічного розширення для запобігання тріщиноутворенню.

Етап 2. Параметризація лазерної підготовки поверхні

Формування регулярного макрорельєфу на нікелевій підкладці для інтенсифікації дифузії та механічної адгезії.

Режими лазера: Потужність 400–500 Вт, швидкість сканування 1–2 м/хв.

Середовище: Тиск допоміжного газу 2–3 атм для видалення розплаву з каверн.

Геометрія рельєфу: Виступи 1×1 мм, висота h , $rel=0.5$ мм, крок 1.5 мм.

Етап 3. Гідродинамічний розрахунок подачі розплаву

Визначення параметрів заливки рідкої сталі Ст3 на підготовлену поверхню для повного змочування рельєфу без утворення газових пор.

Напірний стовп: Розрахункова висота $h=7.6$ мм (для шару товщиною 2 мм при швидкості 1 м/хв).

Швидкість потоку: Обчислюється за формулою $v = \mu\sqrt{2gh}$, що забезпечує ламінарний режим заповнення.

Етап 4. Налаштування термічного циклу

Створення температурних умов для активації вакансійного механізму дифузії.

Температура заливки: 1550–1600 °С (перегрів вище ліквідусу для подолання тепловідводу).

Попередній перегрів: Індукційне нагрівання основи до 300–700 °С для зниження термічного градієнта та релаксації напружень під час кристалізації.

Етап 5. Оптимізація та фінішна стабілізація

Контроль якості інтерфейсу та зняття залишкових напружень.

Параметри зони з'єднання: Товщина перехідної дифузійної зони 80–170 мкм.

Термообробка: Відпал при 550 °С (експозиція 30 хв) для зниження рівня напружень з 230 МПа до значень основного металу.

Таблиця 5.1.1

Параметри технологічного циклу виготовлення біметалевих зразків з заданим макрорельєфом

Технологічний етап	Ключовий параметр	Діапазон / значення	Цільовий показник
Лазерна обробка	Потужність лазерного випромінювання	400–500 Вт	Формування регулярного рельєфу висотою $\approx 0,5$ мм
Подача розплаву	Напірний стовп	7,6 мм	Забезпечення суцільності шару товщиною ≈ 2 мм
Теплова активація	Температура перегріву	300–700 °С	Глибина дифузійного шару > 80 мкм
Стабілізація структури	Температура відпалу	550 °С	Зниження залишкових напружень з 230 до 60 МПа

Впровадження даної моделі дозволяє отримати біметалевий композит з високою металургійною міцністю та зниженою на 60–80% собівартістю порівняно з монолітними виробами з нікелевих сплавів.

Розроблена технологія орієнтована на виготовлення критично важливих вузлів, які працюють в умовах інтенсивного зносу та корозії. Основні напрямки впровадження включають:

Нафтохімія: Корпуси та запірна арматура реакторів піролізу, де внутрішня поверхня має витримувати агресивні сірчисті сполуки при температурах до 900 °С.

Важке машинобудування: Робочі органи дробарок, футерувальні плити млинів та молоти, де поєднання твердого робочого шару та в'язкої основи критично для запобігання крихкому руйнуванню.

Харчова та скляна промисловість: Форми для відливання скла та матриці для екструзії харчових мас, що вимагають високої чистоти поверхні та термостійкості.

Результати впровадження підтверджують, що біметалеві вироби, отримані за цим алгоритмом, мають термін служби у 2.5–4 рази довший, ніж аналогічні деталі зі сталі 45 або чавуну з наплавленням, при цьому їх вартість залишається конкурентоспроможною завдяки економії нікелю.

Структурно-логічна модель комбінованого процесу відкриває шлях до створення нового класу інтелектуальних матеріалів з градієнтною структурою. Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на використання багатокомпонентних високоентропійних сплавів як функціональних шарів, що дозволить ще більше розширити температурний діапазон роботи виробів.

5.2. Технологічна лінія комбінованого лазерно-ливарного виробництва біметалів

Технологічна лінія призначена для безперервного виготовлення біметалевих листів у рулонному виконанні методом комбінованого лазерно-ливарного формування з попередньою модифікацією поверхні основи. Комплекс

побудований за модульним принципом і забезпечує повну синхронізацію швидкості переміщення стрічки, температурних режимів, параметрів лазерної обробки та лиття.

Процес починається із вузла розмотування рулону конструкційної сталі, який забезпечує стабілізовану подачу металевої стрічки з автоматичним контролем натягу. Далі стрічка надходить у правильну машину, де усуваються залишкові напруження, викривлення та хвилястість, що забезпечує геометричну стабільність заготовки перед наступними операціями.

Після виправлення матеріал проходить через модуль очищення поверхні, де здійснюється механічна або абразивна обробка для видалення оксидів, забруднень і технологічних плівок. На наступному етапі виконується формування крайових зон листа з метою забезпечення стабільності геометрії та рівномірності розподілу розплаву під час лиття.

Підготовлена стрічка надходить у лазерний комплекс, у якому формується регулярний макрорельєф на поверхні основи. Геометричні параметри рельєфу (крок, глибина, профіль) задаються відповідно до вимог до міцності з'єднання шарів біметалу. Лазерне структурування сприяє підвищенню площі контакту, формуванню механічного зачеплення та інтенсифікації металургійної взаємодії між компонентами.

Після лазерної обробки стрічка проходить через індукційний модуль переднагріву, який забезпечує доведення температури основи до оптимального рівня для покращення змочування розплавом та мінімізації термічних градієнтів у зоні з'єднання.

У зоні лиття з фурми здійснюється подача розплавленого функціонального металу з формуванням другого шару біметалу. Технологічні параметри (температура розплаву, швидкість подачі, товщина шару) регулюються в автоматичному режимі відповідно до заданих характеристик виробу.

Сформований біметал надходить у зону контрольованого охолодження, яка включає аерозольне розпилення води та інтенсивну повітряну продувку.

Керований режим охолодження забезпечує стабілізацію структури, зменшення внутрішніх напружень та формування заданих механічних властивостей.

Після охолодження виконується шліфування поверхні для досягнення необхідної шорсткості та усунення локальних дефектів. За потреби матеріал проходить через протяжний (калібрувальний) модуль, що дозволяє здійснити точне регулювання товщини у бік зменшення та забезпечити відповідність допускам.

Завершальним етапом є намотування готового біметалевого листа у бухту з автоматичним контролем натягу та геометрії рулону. Отримана продукція готова до транспортування або подальшої механічної обробки.

Запропонована технологічна лінія забезпечує безперервність процесу, високу відтворюваність параметрів з'єднання шарів та можливість адаптивного керування властивостями біметалу залежно від експлуатаційних вимог.

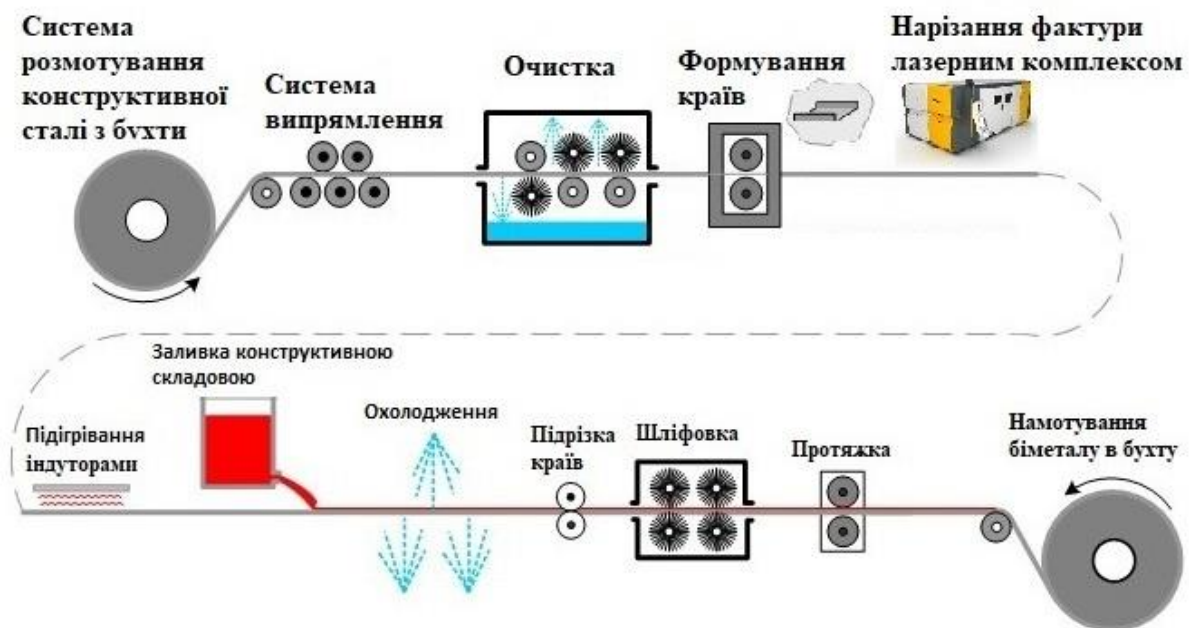


Рис.5.2.1. Схема технологічної лінії комбінованого лазерно-ливарного виробництва біметалів

5.3. Виготовлення біметалевих листових композицій з використанням лазерного нагрівання та прокатування

Запропонований спосіб виготовлення біметалевих листових композицій базується на поєднанні локального лазерного нагрівання контактуючих

поверхонь компонентів із подальшою спільною пластичною деформацією в осередку прокатування. Процес реалізує комбінований механізм формування з'єднання, який включає елементи зварювання плавленням і зварювання тиском.

Принципова особливість способу полягає у формуванні по всій довжині контакту компонентів лінійної зони концентрованого теплового впливу. Лазерне випромінювання розгортається в лінію та фокусується безпосередньо в площині стику двох листів. У поверхневих шарах матеріалів формується локальна ванна розплаву, глибина якої не перевищує 0,4 товщини кожного з компонентів. Така глибина проплавлення забезпечує:

- формування спільної металургійної зони без надмірного перегріву;
- мінімізацію теплового впливу на основний об'єм матеріалу;
- збереження механічних властивостей основи та плакувального шару.

Подальше проходження нагрітих компонентів через прокатні валки створює інтенсивний тиск у зоні деформації, що сприяє витісненню оксидних плівок і газових включень із зони контакту, а також перемішуванню розплавлених приповерхневих шарів і формуванню щільного металургійного зв'язку.

Важливою технологічною особливістю є керований розподіл інтенсивності лазерного випромінювання в поперечному перерізі лінії фокусування. У разі з'єднання матеріалів із суттєво різними температурами плавлення максимум інтенсивності зміщується у бік матеріалу з більшою температурою плавлення. Це дозволяє компенсувати різницю у теплофізичних характеристиках та забезпечити одночасне досягнення оптимального термічного стану обох компонентів.

Додатково передбачено попередній підігрів матеріалів перед входом у зону лазерного впливу, що зменшує температурні градієнти та сприяє стабілізації процесу.

Таким чином, формування з'єднання відбувається в умовах локального контрольованого плавлення при одночасній дії стискуючих напружень у зоні деформації, що забезпечує високий рівень адгезії та структурної однорідності перехідного шару.

У порівнянні з традиційними технологіями виготовлення біметалевих листів запропонований спосіб забезпечує:

- підвищення міцності з'єднання на відрив і зріз;
- зниження ймовірності відшарування при циклічних навантаженнях;
- можливість з'єднання матеріалів із суттєво різними фізико-механічними властивостями;
- відсутність трудомістких операцій механічної підготовки поверхні (формування пазів);
- зменшення втрат матеріалу;
- розширення номенклатури багатошарових композицій;
- можливість повної автоматизації процесу.

Підвищена надійність металургійного з'єднання сприяє розширенню сфер застосування біметалевих листових композицій, зокрема в умовах підвищених температур та знакозмінних навантажень. (Пат. 128468 Україна)

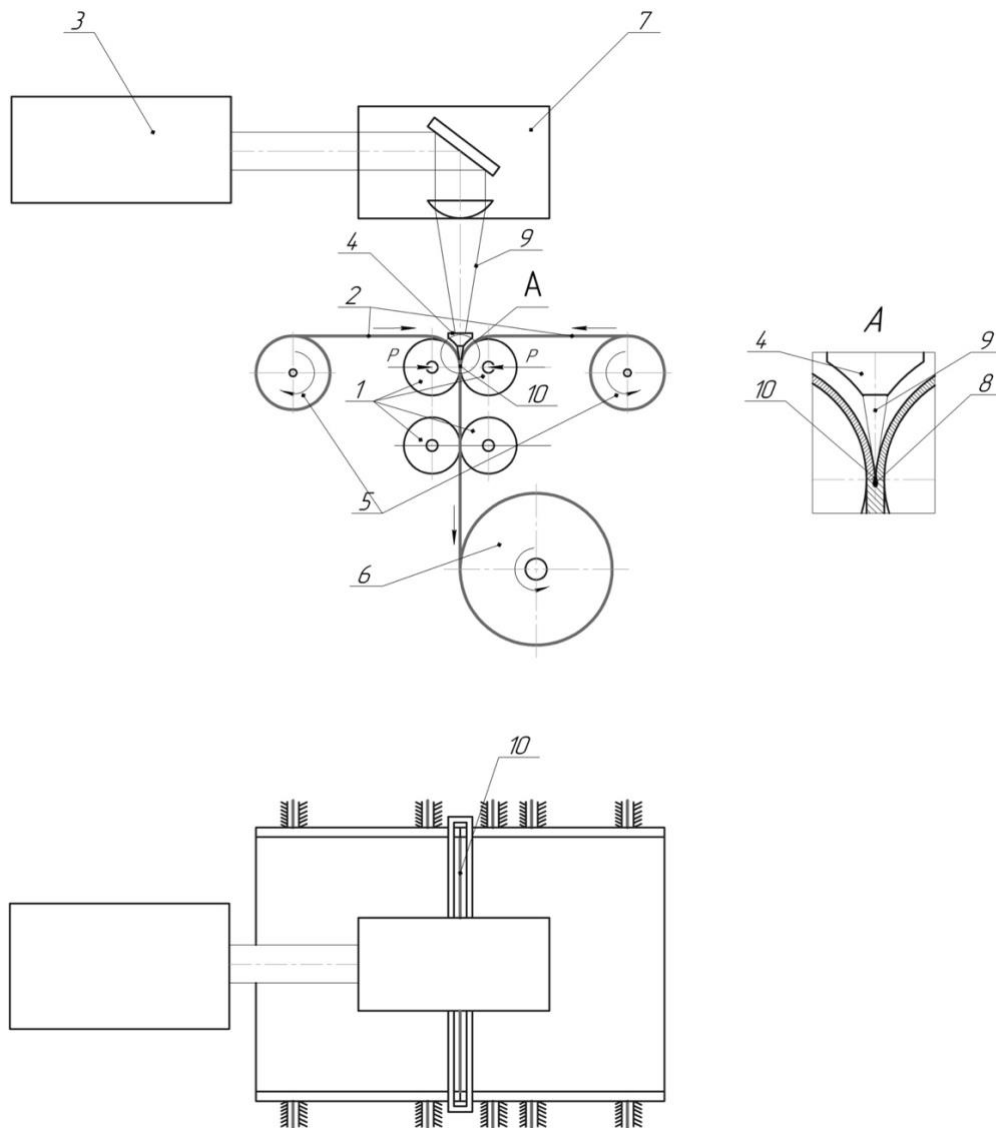


Рис. 5.3.1 Схема пристрою для виготовлення багатошарових композиційних листів:

1 — прокатні валки; 2 — компоненти листа; 3 — лазерне джерело; 4 — пристрій газового захисту; 5 — пристрій розмотування; 6 — пристрій намотування; 7 — модуль гомогенізатора; 8 — ванна розплаву; 9 — лазерний пучок; 10 — лінія стику.

5.4 Спосіб виготовлення багатошарових бронеконпозицій

Запропоновано спосіб виготовлення багатокомпонентних металевих бронеконпозицій, який базується на поєднанні попередньо сформованих функціональних металевих шарів з регулярним макрорельєфом та заливного проміжного шару. Спосіб виготовлення багатошарових бронеконпозицій передбачає попередній вибір матеріалів функціональних металевих шарів і проміжного заливного компонента з урахуванням їх механічної та термічної

сумісності. На поверхнях функціональних шарів методом лазерної обробки формується регулярний макрорельєф заданої геометрії. Після контролю якості макроструктур оброблені металеві шари встановлюються у ливарну форму макроструктурованими поверхнями один до одного з формуванням зазору. Зібрану заготовку фіксують у формі, що забезпечує стабільне взаємне позиціонування шарів. У сформований проміжок заливається третій металевий компонент у рідкому стані. Розплав заповнює елементи макрорельєфу та забезпечує формування розвиненої міжшарової зони зчеплення. У процесі кристалізації утворюється монолітна багатошарова структура з механічним та металургійним з'єднанням шарів. Регулювання умов охолодження дозволяє керувати структурою та залишковими напруженнями в перехідних зонах. Після виймання з форми проводиться мінімальна післяобробка та контроль якості готового бронелиста.

Суть розробленого способу полягає у поєднанні двох операцій: лазерного формування регулярного макрорельєфу на поверхнях функціональних металевих шарів та заливання проміжного металевого компонента у рідкому стані. Зовнішні шари (високоміцна або зносостійка сталь) виконують роль удароприймальних елементів, проміжний шар — демпфера та поглинач енергії. Після кристалізації розплаву формується монолітна тришарова конструкція з розвиненою міжшаровою зоною зчеплення. Складна геометрія міжшарової межі порушує стабільність кумулятивного струменя та забезпечує дисипацію кінетичної енергії уражаючих елементів. Геометрія макрорельєфу (форма, крок, глибина) задається програмно з точністю $\pm 0,05$ мм, що дозволяє адаптувати конструкцію під конкретний тип загрози (Рис. 5.4.1.).

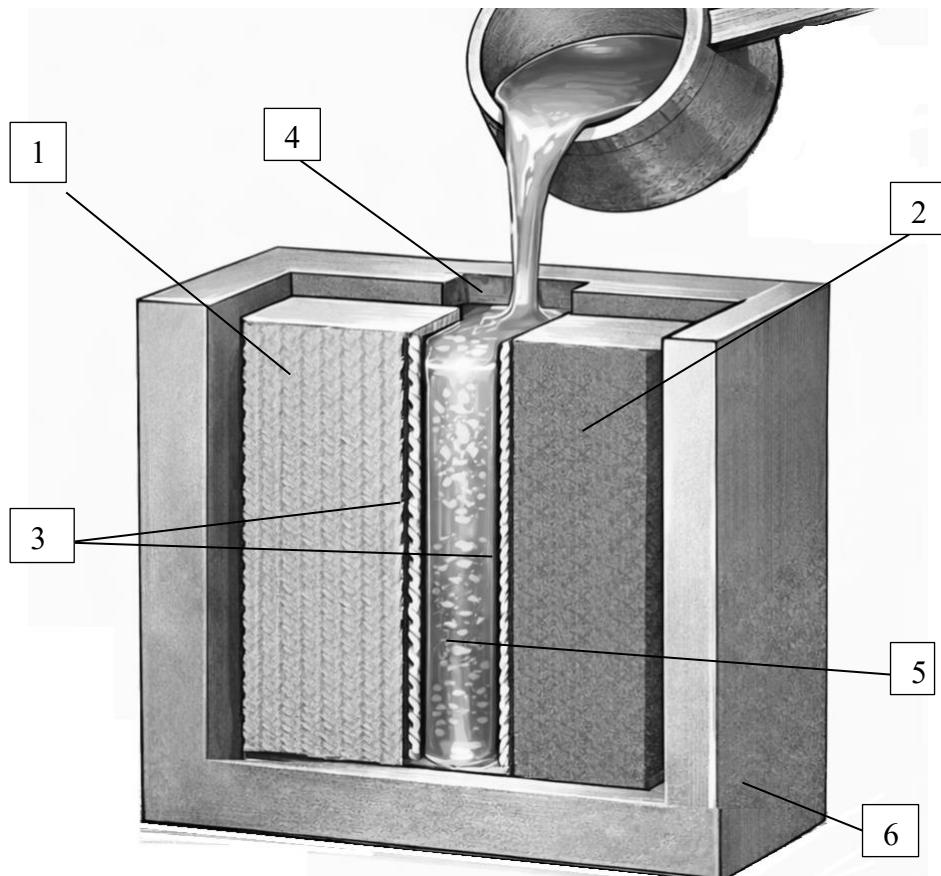


Рис. 5.4.1. Схема реалізації комбінованого лазерно-ливарного способу формування біметалевого з'єднання з попереднім створенням регулярного макрорельєфу на контактних поверхнях: 1 - металевий шар А; 2 - металевий шар В; 3 - регулярний макрорельєф; 4 - канал міжшарового простору; 5 - рідкий проміжний метал, що заливається у міжшаровий зазор; 6 - ливарна форма (корпус прес-форми)

Порівняно з монолітними броньовими сталями (типу SSAB Armoх, RHA) та біметалевими листами вибухового зварювання (Nobelclad, Explomet), розроблена технологія має такі переваги. Керованість інтерфейсу: геометрія міжшарової зони задається цілеспрямовано, а не є некерованим наслідком вибуху. Широкий вибір матеріалів: проміжний шар може виготовлятися з пластичних сталей, сплавів з ефектом пам'яті форми або високоентропійних сплавів. Знижена матеріалоемність: дорогі високоміцні сталі використовуються лише у функціональних зовнішніх шарах. Технологічна доступність: не потрібні вибуховий полігон, дифузійна зварка або гаряче ізостатичне пресування — технологія адаптується до наявного ливарного та лазерного обладнання вітчизняних підприємств.

Потенційні ринки застосування

Оборонно-промисловий комплекс. Найближчим ринком є захист легкої бронетехніки — корпуси БТР, MRAP, пікапів з балістичним захистом. Бронекомпозиція з макроструктурованим інтерфейсом при еквівалентній масі забезпечує вищу стійкість до кумулятивної та осколкової дії відносно до монолітних листів Armoх 500Т/600Т та вітчизняних сталей 44С/49С. У середньостроковій перспективі — захист фортифікаційних споруд, захисних стінок та блок-постів. Реальний ринок для даного напрямку в Україні стрімко зростає і оцінюється у декілька мільярдів доларів на рік.

Правоохоронна сфера та спеціальний транспорт. Технологія придатна для виготовлення броньованих дверей, кузовних панелей поліцейських автомобілів та інкасаційних засобів. Тришарова конструкція з пластичним проміжним шаром здатна забезпечити клас захисту BR5–BR6 за меншої товщини порівняно з однорідними листами.

Гірничодобувна та важка промисловість. Зносостійкі біметалеві листи — традиційний продукт для футерування ковшів екскаваторів, бункерів, дробарок, трубопроводів гідротранспорту. Провідні виробники (SSAB Hardox, ThyssenKrupp XAR) займають цей ринок монолітними листами. Застосування макроструктурованого інтерфейсу дозволяє поєднати зносостійкість зовнішнього шару з ударною в'язкістю внутрішнього, що особливо актуально в умовах ударно-абразивного зношування.

Таким чином, запропонована технологія має чіткий шлях до промислового впровадження — від оборонного сегменту до цивільної промисловості, і є перспективним вітчизняним аналогом зарубіжних рішень у сфері багатошарового броньового захисту.

5.5 Економічні аспекти застосування комбінованих лазерно-ливарних процесів при виготовленні біметалевих матеріалів

Важливою складовою обґрунтування впровадження розробленої технології у промисловості є її економічна ефективність. Найбільшою потребою для різних

галузей промисловості користуються корозійностійкі біметали, що призначені для роботи в умовах підвищених температур та агресивних середовищ. У таких конструкціях робочий шар виготовляється з нержавіючої сталі, тоді як підкладковий — з конструкційної вуглецевої сталі, що дозволяє забезпечити потрібні розміри та форму виробу за суттєво нижчої вартості порівняно з монолітними виробами з нержавіючої сталі.

З метою кількісної оцінки економічних переваг розробленої технології виконано порівняльний аналіз вартості виготовлення 1 м² біметалу (нержавіюча сталь + конструкційна сталь) різної товщини та еквівалентного монолітного листа нержавіючої сталі у трьох країнах-виробниках: Україні, Польщі та Німеччині. Результати наведено у табл. 5.4.1.

Таблиця 5.5.1

Техніко-економічні показники виготовлення 1 м² біметалу (нержавіюча + конструкційна сталь) порівняно з монолітним аналогом

Метал / шар	Товщина, мм	Вартість 1 м ² сталі в Україні, грн	Вартість 1 м ² сталі в Польщі, грн	Вартість 1 м ² сталі в Німеччині, грн
Нержавіючий шар	2	1 295	5 888	8 479
Конструкційний шар	8	848	848	848
Біметал	10	2 157	6 749	9 339
Еквів. нержавіюча	10	6 476	29 437	42 389
Економічний ефект	—	4 319	22 688	33 050
Нержавіючий шар	3	1 943	8 831	12 717
Конструкційний шар	10	1 060	1 060	1 060
Біметал	13	3 016	9 891	13 776
Еквів. нержавіюча	13	8 419	38 268	55 105
Економічний ефект	—	5 403	28 377	41 329
Нержавіючий шар	4	2 590	11 775	16 956
Конструкційний шар	20	2 119	2 119	2 119
Біметал	24	4 710	13 894	19 075
Еквів. нержавіюча	25	15 543	70 648	101 733
Економічний ефект	—	10 833	56 754	82 658

Аналіз табл. 5.4.1 свідчить, що застосування біметалу замість монолітної нержавіючої сталі дозволяє отримати суттєвий економічний ефект, який зростає зі збільшенням товщини матеріалу та цінового рівня ринку. Для біметалу товщиною 10 мм економія на матеріалах складає від 4 319 грн/м² (Україна) до 33

050 грн/м² (Німеччина). При товщині 24–25 мм ця різниця сягає 10 833 грн/м² та 82 658 грн/м² відповідно.

У промисловому виробництві широко застосовуються листи біметалу розмірами 1×2,5 м, 2×3 м і навіть 3×5 м. Отже, при виготовленні значних за розміром партій листів біметалу сукупний економічний ефект може становити десятки мільйонів гривень на рік, що є вагомим аргументом на користь впровадження розробленої лазерно-ливарної технології у промислове виробництво.

Результати експериментального дослідження процесів утворення біметалів із дифузною структурою у перехідному шарі дозволили встановити характерні залежності між вартістю виробу, складом багатошарової композиції та міцністю з'єднання шарів. Встановлено, що зі збільшенням частки нержавіючого шару у структурі біметалу зростає як вартість матеріалу, так і міцність з'єднання — внаслідок розширення зони дифузійного перехідного шару та підвищення адгезії між шарами.

Отримані залежності можуть бути використані як інструмент проектування оптимальних складів біметалевих композицій залежно від умов їх експлуатації та економічних обмежень. Для виробів, що працюють в умовах помірного хімічного навантаження, доцільним є використання тонших нержавіючих шарів (2–3 мм), тоді як для жорстких середовищ рекомендовано збільшення їх товщини до 4–5 мм при відповідному підвищенні собівартості.

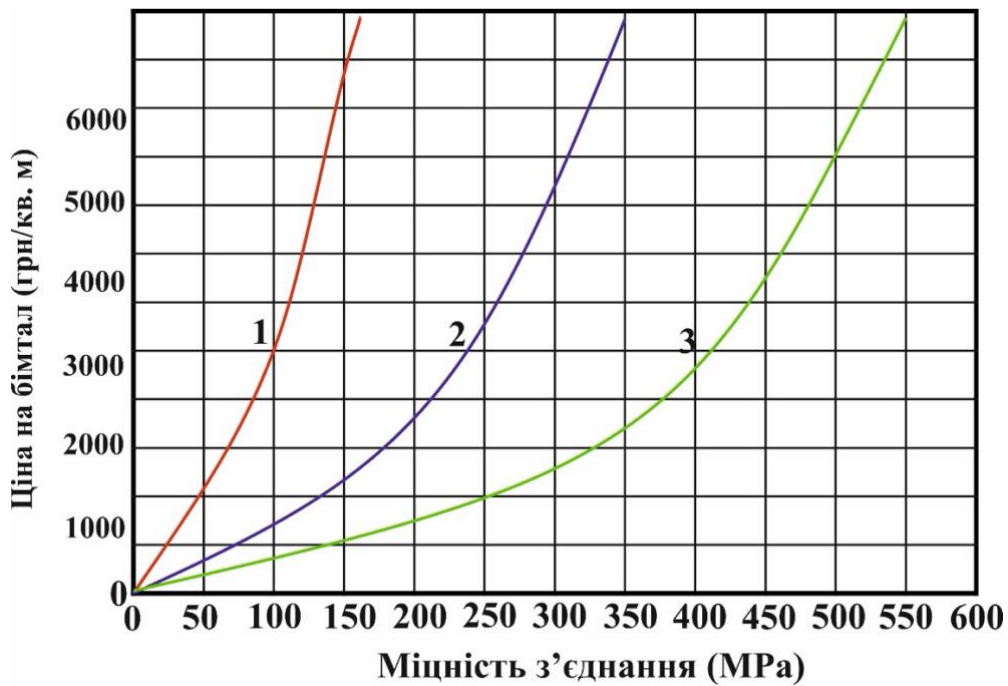


Рис. 5.5.1. Залежність ціни на біметал (грн/м²) від міцності з'єднання шарів (МПа) для різних товщин: 1 — 10 мм (6 мм Сталь Ст3 / 4 мм ХН60ВТ); 2 — 8 мм (5 мм Сталь Ст3 / 3 мм ХН60ВТ); 3 — 6 мм (4 мм Сталь Ст3 / 2 мм ХН60ВТ)

На рис. 5.4.1 представлено графік залежності ціни на 1 м² біметалу (грн) від міцності з'єднання шарів (МПа) для трьох варіантів товщини. З графіка видно, що зі збільшенням необхідної міцності з'єднання вартість виробу зростає нелінійно — особливо інтенсивно у діапазоні 100–200 МПа для товщих варіантів. При обмежених бюджетних вимогах і міцності до 200 МПа доцільним є застосування біметалу товщиною 6 мм; при жорстких умовах навантаження (>300 МПа) — 10 мм варіант, незважаючи на вищу вартість.

Проведене техніко-економічне обґрунтування підтверджує доцільність застосування біметалів, виготовлених комбінованими лазерно-ливарними процесами, як ефективної альтернативи монолітним виробам з нержавіючих сталей. Встановлено, що заміщення об'єму дорогого корозійностійкого матеріалу конструкційною сталлю при забезпеченні надійного дифузійного з'єднання шарів дозволяє суттєво знизити матеріаломісткість та собівартість продукції, причому економічний ефект зростає зі збільшенням товщини виробу та масштабів виробництва. Додаткове зменшення капітальних і енергетичних витрат досягається завдяки використанню модернізованих лазерних комплексів меншої потужності. Сукупність отриманих розрахункових і експериментальних

результатів свідчить про технічну та економічну обґрунтованість впровадження розробленої технології у серійне виробництво.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

Розроблено технологічні умови реалізації комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення корозійностійких біметалевих листових матеріалів, що забезпечують формування якісного металургійного з'єднання між робочим і конструкційним шарами.

Визначено раціональні технологічні параметри процесу: потужність лазерного випромінювання (0,4–0,5) кВт, потужність ливарної системи 100 кВт, оптимальні розміри та тривалість нагрівання зони сплавлення, швидкість переміщення (0,1–2,0) м/хв, що забезпечують стабільний тепловий режим і необхідну глибину проплавлення без перегріву основи.

Розроблено технологічні рекомендації щодо застосування комбінованого методу для виготовлення деталей типу перехідників несучої рами автобусів та корпусів каталізаторів-полум'ягасників із використанням аустенітної нержавіючої сталі як робочого шару та конструкційної сталі як основи. Для локальної лазерної обробки встановлено такі режими: потужність випромінювання (150–400) Вт, діаметр променя (0,4–1,0) мм, швидкість обробки (0,4–1,2) м/хв, витрата аргону до 1 л/хв.

Підтверджено підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах абразивного зношування контактних поверхонь, у 2,5 раза порівняно із серійними виробами. Промислові випробування виконано на ПрАТ «Чернігівський автозавод», що підтвердило працездатність та ефективність запропонованих технічних рішень.

Створено комплексне технологічне забезпечення процесу на базі модернізованої установки з ЧПК та оригінальної системи контролю з ємнісним датчиком, що забезпечує стабільність формування перехідного шару та мінімізує вплив людського фактора на якість біметалу.

Розроблено технологічні регламенти для систем ХН60ВТ–Ст3 та 12Х18Н9Т–Ст3, які забезпечують поєднання високої корозійної стійкості робочого шару з необхідною конструкційною міцністю основи та дозволяють суттєво зменшити витрати легованих матеріалів.

Запропонований спосіб виготовлення біметалевих листових композицій реалізує кероване формування металургійного з'єднання шляхом поєднання локального лазерного плавлення та інтенсивної пластичної деформації. Конструктивна реалізація технологічної системи забезпечує стабільність теплового режиму, адаптивність до різномірних матеріалів і можливість інтеграції у безперервні автоматизовані виробничі лінії, що визначає перспективність методу для широкого промислового впровадження.

Використання біметалу замість монолітної нержавіючої сталі еквівалентної товщини забезпечує економію вартості матеріалів у 2,5–5,5 разів залежно від товщини та ринку постачання. Застосування лазерного верстата малої потужності (0,5–1 кВт) в порівнянні з традиційним (2–5 кВт) зменшує капітальні витрати на обладнання у 10 разів, що суттєво знижує поріг входу у виробництво.

При виготовленні промислових партій великогабаритних листів (2×3 м, 3×5 м) сукупний економічний ефект може становити мільйони гривень на рік, підтверджуючи доцільність масштабування технології.

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 з наплавленням покриттів за допомогою плазмових джерел енергії, 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.

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 у фурмі $h=7.6\text{мм}$.

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.

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. Розроблено та відпрацьовано комплекс методик дослідження фізико-механічних властивостей перехідного шару біметалевих матеріалів, що включає методи світлової та скануючої електронної мікроскопії, енергодисперсійний та рентгеноструктурний аналіз, вимірювання мікротвердості, а також математичні

пакети для розрахунку параметрів міцності, зносостійкості та втомної міцності за діаграмами динамічного сканування індентором перехідної зони. Обрана та обґрунтована математична модель для опису кінетики дифузійних процесів на границі взаємодії складових біметалу.

10. Комплексними дослідженнями структури та фазового складу зони з'єднання біметалу “нікелевий сплав ХН60ВТ – сталь Ст3” встановлено, що оптимальна висота виступів макрорельєфу становить 0,5–1,0 мм, що забезпечує рівномірну хвилясту зону сплавлення шириною до 220 мкм з повним металургійним зв'язком між шарами. Перехідна зона представлена твердим розчином Ni-Cr-Fe (86–89%) та фазою $\text{Fe}_{0.507} - \text{Ni}_{0.493}$ (тетратаєніт, 10–14%), а розподіл мікротвердості (від 4,5–5 ГПа у нікелевому сплаві до пікових 6,8–7 ГПа в перехідній зоні та 3 ГПа у сталі Ст3) підтверджує відсутність різких механічних контрастів і високу якість з'єднання.

11. Розроблено технологічні умови реалізації комбінованого лазерно-ливарного процесу для систем ХН60ВТ–Ст3 та 12Х18Н9Т–Ст3, визначено раціональні технологічні параметри (потужність лазерного випромінювання 0,4–0,5 кВт, швидкість переміщення 0,1–2,0 м/хв). Промислові випробування на ПрАТ “Чернігівський автозавод” підтвердили підвищення зносостійкості деталей у 2,5 рази порівняно із серійними виробами. Застосування біметалу забезпечує економію вартості матеріалів у 2,5–5,5 разів, а використання лазерного верстата малої потужності (0,5–1 кВт) замість традиційного (2–5 кВт) зменшує капітальні витрати на обладнання у 10 разів, що підтверджує широку промислову перспективність методу.

12. 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.

13. 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang D., Sun X., Jiang Y. et al. Review on the application of stainless-clad bimetallic steel in the marine environment. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2024. Vol. 71, No. 2. P. 132–142. <https://doi.org/10.1108/ACMM-06-2023-2832>
2. : Jiang J., Ban H., Hai L., Huang C. Tensile Behavior of Titanium-Clad Bimetallic Steel Butt-Welded Joints. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 912. <https://doi.org/10.3390/buildings13040912>
3. Шахпазов Е. Х., Родіонова І. Г., Зайцев А. І., П. А. П. Двошарові сталі нового покоління для посудин і апаратів нафтогазохімічних виробництв // Хімічне і нафтогазове машинобудування. 2009. № 11. С. 42–53.
4. Сиротенко Л. Д., Шликов Е. С., А. Т. Р. Застосування біметалічних матеріалів у машинобудуванні // Сучасні проблеми науки і освіти. 2015. № 2-1.
5. Єремичев А. А. Кінетика корозійно-втомного руйнування зварних з'єднань біметалевих котлів для варіння целюлози // Зварювальне виробництво. 1992. № 4. С. 12.
6. Llewellyn D.T., Hudd R.C. *Steels: Metallurgy and Applications*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 1998. 424 p. ISBN 978-0750637640
7. Сидоров І. І. Біметали, виготовлені зварюванням вибухом для суднобудування і морської техніки. 2001. С. 288–302.
8. Ban H., Hai L., Huang C., Shi Y. Experimental cyclic behaviour and constitutive modelling of hot-rolled titanium-clad bimetallic steel. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 360. P. 129591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129591>.
9. Родіонова І. Г. Корозійностійкі біметали з міцним зчепленням шарів для нафтогазохімічної промисловості та інших галузей. 2011.
10. Smith L. *Engineering with Clad Steel*. 2nd ed. Nickel Institute Technical Series No. 10 073, 2012. 23 p. URL: www.nickelinstitute.org.
11. Liu B., Li J., Guo W. et al. Progress in corrosion-resistant coatings on surface of low alloy steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2023. Vol. 30. P. 193–

215. <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00872-7>.
12. Hokamoto K., Tanaka S., Inao D. et al. Underwater explosive welding of metals — review of a novel approach. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 65. P. 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.013>.
13. Orazem M.E., Tribollet B. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2017. 608 p. ISBN 978-1119083634.
14. Герасименко Ю. С., Білоусова Н. А., Васильєв Г. С. та ін. Розвиток електрохімічних методів вимірювання швидкості корозії металів наукової школи професора Л. І. Антропова // *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2013. № 6. С. 89–102.
15. Autay R., Kchaou M., Dammak F. Friction and wear behaviour of induction hardened ISO 42CrMo4 low-alloy steel under reciprocating sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*. 2015. Vol. 229. P. 115–125. <https://doi.org/10.1177/1350650114544201>.
16. Carvalho G.H.S.F.L. et al. Microstructure and mechanical behaviour of aluminium–carbon steel and aluminium–stainless steel clads produced with an aluminium interlayer. *Materials Characterization*. 2019. Vol. 155. P. 109819. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109819>.
17. Макаров А. В., Коршунов Л. Г., Солодова І. Л. та ін. Твердість, теплостійкість і трибологічні властивості загартованих вуглецевих сталей, зміцнених в умовах тертя ковзання // *Деформація і руйнування матеріалів*. 2006. № 4. С. 26–33.
18. Kuo C.M., Yang Y.T. Microstructure and tribological behavior of carbide/bainite/martensite multiphase steels. *Wear*. 2003. Vol. 254. P. 74–83. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00301-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00301-7).
19. Hai L., Ban H., Huang C., Shi Y. High-cycle fatigue properties of explosion bonded titanium-clad bimetallic steel. *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 169. P. 107499. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107499>.
20. Shi Y., Luo Z., Zhou X., Xue X., Li J. Post-fire mechanical properties of titanium–clad bimetallic steel in different cooling approaches. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 191. P. 107169. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107169>.

21. Mitelea I., Groza C., Craciunescu C. Copper interlayer contribution on Nd:YAG laser welding of dissimilar Ti-6Al-4V alloy with X5CrNi18-10 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22, No. 8. P. 2219–2223. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0504-3>.
22. Song T.F., Jiang X.S., Shao Z.Y. et al. Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between Ti-6Al-4V and 316L stainless steel using Cu/Nb multi-interlayer. *Vacuum*. 2017. Vol. 145. P. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.08.019>.
23. Kundu S., Bhola S.M., Mishra B., Chatterjee S. Structure and properties of solid state diffusion bonding of 17-4PH stainless steel and titanium. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 599. P. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.073>.
24. : Li H., Zhang L., Zhang B. et al. Interfacial fracture behavior of a stainless/carbon steel bimetal plate in a uniaxial tension test. *Results in Physics*. 2019. Vol. 13. P. 102172. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.013>.
25. Makhina, D. N., Denisov, V. N., Perminova, Y. S., et al. Structure and Mechanical Properties of the Molybdenum–Steel Bimetal Fabricated by Hot Isostatic Pressing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 2019, No. 10. C. 1031–1035.
26. Marukovich, E. I., Branovitsky, A. M., Na, Y.-S., et al. Study on the possibility of continuous-casting of bimetallic components in condition of direct connection of metals in a liquid state. *Materials & design*. 2006. Vol. 27, No. 10. C. 1016–1026.
27. 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. C. 8.
28. Wang, T., Liang, C., Chen, Z., et al. Development of an 8090/3003 bimetal slab using a modified direct-chill casting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214, No. 9. C. 1806–1811.
29. Li, H., Zhang, L., Zhang, B., et al. Interfacial fracture behavior of a stainless/carbon steel bimetal plate in a uniaxial tension test. *Results in Physics*. 2019.
30. Lykhoshva, V., Savina, L. A., Savin, V. V, et al. The Application of the Hybrid Method

the Powder-Laser-Casting Technology for Production of Porous Alloys Based on Aluminum: *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, Trans Tech Publ, 19. C. 11–15.

31. Chen, Y., Nakata, K. Friction stir lap welding of magnesium alloy and zinc-coated steel. *Materials transactions*. 2009. Vol. 50, No. 11. C. 2598–2603.
32. Rajani H.R.Z., Mousavi S.A.A., Sani F.M. Comparison of corrosion behavior between fusion cladded and explosive cladded Inconel 625/plain carbon steel bimetal plates. *Materials & Design*. 2013. Vol. 43. P. 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.028>.
33. Wang F.L., Sheng G.M., Deng Y.Q. Impulse pressuring diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel using pure Ni interlayer. *Rare Metals*. 2016. Vol. 35, No. 4. P. 331–336.
34. Ban H., Hai L., Huang C. et al. Material properties and stress-strain curves for titanium-clad bimetallic steels. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 164. P. 105782. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105782>.
35. Зяхор І.В., Кучук-Яценко С.І. Особливості формування тертям зварених з'єднань між міддю і алюмінієм // Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal). 2001. Т. 9. С. 24–29.
36. Зяхор І.В. Сучасне обладнання для зварювання тертям // Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal). 2001. № 7. С. 48–52..
37. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding – process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2008. Vol. 53. P. 980–1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>.
38. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R*. 2005. Vol. 50. P. 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>.
39. Ramachandran, K. K., Murugan, N., Kumar, S. S. Effect of tool axis offset and geometry of tool pin profile on the characteristics of friction stir welded dissimilar joints of aluminum alloy AA5052 and HSLA steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 639. C. 219–233.
40. Suri, A. An improved FSW tool for joining commercial aluminum plates. *Procedia*

materials science. 2014. Vol. 6. C. 1857–1864.

41. Martinsen, K., Hu, S. J., Carlson, B. E. Joining of dissimilar materials. *Cirp Annals*. 2015. Vol. 64, No. 2. C. 679–699.
42. Shah, L. H. A., Sonbolestan, S., Midawi, A. R. H., et al. Dissimilar friction stir welding of thick plate AA5052-AA6061 aluminum alloys: effects of material positioning and tool eccentricity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 105, No. 1–4. C. 889–904.
43. Mehta, K. P., Badheka, V. J. Influence of tool design and process parameters on dissimilar friction stir welding of copper to AA6061-T651 joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 80, No. 9–12. C. 2073–2082.
44. Amancio-Filho, S. T., Santos, J. F. Dos. Joining of polymers and polymer–metal hybrid structures: recent developments and trends. *Polymer Engineering & Science*. 2009. Vol. 49, No. 8. C. 1461–1476.
45. Thomas, W. M., Nicholas, E. D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & design*. 1997. Vol. 18, No. 4–6. C. 269–273.
46. Williams, S. W. Welding of airframes using friction stir. *Air & Space Europe*. 2001. Vol. 3, No. 3–4. C. 64–66.
47. Кривцун І. В., Квасницький В. В., Максимов С. Ю. та ін. Спеціальні способи зварювання: підручник / Патон Б. Є. (ред.). – Миколаїв: НУК, 2017. – 320 с.
48. Махненко В. І., Квасницький В. В. Особливості формування напружено-деформованого стану з'єднань різнорідних матеріалів, отриманих дифузійним зварюванням // *Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal)*. 2009. № 8. С. 11–16.
49. Махненко В. І., Квасницький В. В., Єрмолаєв Г. В. Вплив фізико-механічних властивостей металів та геометрії деталей на розподіл напружень при дифузійному зварюванні у вакуумі // *Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal)*. 2008. № 1. С. 5–11.
50. Kundu S., Sam S., Chatterjee S. Interface microstructure and bonding properties of diffusion bonded titanium alloy to micro-duplex stainless steel. *Materials Design*.

2011. Vol. 32. P. 2552–2560. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.062>.
51. Pouranvari M. Chromium carbide hard-facing overlay coatings: A review of fabrication techniques and key features. *Wear*. 2020. Vol. 454–455. P. 203341. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203341>.
 52. Ayele B.S., Mebratie B.A., Meku A.A. Investigation of the effect of explosive welding parameters on aluminum–steel bimetals: a numerical approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023. Vol. 35. <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-5834>.
 53. Saravanan S., Raghukandan K., Hokamoto K. Improved microstructure and mechanical properties of dissimilar explosive cladding by means of interlayer technique. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16. P. 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.03.008>.
 54. Шленський П. С., Добрушин Л. Д., Фадєєнко Ю. І. та ін. Камери для зварювання металів вибухом (Огляд) // Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal). 2011. № 5. С. 57–61.
 55. Mendes R., Ribeiro J., Loureiro A. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration. *Materials & Design*. 2013. Vol. 51. P. 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.069>.
 56. Rajani, H. R. Z., Mousavi, S. A. A. A., Sani, F. M. Comparison of corrosion behavior between fusion cladded and explosive cladded Inconel 625/plain carbon steel bimetal plates. *Materials & Design*. 2013. Vol. 43. C. 467–474.
 57. Wang T., Liang C., Chen Z. et al. Development of an 8090/3003 bimetal slab using a modified direct-chill casting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214, No. 9. P. 1806–1811. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.004>.
 58. Shlyakhova, G. V, Barannikova, S. A., Bochkareva, A. V, et al. Structure of a Carbon Steel--Stainless Steel Bimetal. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48, No. 4. C. 219–223.
 59. Nesterov, N. V, Vorontsov, B. S., Nesterov, P. N. Preparation of Bimetal Objects by Lost Foam Casting. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, No. 5. C. 448–451.
 60. Wróbel T. The quality of the joint between alloy steel and unalloyed cast steel in

bimetallic layered castings / T. Wróbel // Archives of Foundry Engineering. – 2012. – Vol. 12, No. 1..

61. Wróbel T. Bimetallic layered castings alloy steel – grey cast iron. Archives of Materials Science and Engineering. 2011. Vol. 49, No. 2. P. 101–108.
62. Torbati A.M., Miranda R.M., Quintino L. et al. Welding bimetal pipes in duplex stainless steel. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 53. P. 1039–1047. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2904-2>.
63. Pavlov, A. A. Development of New Corrosion-Resistant Bimetals with Increased Corrosion Resistance Prepared by Electroslag Surfacing Technology. Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53, No. 7–8. C. 551–556.
64. Jones, J. H. Manufacture of bimetallic billets / Google Patents, 1961.
65. Torbati, A. M., Miranda, R. M., Quintino, L., et al. Welding bimetal pipes in duplex stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 53, No. 9–12. C. 1039–1047.
66. Lu, Q., Hutchings, G. S., Yu, W., et al. Highly porous non-precious bimetallic electrocatalysts for efficient hydrogen evolution. Nature communications. 2015. Vol. 6, No. 1. C. 1–8.
67. Johnson, E. N., Johnson, R. E., Johnson, C. S. Bi-metal panel for electric arc furnace / Google Patents, 2000.
68. Regmi, Y. N., Leonard, B. M. General synthesis method for bimetallic carbides of group VIIIA first row transition metals with molybdenum and tungsten. Chemistry of Materials. 2014. Vol. 26, No. 8. C. 2609–2616.
69. Thomas, J. R. D., Norcross, J. E. Pressure vessel and bimetallic components / Google Patents, 1975.
70. Походня І. К., Шлепаков В. Н., Максимов С. Ю. та ін. Дослідження та розробки ІЕС ім. Є. О. Патона в галузі електродугового зварювання та наплавлення порошковим дротом (Огляд) // Автоматичне зварювання (= The Paton Welding Journal). 2010. № 12. С. 34–42.
71. Mutaşcu D. et al. Pulsed TIG cladding of a highly alloyed flux-cored wire electrode on duplex stainless steel. Materials. 2023. Vol. 16, No. 13. P. 4557.

<https://doi.org/10.3390/ma16134557>.

72. Rao L., Wang S., Zhao J. et al. Fabricating GCr15/40Cr bimetallic compound rollers using electroslag surfacing with liquid metal method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21, No. 9. P. 869–877. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60151-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60151-9).
73. Gutierrez-Gonzalez C.F. (ed.). *Advanced Ceramic and Metallic Coating and Thin Film Technology for Energy and Environmental Applications*. IntechOpen, 2019. 156 p. ISBN 978-1789847611.
74. Шаповалов К. П., Белінський В. А., Мерзляков А. Є., Косинов С. Н., Ющенко К. А., Личко І. І., Козулін С. М. Електрошлакове зварювання крупногабаритної станини преса // *Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal)*. 2016. № 8. С. 43–46.
75. Ющенко К. А., Козулін С. М., Личко І. І., Косинов С. М., Шаповалов К. П. З'єднання металу великої товщини багатопрохідним електрошлаковим зварюванням // *Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal)*. 2014. № 6. С. 34–38.
76. Протоковилів І. В., Порохонько В. Б. Керування формуванням зварних з'єднань при електрошлаковому зварюванні (Огляд) // *Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal)*. 2012. № 4. С. 34–42.
77. Козулін С. М. Вибір форми розробки кромки при ремонті наскрізних тріщин багатошаровим електрошлаковим зварюванням // *Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal)*. 2011. № 9. С. 38–41.
78. Rao, L., Wang, S., Zhao, J., et al. Experimental and simulation studies on fabricating GCr15/40Cr bimetallic compound rollers using electroslag surfacing with liquid metal method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21, No. 9. С. 869–877.
79. Ksendzyk, G. V, Frumin, I. I., Shirin, V. S. Electroslag remelting and surfacing apparatus / Google Patents, 1981.
80. Слинько, В. Г., Горб, О. О., Аранчій, В. І., et al. Пристрій для плазмового наплавлення циліндричних деталей сільськогосподарської техніки / ДП

“Український інститут промислової власності”, 2016.

81. Gomes J.H.F. et al. Mathematical modeling of weld bead geometry, quality, and productivity for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012. Vol. 21. P. 1862–1872. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0103-1>.
82. Прасолов Є. Я., Беловол С. А., Багмет С. О. та ін. Підвищення зносостійкості деталей шнека шляхом плазмового наплавлення порошковими матеріалами // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2015. № 5 (7). С. 54–57.
83. Шмідт М., Куринцев С. В. Отримання біметалевих заготовок за допомогою лазерного зварювання проплавним швом // Автоматичне зварювання (= The Paton Welding Journal). 2014. № 4. С. 47–51.
84. Wang, P., Chen, X., Pan, Q., et al. 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.
85. Загорянський В. Г. Вплив основних технологічних параметрів на міцність з'єднання шарів біметалу алюміній–мідь // Метал і литво України. 2014.
86. Суровцев А. П., Б. О. О. Оцінка якості з'єднання шарів у біметалі // Автоматичне зварювання (The Paton Welding Journal). 1989. № 3. С. 27–32.
87. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Bochkareva A.V. et al. Structure of a Carbon Steel–Stainless Steel Bimetal. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48, No. 4. P. 219–223. <https://doi.org/10.3103/S0967091218040101>.
88. Eisazadeh H., Bunn J.R., Aidun D.K. Numerical and neutron diffraction measurement of residual stress distribution in dissimilar weld. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 687. P. 168–175.
89. ДСТУ EN 12668-2:2015 Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі (EN 12668-2:2010, IDT): ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2015.
90. ДСТУ EN ISO 16823:2016 Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Метод проходження (EN ISO 16823:2014, IDT; ISO 16823:2012, IDT): ДП

- «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2016.
91. 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.
 92. Sun Y., Gong W., Feng J., Lu G., Zhu R., Li Y. A review of the friction stir welding of dissimilar materials between aluminum alloys and copper // *Metals*. 2022. Vol. 12, No. 4. Article 675. DOI: 10.3390/met12040675.
 93. Покляцький А. Г., Іщенко А. Я., Яворська М. Р. Міцність з'єднань тонколистових алюмінієвих сплавів, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням // *Автоматичне зварювання*. 2007.
 94. Prasad B., Kumar A., Gupta N. Characteristics of bimetallic castings with varying thickness of liquid high carbon grey cast iron and solid high chromium stainless steel 304 produced by green sand mold casting // *International Journal of Metalcasting*. 2025. DOI: 10.1007/s40962-025-01832-z.
 95. Przyszlak, N., Wróbel, T. Self-hardening of X46Cr13 Steel Integrated with Base from Grey Cast Iron in Bimetallic System. *Archives of Foundry Engineering*. 2019.
 96. Центр рентгеноструктурного аналізу Rigaku. Інженерно фізичний факультет КПІ ім. Ігоря Сікорського: веб сайт. <https://imz.kpi.ua/uk/15-tsentr-rentgenostrukturnogo-analizu-rigaku.html> (дата звернення: 17.09.2020).
 97. Veiga C., Davim J.P., Loureiro A.J.R. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2012. Vol. 32. P. 133–148.
 98. Okamoto H. *Phase Diagrams for Binary Alloys*. 2nd ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 2010. 756 p. ISBN 978-0871707178.
 99. Подвійні та багатокомпонентні системи на основі міді / за ред. С. В. Шухардіна. Наука, 1979.
 100. Massalski T.B. (ed.). *Binary Alloy Phase Diagrams*. 2nd ed. ASM International, 1990. Vol. 1–3. ISBN 978-0871704030.

101. ARAMIS. Лазерний технологічний комплекс LTC75 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aramis.ua/> (дата звернення: 18.02.2025)
102. Ігнатович С. Р., Закієв І. М., Закієв В. І. Прилад для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалів в манометричному діапазоні // Приладобудування 2005 : IV наук.-техн. конф. : тези доп. – Київ, 2005. – С. 225.
103. Ігнатович С. Р., Закиев И. М., Закиев В. И. Дифференциальный микро-/наноиндентометр // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : III междунар. конф., сентябрь 2009 г. : тезисы докл. – Москва : Наука и технологии, 2009. – Т. 2. – С. 226–227.
104. Ігнатович С. Р., Закиев И. М., Закиев В. И. Универсальный прибор для исследования физ.-мех. свойств материалов методами индентирования // Инженерия поверхности и реновация изделий : 17-я междунар. науч.-техн. конф. : тезисы докл. – Одесса, 2017. – С. 69–70.
105. Ігнатович С. Р., Закієв І. М., Закієв В. І., Дворник Є. П. Прилад для випробування матеріалів на мікротвердість : пат. 30003 Україна : МПК G01N 3/40. № u200709512 ; заявл. 21.08.2007 ; опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3. – 4 с.
106. Salii S., Golovko L., Bloshchytsyn M., Alnusirat W. Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetalls // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4, No. 1 (94). P. 47–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139483
107. Salii S., Golovko L., Kaglyak O., Kapustynskyi O., Višniakov N. The formation of a low-carbon steel/Ni-Cr-W alloy bimetallic material via liquid–solid compound casting with a laser assisted solid surface // Machines. 2024. Vol. 12. Art. 522. DOI: 10.3390/machines12080522
108. Салій С. С., Головко Л. Ф., Романенко В. В. Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів // Mechanics and Advanced Technologies. 2020. Vol. 88, No. 1. P. 93–107. DOI: 10.20535/2521-1943.2020.88.200234

109. Салій С. С., Головка Л. Ф., Радько О. В., Скуратовський А. К. Енергозберігаючі технології зміцнення робочих поверхонь деталей машин // Проблеми тертя та зношування. 2019. № 4 (85). С. 44–52. DOI: 10.18372/0370-2197.4(85).13871
110. Салій С. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С., Кагляр О. Д., Савченко О. А., Свічкарь І. В. Виготовлення біметалів з використанням ливарного процесу і лазерної обробки. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2022. 220 с

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати
дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях зарубіжних країн, що
індексуються в наукометричних базах Scopus та WoS

1. **Salii, S.; Golovko, L.; Kaglyak, O.; Kapustynskiy, O.; Višniakov, N.** The Formation of a Low-Carbon Steel/Ni-Cr-W Alloy Bimetallic Material via Liquid–Solid Compound Casting with a Laser Assisted Solid Surface. *Machines* 2024, 12, 522. <https://doi.org/10.3390/machines12080522> (**Scopus, Q2**)

Особистий внесок здобувача: Дисертантом створено замкнутий цикл «проекування рельєфу — лиття — аналіз структури», що дозволило отримати біметал з високими експлуатаційними властивостями завдяки керованій дифузії в зоні сплавлення.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. — наукове керівництво та концептуальне обґрунтування методу; Кагляк О.Д. — металографічний аналіз структури перехідної зони; Kapustynskiy O. — участь у підготовці та оформленні публікації; Višniakov N. — дослідження дифузійних процесів та редагування тексту).

Публікації у наукових фахових виданнях України

2. **S. Salii, L. Golovko, 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). Pp. 47–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139483> (**Scopus, Q3**)

Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено конструкції лазерної та ливарної систем та проведено моделювання процесів у математичному пакеті для визначення оптимальних режимів виготовлення біметалевих матеріалів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. — наукове керівництво, концептуальне обґрунтування роботи та загальна редакція; Блощицин М.С. — участь в експериментальних дослідженнях та аналізі результатів; Alnusirat W. — участь у підготовці та оформленні матеріалів публікації).

3. Салій С. С., Джемелінський В. В., Лесик Д. А., Данилейко О. О. Забезпечення якості поверхневого шару дрібнорозмірних деталей комбінованою оздоблювальнозміцнювальною обробкою. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 1(81). С. 81-85. ISSN: 23068744

Особистий внесок здобувача: Дисертантом виміряно та опрацьовано результати технологічних параметрів процесу комбінованої оздоблювальнозміцнювальної обробки.

Внесок співавторів: Джемелінський В.В. – наукове керівництво та визначення загальної концепції досліджень; Лесик Д.А. – проведення експериментальних досліджень із зміцнювальної обробки; Данилейко О.О. – вимірювання параметрів поверхневого шару та аналіз результатів.

4. Салій С.С., Головка Л. Ф., Радько О.В. Скуратовський А.К. Енергозберігаючі технології зміцнення робочих поверхонь деталей машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. – №. 4 (85). – С. 44-52. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(85\).13871](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(85).13871)

Особистий внесок здобувача: Дисертантом сформульовано ідею енергозберігаючого методу зміцнення поверхонь деталей машин, розроблено схему та програму досліджень, проведено обробку зразків і вимірювання мікротвердості та зносостійкості оброблених поверхонь, здійснено аналіз й узагальнення результатів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування роботи; Радько О.В. – проведення трибологічних досліджень та аналіз зносостійкості; Скуратовський А.К. – планування експерименту та обробка результатів).

5. Салій, С. С., Головка, Л. Ф., Романенко, В. В. Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020. Vol. 88, No. 1. 93-107. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.200234>

Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено математичну модель теплових процесів при лазерно-ливарному виготовленні біметалів, проведено числові розрахунки й порівняльний аналіз з експериментальними даними, сформульовано рекомендації щодо оптимальних режимів процесу.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка конструкції ливарної системи та проведення ливарних експериментів).

Патенти:

6. Спосіб виготовлення біметалевих листових композицій: пат. 128468 Україна: МПК В23К 26/354 (2014.01), В23К 23/00, №201712550 / Головка Л.Ф., Салій С.С.; заявл. 18.12.2017; опубл. 25.09.2018, Бюл. No 18, 2018.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом запропоновано технічне рішення конструкції лазерної системи для формування біметалу, здійснено патентний пошук та підготовлено матеріали заявки й опис до патенту.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво, формулювання технічного завдання та концептуальне обґрунтування рішення.

7. Пристрій для ливарного виготовлення біметалевих матеріалів з застосуванням утримуючих елементів: пат. 133111 Україна: МПК В22D 19/16 (2006.01), №201810064 / Романенко В. В.; Головка Л. Ф.; Блощин М. С., Салій С. С.; заявл. 09.10.2018; опубл. 25.03.2019; Бюл. № 6, 2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено конструктивне рішення пристрою з утримуючими елементами, обґрунтовано параметри технологічного процесу та проведено перевірочні розрахунки.

Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної конструкції пристрою та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощин М.С. – відпрацювання конструктивних параметрів та проведення перевірочних випробувань.

8. Спосіб ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів: пат. 133173 Україна: МПК

B23D 19/08 (2006.01), №201810447 / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С., **Салій С.С.**, заявл. 23.10.2018; опубл. 25.03.2019 Бюл. № 6, 2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом запропоновано спосіб застосування технологічних отворів та утримуючих елементів для надійної фіксації пластин, обґрунтовано геометричні параметри з'єднання.

Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції способу та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування технічних рішень; Блощин М.С. – відпрацювання технологічних параметрів та проведення випробувань.

9. Спосіб ливарного виготовлення корозійностійких алюмошталевих біметалів з проміжком між пластинами: пат. 134788 Україна: МПК B22D 19/08 №20181130 / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С., **Салій С.С.**, заявл. 16.11.2018; опубл. 10.06.2019 Бюл. № 11/2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено теоретичне обґрунтування та розрахунок параметрів технологічного процесу; здійснено підготовку матеріалів для патентування.

Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції способу та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування технічних рішень; Блощин М.С. – проведення корозійних випробувань та аналіз результатів.

10. Спосіб ливарного виготовлення корозійностійких алюмошталевих біметалів з утримуючими елементами та жертвним анодом: пат. 134789 Україна: МПК B22D 19/08 №201811302 / Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Блощин М.С., **Салій С.С.**, заявл. 16.11.2018; опубл. 10.06.2019 Бюл. № 11/2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено розрахунок параметрів системи катодного захисту від корозії та підготовлено матеріали для патентування.

Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне

обґрунтування; Блощин М.С. – проведення електрохімічних вимірювань та аналіз захисних властивостей.

11. Спосіб ливарного виготовлення біметалів із застосуванням нахилених утримувачів: пат. 134859 Україна: МПК В23Д 19/08 №u201812618/ Романенко В.В.; Головка Л.Ф.; Ямшинський М. М., Блощин М.С., **Салій С.С.**, Ковальчук О. Г., заявл. 19.12.2018, опубл. 10.06.2019 Бюл. № 11/2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено вплив кута їх нахилу на надійність фіксації твердого компонента і якість з'єднання шарів; підготовлено матеріали для патентування.

Внесок співавторів: Романенко В.В. – розробка загальної концепції та технічного завдання; Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування технічних рішень; Ямшинський М.М. – аналіз технологічних параметрів способу; Блощин М.С. – проведення перевірочних випробувань; Ковальчук О.Г. – оформлення матеріалів заявки.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. **Салій С. С.**, Головка Л. Ф. Використання математичного моделювання для оптимізації процесу виготовлення біметалів. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2017»*, секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7984/>

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено математичне моделювання теплових процесів при виготовленні біметалів, здійснено аналіз результатів числових розрахунків та сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальних технологічних параметрів процесу.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво, постановка задачі та визначення напрямку дослідження.

13. Головка Л. Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., **Салій С.С.** Нові високоефективні способи виготовлення біметалів з застосуванням концентрованих джерел енергії. *Матеріали XVIII-Міжнародної науково-*

технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Секція 4 «Прогресивна техніка». – м. Київ, 2017. – С.248-249.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено нові способи виготовлення біметалів із застосуванням концентрованих джерел енергії, проведено порівняльний аналіз ефективності різних методів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та загальна концепція доповіді; Романенко В.В. – дослідження ливарних процесів та аналіз результатів; Блощин М.С. – підготовка матеріалів доповіді.

14. Салій С. С., Головка Л. Ф., Блощин М.С. Особливості реалізації фокуруючої лазерної системи при створенні біметалів лазерно – ливарним способом. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2018», секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології».* - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2018/paper/view/13788>

Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено та реалізовано оптичну схему фокуруючої лазерної системи для лазерно-ливарного способу виготовлення біметалів, проведено розрахунок параметрів лазерного пучка в зоні фокусування та визначено оптимальні умови формування рельєфу.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощин М.С. – налаштування та тестування оптичної системи.

15. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Салій С.С. Лазерно – ливарні процеси виготовлення біметалів. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Секція I «Технологічні процеси та системи машинобудівного виробництва».* – м. Чернігів, 2018. – С.118.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено вплив параметрів лазерно-ливарного процесу на формування перехідної зони між шарами біметалу та сформульовано висновки щодо якості з'єднання.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних експериментів; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів доповіді.

16. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., Салій С.С., Свічкарь І.В., Кір'янова К.О. Застосування індукційного нагрівання при лазерно-ливарній технології виробництва біметалів. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Секція 1 «Технологічні процеси та системи машинобудівного виробництва».* – м. Чернігів, 2018. – С.119

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено можливості застосування індукційного нагрівання в комбінації з лазерним випромінюванням при лазерно- ливарній технології виробництва біметалів, проведено порівняльні випробування та аналіз якості отриманих біметалевих зразків.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження параметрів індукційного нагрівання.

17. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., Салій С.С., Свічкарь І.В. Застосування лазерного-ливарного процесу для виробництва біметалів різного функціонального призначення. *Матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації - 2018», Секція 2 «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, мехатроніка, робототехніка і автоматизоване управління».* випуск 4. – Херсон: ХНТУ, 2018. – С.66.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено параметри лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів різного функціонального призначення, проведено аналіз мікроструктури зразків та оцінку міцності з'єднання шарів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічка І.В. – оформлення результатів.

18. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічка І.В. Управління якістю з'єднання при виготовленні біметалів лазерно-ливарним методом. *Матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації - 2018», Секція 2 «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, мехатроніка, робототехніка і автоматизоване управління»*. випуск 4. – Херсон: ХНТУ, 2018. – С.67.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено вплив режимів лазерного нагрівання поверхні та параметрів заливки на якість металургійного з'єднання при лазерно-ливарному виготовленні біметалів, сформульовано рекомендації щодо управління якістю процесу.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка рекомендацій з управління процесом; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічка І.В. – проведення порівняльних досліджень.

19. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., **Салій С.С.**, Свічка І.В. Особливості конструювання ливарних систем при створенні біметалів лазерно-індукційним методом. *Матеріали XIX-Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Секція 5 «Прогресивна техніка та технологія машинобудування»*. – м. Київ, 2018. – С.52.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено конструкцію ливарної системи для лазерно-індукційного методу виготовлення біметалів, проведено розрахунок параметрів системи та перевірено її ефективність в експериментальних умовах.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та обґрунтування конструктивних рішень; Романенко В.В. – розробка конструкції ливарної

системи; Блощин М.С. – підготовка матеріалів; Свічка І.В. – дослідження ефективності нагрівання.

20. Головка Л.Ф., Блощин М.С., **Салій С.С.**, Тонкошкурій А.В., Трапезніков О.П. Явище електролітно-плазмового розряду при поліруванні струминними течіями електроліту. *XXIV Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці"* м. Київ, 28.05.2019

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено вимірювання параметрів розряду та порівняльний аналіз отриманих результатів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощин М.С. – постановка досліджень та загальний аналіз результатів; Тонкошкурій А.В. – проведення електричних вимірювань; Трапезніков О.П. – підготовка та оформлення матеріалів.

21. Блощин М.С., **Салій С.С.**, Тищенко Є.Ю., Трапезніков О.П. Аналіз особливостей формування діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні. *XXIV Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці"* м. Київ, 28.05.2019

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено дослідження процесу формування діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні.

Внесок співавторів: Блощин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування досліджень; Тищенко Є.Ю. – вимірювання характеристик діелектричного шару; Трапезніков О.П. – підготовка матеріалів та аналіз результатів.

22. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., **Салій С.С.**, Свічка І.В. Особливості формування ванни розплаву лазерним випромінюванням лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів. *X Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти"*, м. Херсон 03.06.2019

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено характеристики ванни розплаву при лазерному нагріванні поверхні в процесі лазерно-ливарного

виготовлення біметалів, проведено числове моделювання гідродинамічних процесів у розплаві та проаналізовано їх вплив на якість з'єднання.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – аналіз гідродинамічних характеристик.

23. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., Салій С.С., Литвиненко О.А Реалізації технологій виготовлення гнутих біметалів та біметалевих виробів кутового типу. *X Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти"*, м. Херсон 03.06.2019

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено технологічні особливості виготовлення гнутих біметалів та біметалевих виробів кутового типу лазерно-ливарним методом, розроблено рекомендації щодо режимів виготовлення та контролю якості продукції.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів; Литвиненко О.А. – дослідження деформаційних характеристик біметалів.

24. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощицин М.С., Салій С.С., Свічкарь І.В Особливості формування перехідної зони при лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів. *X Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти"*, м. Херсон 03.06.2019

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено особливості формування перехідної зони при лазерно-ливарному методі виготовлення біметалів, проведено аналіз дифузійних процесів у зоні з'єднання.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощицин

М.С. – підготовка матеріалів; Свічка І.В. – дослідження дифузійних процесів у зоні з'єднання.

25. Салій С.С., Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Забезпечення металургійного зв'язку при комбінованому лазерно-ливарному процесі виготовлення біметалів. *XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*, м. Київ – м. Херсон 10-13.09.2019

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено умови забезпечення надійного металургійного з'єднання при комбінованому лазерно-ливарному процесі виготовлення біметалів, сформульовано рекомендації щодо режимів попередньої підготовки поверхні та параметрів ливарного процесу.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій щодо ливарного процесу; Блощин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів.

26. Блощин М.С., Головка Л.Ф., Романенко В.В., Салій С.С. Лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів. *XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*, м. Київ – м. Херсон 10-13.09.2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено основні закономірності лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів, встановлено оптимальні параметри лазерного нагрівання поверхні та ливарного процесу для забезпечення якісного міжшарового з'єднання.

Внесок співавторів: Блощин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та загальна концепція; Головка Л.Ф. – обґрунтування результатів та редагування матеріалів; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень та аналіз оптимальних параметрів.

27. Салій С.С., Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. Дослідження комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів. *Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів*

"Інновації молоді в машинобудуванні - 2019", м. Київ, 15.05.2019, Url - <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2019/paper/view/17769>.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено комплексне дослідження комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів, виконано порівняльний аналіз структури та механічних властивостей зразків, виготовлених за різних технологічних режимів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Блощин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів.

28. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С. **Салій С.С.**, Саленко А.О. Особливості застосування комбінованих лазерно-ливарних процесів при виготовленні біметалів. - В зб. IX міжнародної конференції "Промислові технології в зварюванні і обробці матеріалів", 9-13.09.2019, м. Одеса, Україна.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено особливості комбінованих лазерно-ливарних процесів при виготовленні біметалів, проведено аналіз впливу різних варіантів поєднання лазерного та ливарного методів на якість виготовлених зразків.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних схем; Блощин М.С. – підготовка матеріалів; Саленко А.О. – аналіз застосування концентрованих джерел енергії.

29. **Салій С. С.**, Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С. Дослідження лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів різного функціонального призначення. *Laser technologies in welding and materials processing: Proceedings of the Ninth International Conference* / ed. by I. V. Krivtsun. Київ : МА «Зварювання», 2019. С. 100–103. URL: <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2019.pdf>.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів різного функціонального призначення, проведено аналіз мікроструктури та властивостей отриманих зразків,

сформульовано рекомендації щодо вибору режимів процесу для конкретних застосувань.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій; Блощин М.С. – підготовка та оформлення матеріалів.

30. Блощин М. С., Головка Л. Ф., Семінська Н. В., **Салій С. С.**, Трапезніков О. П. Особливості пробою діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні струминними течіями електроліту. *V Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу – 2019»*. Херсон : ХНТУ, 10–15.09.2019.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено процес пробою діелектричного шару при електролітно-плазмовому поліруванні струминними течіями електроліту та проведено аналіз впливу технологічних чинників на характеристики пробою.

Внесок співавторів: Блощин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Головка Л.Ф. – загальний аналіз та обговорення результатів; Семінська Н.В. – проведення електрохімічних вимірювань; Трапезніков О.П. – підготовка матеріалів та аналіз результатів.

31. Блощин М. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., **Салій С. С.** Можливості застосування лазерного випромінювання для підвищення якості виробів військового призначення. *VII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні»*, секція 1. Київ, 09.10.2019. С. 133–134.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено можливості застосування лазерного випромінювання для підвищення якості та надійності виробів військового призначення, проведено порівняльний аналіз ефективності різних методів лазерної обробки поверхонь.

Внесок співавторів: Блощин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Головка Л.Ф. – аналіз та обговорення

результатів; Романенко В.В. – розробка технологічних рекомендацій та підготовка матеріалів.

32. Салій С. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С., Свічкарь І. В. Особливості комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2020»*, секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено особливості комбінованого лазерно-ливарного процесу виготовлення біметалів, встановлено закономірності формування мікроструктури в перехідній зоні та визначено оптимальні технологічні параметри для забезпечення якісного з'єднання шарів.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка технологічних схем; Блощин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження параметрів нагрівання).

33. Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С., Салій С. С., Свічкарь І. В. Розробка комбінованої системи лазерно-ливарного виготовлення біметалів. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, секція 1. Чернігів, 2020. С. 158.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом розроблено комбіновану систему лазерно-ливарного виготовлення біметалів, проведено її проектування та компонування, визначено оптимальні параметри основних вузлів системи та виконано перевірочні розрахунки.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проектування ливарних вузлів системи; Блощин М.С. – підготовка матеріалів; Свічкарь І.В. – дослідження вузлів індукційного нагрівання.

34. Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С., Салій С. С. Підвищення ефективності хіміко-термічної обробки застосуванням лазерного

модифікування поверхонь. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, секція 1. Чернігів, 2020. С. 162.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено ефективність застосування лазерного модифікування поверхонь для підвищення якості хіміко-термічної обробки деталей.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – проведення технологічних досліджень; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів.

35. Салій С. С., Головка Л. Ф., Блощицин М. С., Романенко В. В., Свічкарь І. В. Комбінований процес виготовлення біметалів із застосуванням концентрованих джерел енергії. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, секція 1. Чернігів, 2020. С. 163.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено комбінований процес виготовлення біметалів із застосуванням концентрованих джерел енергії, проведено порівняльний аналіз ефективності різних варіантів комбінування методів та їх впливу на якість кінцевого продукту.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз результатів; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Свічкарь І.В. – дослідження особливостей нагрівання.

36. Блощицин М. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., **Салій С. С.,** Свічкарь І. В. Виготовлення корозійностійких біметалів при використанні висококонцентрованих джерел енергії. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, секція 1. Чернігів, 2020. С. 164.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом досліджено можливості застосування висококонцентрованих джерел енергії для виготовлення

корозійностійких біметалів, проведено випробування зразків на корозійну стійкість та аналіз захисних властивостей отриманих матеріалів.

Внесок співавторів: Блощицин М.С. – наукове керівництво, постановка задачі та концептуальне обґрунтування; Головка Л.Ф. – аналіз та обговорення результатів; Романенко В.В. – проведення ливарних досліджень; Свічкарь І.В. – дослідження корозійних властивостей.

37. Салій С. С., Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощицин М. С. Експериментальні дослідження отримання біметалів лазерно-ливарним методом з попередньою підготовкою поверхні основи біметалу. *XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*. Київ, 2020.

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено експериментальні дослідження впливу попередньої підготовки поверхні основи біметалу на якість металургійного з'єднання при лазерно-ливарному методі виготовлення, здійснено аналіз мікроструктури та механічних властивостей отриманих зразків.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – наукове керівництво та концептуальне обґрунтування; Романенко В.В. – розробка параметрів ливарного процесу; Блощицин М.С. – підготовка матеріалів та аналіз отриманих результатів.

Публікації, що додатково відображають результати дисертації

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

Особистий внесок здобувача: Дисертантом проведено експерименти з лазерного формування регулярного макрорельєфу на поверхнях нікелевого сплаву та досліджено параметри ливарного процесу (температурні режими заливки сталі, співвідношення фаз); здійснено аналіз мікроструктури, фазового складу та дифузійних процесів у перехідній зоні методами XRD та SEM/EDS.

Внесок співавторів: Головка Л.Ф. – загальне наукове керівництво, концептуальне обґрунтування та редакція монографії; Романенко В.В. –

розробка конструкцій ливарних систем та дослідження ливарних процесів; Блощин М.С. – проведення фізико-хімічних досліджень та аналіз результатів; Кагляк О.Д. – металографічний аналіз структур та їх інтерпретація; Савченко О.А. – розробка методик контролю якості та оформлення результатів; Свічкарь І.В. – дослідження параметрів індукційного нагрівання та оформлення матеріалів.

Відомості про апробацію результатів дисертації

1. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», 2017 р., м. Київ — опубліковано тези.
2. XVIII-Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2017 р., м. Київ — опубліковано тези.
3. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2018», 2018 р., м. Київ — опубліковано тези.
4. VIII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 2018 р., м. Чернігів — опубліковано тези.
5. VIII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (друга доповідь), 2018 р., м. Чернігів — опубліковано тези.
6. IV-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації - 2018», 2018 р., м. Херсон — опубліковано тези.
7. IV-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації - 2018» (друга доповідь), 2018 р., м. Херсон — опубліковано тези.
8. XIX-Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2018 р., м. Київ — опубліковано тези.

9. XXIV Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», 28 травня 2019 р., м. Київ — опубліковано тези.
10. XXIV Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (друга доповідь), 28 травня 2019 р., м. Київ — опубліковано тези.
11. X Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 03 червня 2019 р., м. Херсон — опубліковано тези.
12. X Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (друга доповідь), 03 червня 2019 р., м. Херсон — опубліковано тези.
13. X Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (третя доповідь), 03 червня 2019 р., м. Херсон — опубліковано тези.
14. XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 10–13 вересня 2019 р., м. Київ – м. Херсон — опубліковано тези.
15. XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (друга доповідь), 10–13 вересня 2019 р., м. Київ – м. Херсон — опубліковано тези.
16. Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні – 2019», 15 травня 2019 р., м. Київ — опубліковано тези.
17. IX міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів» (LTWMP), 09–13 вересня 2019 р., м. Одеса — опубліковано тези.
18. IX міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів» (LTWMP) (друга доповідь), 09–13 вересня 2019 р., м. Одеса — опубліковано тези.

- 19.V Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу - 2019», 10–15 вересня 2019 р., м. Херсон — опубліковано тези.
- 20.VII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 09 жовтня 2019 р., м. Київ — опубліковано тези.
- 21.Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2020», 2020 р., м. Київ — опубліковано тези.
- 22.X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 2020 р., м. Чернігів — опубліковано тези.
- 23.X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (друга доповідь), 2020 р., м. Чернігів — опубліковано тези.
- 24.X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (третя доповідь), 2020 р., м. Чернігів — опубліковано тези.
- 25.X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (четверта доповідь), 2020 р., м. Чернігів — опубліковано тези.
- 26.XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2020 р., м. Київ — опубліковано тези

ДОДАТОК Б


**Товариство з обмеженою відповідальністю
«ОЛІМП ГРУПП»**

02094, м. Київ, бульвар Верховної Ради, буд. 22.
тел./факс +380(44)550-50-66.
Код ЄДРПОУ 41134331,
Індивідуальний податковий номер 411343326531
п/р 26008651794700 в ПАТ «УКРСИББАНК» МФО 351005

№12/11 від «12» листопада 2019 р.

Проректору з наукової роботи
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»
м. Київ, пр. Перемоги, 37

Компанія ТОВ «Олімп групп» займає провідне місце на ринку будівництва промислових об'єктів та впровадження передових інженерних технологій в цій галузі. Велику увагу наша фірма приділяє ознайомленню та вивченню передових розробок в сфері виготовлення нових та оригінальних матеріалів та металів для потреб будівництва.

Ми мали можливість ознайомитися з розробками, які проводить механіко-машинобудівний інститут КПІ по розробці біметалічних матеріалів, які широко застосовуються як в промисловості, так і в будівництві. Вважаємо, що виконані роботи, які захищені багатьма патентами України, знайдуть широке впровадження в цих галузях.

Особливо хочемо відмітити, що дуже зацікавлені в створенні біметалів складу «алюміній - мідь», що знайдуть застосування при виготовленні вентиляційних систем та систем кондиціонування.

З повагою,

Директор ТОВ «Олімп групп»



Ілляшенко С.В.



ТОВ «Компанія Сіайті»
Код ЄДРПОУ 38799735 Свідоцтво ПДВ № 200132865
Р/Р 26008453875300 в ПАТ «Укрсиббанк» МФО 351005

№12/1 від «12» 11.2019 р.

Керівництву

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»,

м. Київ, пр.. Перемоги, 37

ТОВ «КОМПАНІЯ СІАЙТІ» велику увагу приділяє ознайомленню з передовими розробками в сфері виготовлення нових та оригінальних технологій та матеріалів для потреб будівництва.

З великою увагою ознайомилися з роботами, які проводить Київський політехнічний інститут по розробці біметалів. Ці матеріали широко можуть бути застосовані як в промисловості, так і в будівництві.

Хочемо відмітити, що особливий інтерес викликало створення біметалів, до складу яких входять конструкційні сталі з покриттям їх нержавіючими або кольоровими компонентами, що знайдуть широке застосування при виготовленні інженерних комунікацій в будівництві.

Вважаємо, що виконані роботи, які є оригінальними та захищені патентами України, мають широку потребу для впровадження. Плануємо їх всебічне використання в своїй діяльності.

Директор ТОВ «КОМПАНІЯ СІАЙТІ»



Смолко Я.В.

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ АВТОЗАВОД

14007, Україна, м. Чернігів,
 проспект Миру, 312
 тел./факс: +3804622 53-338
 email: avtocher@chad.cn.ua
avtocher@chad.cn.ua



14007, Ukraine, Chernigiv,
 Myru Avenue, 312
 tel./fax: +3804622 53-338
 email:

Вих. № 3002
 від. «27» 11 2019 р.

Проректору з наукової роботи

Національного технічного університету України
 «Київський політехнічний інститут ім.

І.Сікорського»

м. Київ, пр. Перемоги, 37

Організація ТОВ «Чернігівський Автозавод» велику увагу приділяє ознайомленню з передовими розробками в сфері виготовлення нових та оригінальних технологій та матеріалів для потреб виготовлення автомобілів та комплектуючих до них.

Велику увагу та зацікавленість викликали розробки, що проводить Київський політехнічний інститут, по виготовленню біметалічних матеріалів, які широко можуть бути застосовані в автопромисловості.

При цьому хочемо відмітити, що особливий інтерес викликають біметали, до складу яких входять конструкційна сталь з їх нержавіючим та алюмінієвим покриттям, що знайдуть широке застосування при виготовленні кузовних компонентів та інших частин автомобілів.

Вважаємо, що розроблені оригінальні технології виготовлення таких біметалів, що захищені патентами України, мають широку потребу для впровадження. Плануємо всебічне застосування цих розробок на нашому підприємстві.

Генеральний директор



В.В. Купцов

