

# Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів

С. С. Салій • Л. Ф. Головка • А. Л. Головка • В. В. Романенко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 11 February 2020 / Accepted: 24 February 2020

**Анотація.** Наведено аналіз існуючих способів та представлено новий комбінований процес виготовлення біметалу, відповідно з яким на поверхні його функціональної складової шляхом лазерної, або механічної обробки виготовляється спеціальний регулярний макрорельєф. Підготовлена таким чином складова біметалу розміщується в піщаній формі, розміри порожнини якої відповідають його розмірам. На поверхню функціональної складової через отвір в формі зі спеціального пристрою, з визначеною витратою подається розплав конструктивної складової біметалу. Досліджувався процес виготовлення біметалу, функціональною складовою якого був нікелевий сплав, а конструктивною - сталь Ст.3.

Математичним моделюванням визначено закономірності розподілу температур по висоті фактури макрорельєфу при їх нагріванні розплавом конструктивної складової біметалу у залежності від їх геометричних параметрів, теплофізичних характеристик матеріалу, схем та умов заливки. Металографічними дослідженнями встановлено умови, при яких між складовими біметалу утворюється металургійний зв'язок та забезпечується висока міцність їх з'єднання. Доведено, що для забезпечення високої міцності зчеплення складових біметалу і рівномірності її розподілу по площині з'єднання, потрібно щоб висота макроступів і крок між ними мали раціональну величину. В даному випадку при поперечних розмірах виступів (1x1) мм раціональні розміри висоти виступів становлять 0,5 мм, кроку між ними - 1,5 мм. Продемонстровано високу ефективність нової, інноваційної комбінованої технології виготовлення біметалів.

**Ключові слова:** біметал, комбінований процес, регулярний макрорельєф, розплав, функціональна конструктивна складова, математичне моделювання, металургійний зв'язок, міцність зчеплення, мікроструктура, розподіл елементів, фазовий склад.

## Вступ

У сучасному машинобудуванні спостерігається помітний, постійно зростаючий попит на різні метали та їх сплави зі спеціальними властивостями, такими як абразивна зносостійкість, стійкість до корозії в агресивному середовищі, висока зносостійкість при підвищених температурах, дії надшвидкісних газових потоків, високо напірних струменів рідини і таке інше. Деталі машин, що працюють в таких екстремальних умовах виготовляються з дорогих високолегованих залізвуглецевих сталей, сплавів на основі Ni, Co, Ti й інших елементів. Значна частина серед них в процесі експлуатації піддається зношуванню, утворюючи пари тертя або внаслідок дії гідро-або газоабразивних струменів. При цьому критична величина зношування деталей у залежності від багатьох факторів змінюється досить в широкому діапазоні значень – від 0.1 мм до кількох мм, але не перевищує 4–5 мм. Тому економічно доцільно такі деталі виготовляти двошаровими із біметалів, що містять зовнішній функціональний шар і основний конструктивний. При цьому для забезпечення високих експлуатаційних характеристик між складовими біметалу повинна бути висока міцність зчеплення, що досягається наявністю між ними металургійного зв'язку.

У зв'язку з цим, пошук і розробка нового високопродуктивного й економічно ефективного процесу виготовлення біметалів різноманітного призначення є актуальним і важливим завданням науки і промисловості.

## Аналіз літературних даних, постановка задачі

Виготовлення біметалів і різноманітних виробів з них давно привертало велику увагу як виробників, так і споживачів продукції, в першу чергу військового призначення. На сьогодні розроблено і використовується у промисловості велика кількість різних способів виготовлення біметалів, основні з яких наведені на рис. 1 та представлені в багатьох публікаціях [1–12]. Виконуючи їх аналіз з точки зору меж застосування,

продуктивності, якості, собівартості, можливості автоматизації й таке інше наведені способи доцільно розділити на дві групи (рис. 1).

Першу групу утворюють способи з'єднання складових біметалу, при яких температура в зоні контакту не перевищує температуру їх плавлення.

Найбільш поширеними з них є способи з'єднання в наслідок гарячого або холодного пластичного деформування складових при обробці тиском, що забезпечує міцне механічне їх зчеплення [1]. Такі способи широко застосовуються для виготовлення біметалевих трубчатих конструкцій, менше для плоских, особливо для виробів, що працюють при дії знакозмінних навантажень.



Рис. 1. Найбільш поширені способи виготовлення біметалів

Набули розвитку технології виготовлення біметалів з використанням зварювання тертям [2]. 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 [3]. Значне поширення у промисловості України набула технологія зварювання складових біметалу вибухом, яка забезпечує під дією імпульсу тиску утворення хвилеподібної зони з'єднання [4]. 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.

Способи виготовлення біметалів, характерною рисою яких є наявність між їх складовими шару сплавлення, утворюють другу групу (рис. 1). Найбільш відоме виготовлення біметалів з використанням процесів лиття, які почали застосовувати у промисловості раніше інших, але вони енергоємні і мають багато інших недоліків [5]. Значний поштовх розвитку процесів виготовлення біметалів надали технології електродугового наплавлення, у тому числі порошковими стрічками, розроблені в Інституті електрозварювання ім. С.О. Патона і ТОВ Стіл Ворк» [6]. До головних недоліків цих технологій слід віднести низьку якість поверхні наплавленого шару, яка потребує додаткової механічної обробки, порівняно високу собівартість процесу виробництва. Конкурентоспроможними є способи електрошлакового наплавлення рідким складовим біметалу, що дозволяють отримувати якісне з'єднання шарів з мінімальним підплавленням основного металу [7]. Виготовлення біметалів плазмовим 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 плазмово-ливарний спосіб виготовлення біметалу, що передбачає заливку розплаву однієї із його складових на попередньо розігрітій плазмовим 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.

### Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка, дослідження та апробація комбінованого способу виготовлення біметалевих матеріалів з використанням спеціальної лазерної або плазмово-механічної обробки однієї із поверхонь їх складових та ливарного процесу.

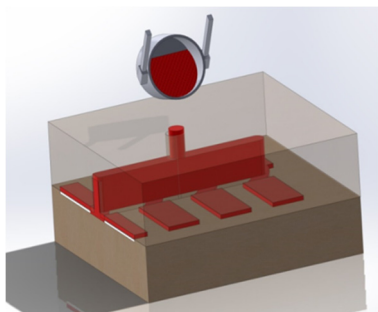
Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- розробити новий високопродуктивний процес виготовлення біметалевих матеріалів, визначити його основні фактори і параметри;
- виконати моделювання процесу нагрівання виступів певної форми і розмірів функціональної складової біметалу при їх заливанні розплавом другої конструктивної складової.
- дослідити процес формування біметалу, виконати металографічний аналіз зон сплавлення та встановити технологічні закономірності їх утворення.

### Розробка високопродуктивного процесу виготовлення біметалевих матеріалів та його моделювання

З метою удосконалення відомих способів виготовлення біметалів, пропонується процес, що дозволяє отримувати шар сплавлення складових, товщина і властивості якого забезпечують високу міцність їх зчеплення та унеможливує 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.



**Рис. 2.** Схема заливки конструктивної складової біметалу на поверхню його функціональної заготовки

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 рідкої і твердої складових біметалу за допомогою методу рухомої границі відповідно до задачі Стефана в програмному пакеті “Comsol Multiphysics” v.5.5. Даний процес адаптований у відповідності із оригінальними дослідженнями в [13, 14].

Об'єктом моделювання була двовірна 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.

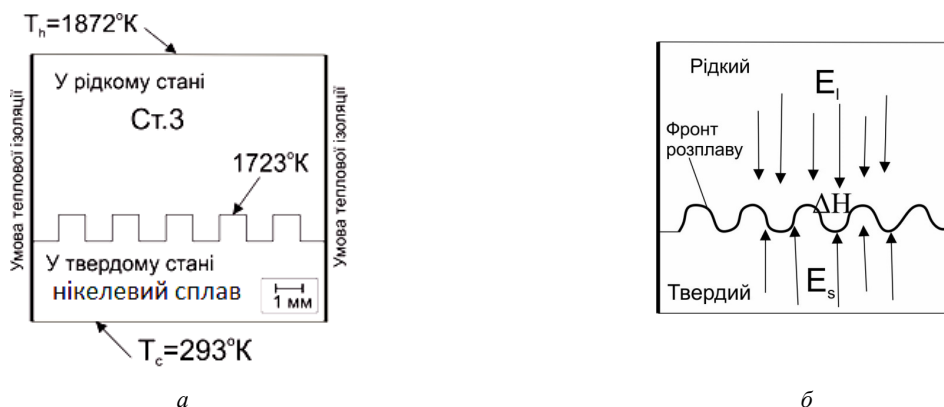


Рис. 3. Геометрія і граничні умови на межі та теплові потоки навколо неї на момент початку дії розплаву

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 (1):

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \alpha \Delta T), \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт об'ємного розширення,  $\Delta T = T - T_0$  – відхилення температури від рівноважного стану,  $\rho_0$  – густина рідини розплаву при деякій рівноважній температурі  $T_0$ . Оскільки  $\alpha$  і відхилення температури зазвичай відносно невеликі, то лінійне наближення володіє прийнятною точністю в більшості досліджуваних задач.

Таблиця 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):

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

де  $v_{1 \rightarrow 2}$  – швидкість границі розділу фаз (м/с),  $q_{im}$  – густина теплового потоку Вт/м<sup>2</sup>,  $\Delta H_{1 \rightarrow 2}$  – 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. 3, а, представляє собою квадрат з довжиною сторони 10 мм, заповнений відповідно двома матеріалами.

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 теплоізоляовані. Початковий розподіл температур змінюється лінійно у вертикальному напрямку, як показано на рис. 3-від гарячої до холодної границі-зверху вниз,

$$T_h - X_g / 0,1[m] * (T_h - T_c), \quad (3)$$

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

Основна ідея наближення полягає в особливості врахування 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:

$$\rho_0 \Delta H v \cdot n = (E_1 - E_s) \cdot n, \quad (4)$$

де  $n$  – вектор нормалі до фронту,  $E_1$  і  $E_s$  – теплові потоки, які надходять з рідкої та твердої фаз ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) (рис. 3, б).

Вираз  $(E_1 - E_s) \cdot n$ , залучений в рівнянні 4, більш точно оцінений через множник Лагранжа для температури,  $T_{lm}$ . Ця змінна доступна, коли в розрахунковій області COMSOL Multiphysics включений Weak Constraint, як у випадку з фіксованими обмеженнями температури на передньому фронті плавлення.

Для побудови сітки і отримання більш точного вирішення поставленого завдання було вибрано алгоритм її адаптації (рис. 4).

Температура в зоні виступів знаходиться в межах  $1740\text{--}1750^\circ\text{K}$ . З 12 с по 20 с процес дещо уповільнюється, границя відносно початкової температури починає рухатися повільно з швидкістю  $1\text{--}1,5$  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. 5 і 6 показана еволюція поля температури і геометрії міжфазної границі при взаємодії двох рідкої та твердої фаз компонентів досліджуваної області у різні моменти часу. Починаючи з 4 секунди температура на поверхні виступів перевищує температури плавлення твердого компоненту ( $1728^\circ\text{K}$ ) і відбувається активна деградація профілю виступів, яка триває до 12 с.

На рис. 7 показано розподіл швидкості поля температури в рідкій області в різні моменти часу, а відповідний профіль температури для нього представлено на рис. 5, 6. Наведене свідчить тому, що вже на початку процесу ( $t = 1\text{--}4$  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.

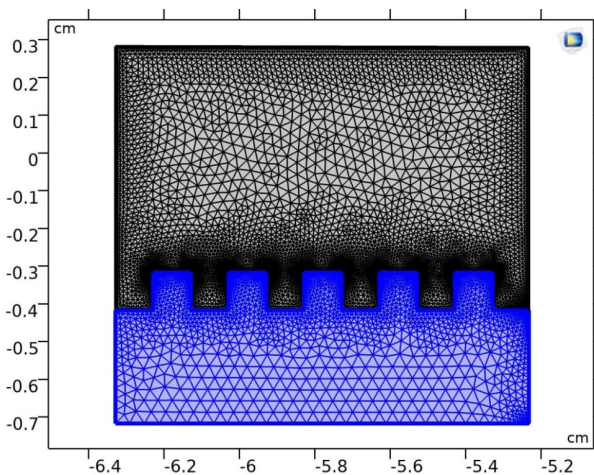


Рис. 4. Адаптивна сітка на межі фазових перетворень

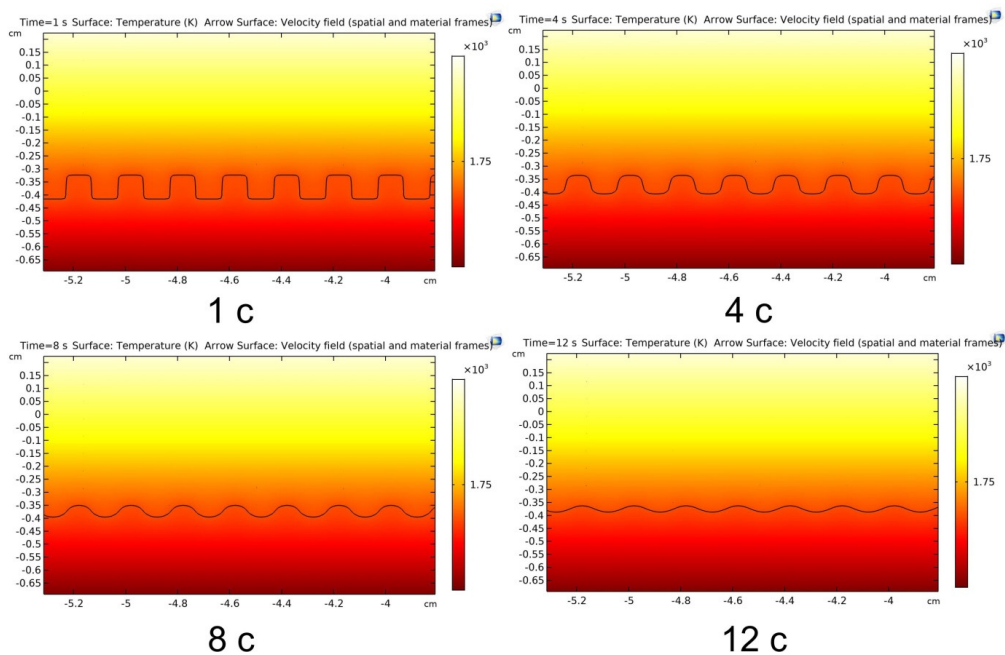


Рис. 5. Зміна температурного поля і межі фаз середовищ в різні проміжки часу

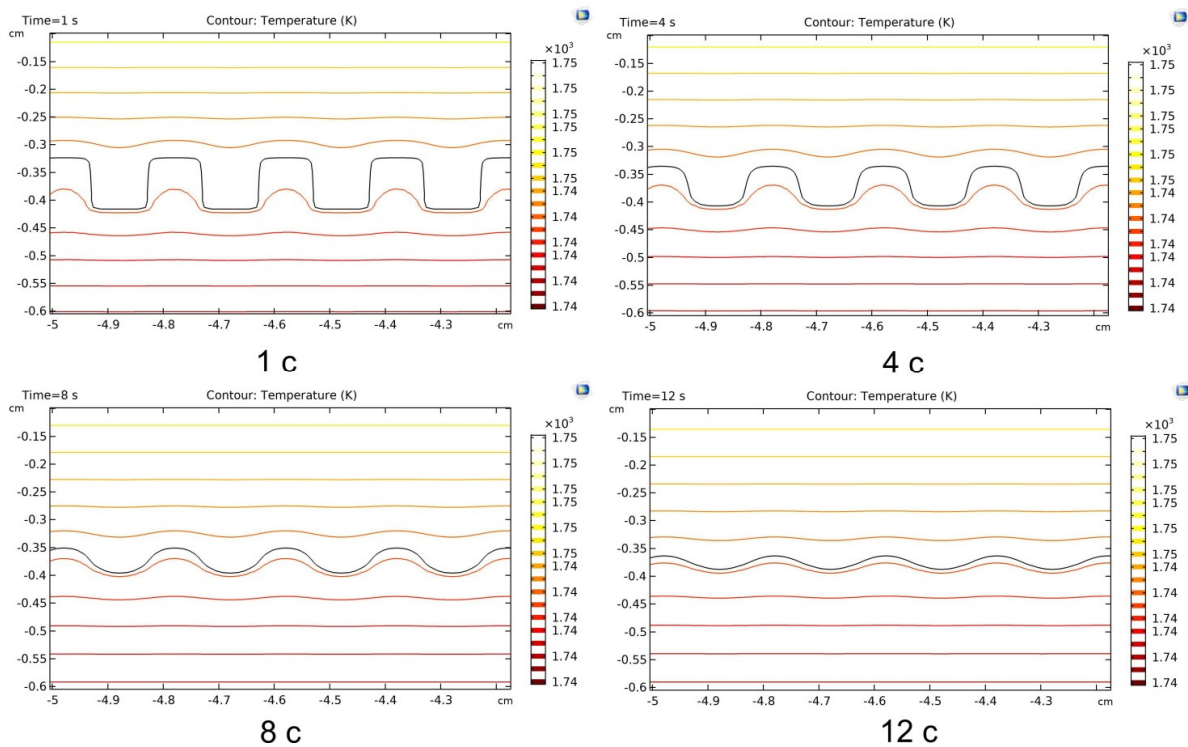


Рис. 6. Температурні контури теплових потоків та межа фаз в області розрахунку в різні моменти часу

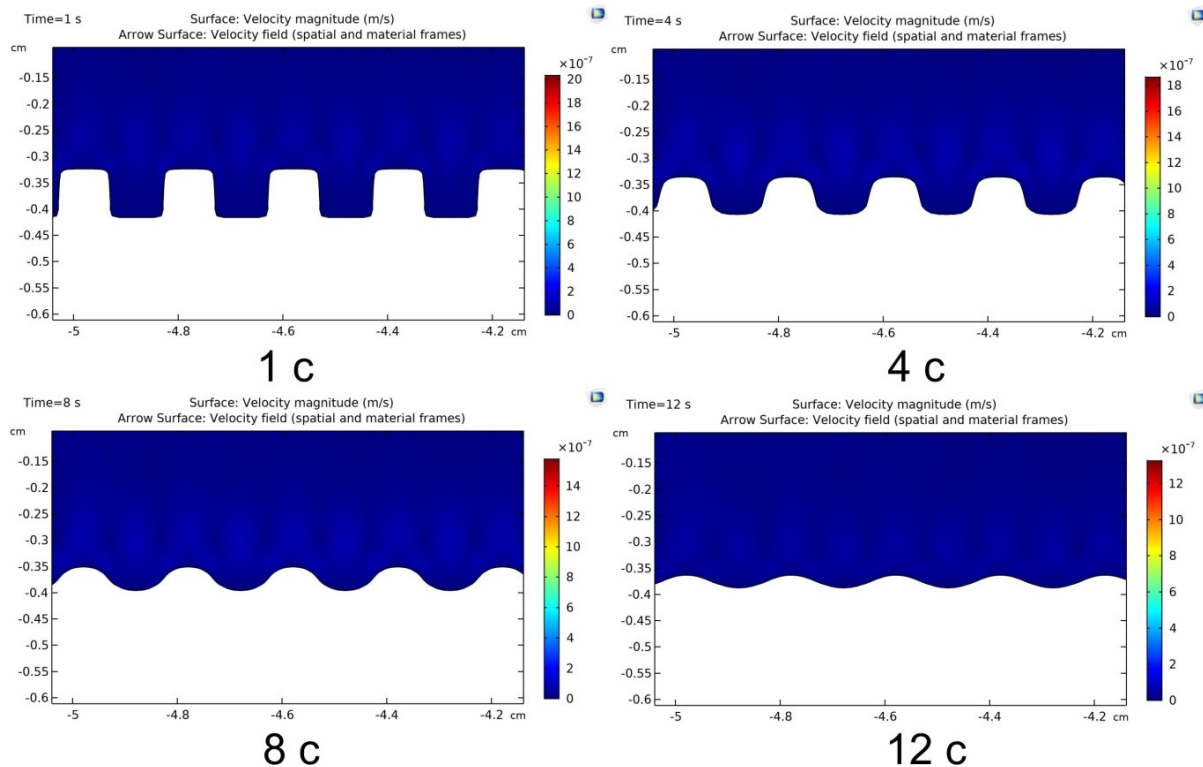


Рис. 7. Вигляд швидкості теплового потоку біля границі розподілу фаз в області визначення

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

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

#### Методики досліджень та матеріали процесу виготовлення біметалевих матеріалів комбінованим способом

Експериментальні дослідження проводились на зразках із нікелевого сплаву, що представляли собою функціональну складову майбутнього біметалу, з розмірами 100x50x4 мм, хімічний склад якого наведено у табл. 2. 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 1x1 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. 8).

Другою конструктивною складовою біметалу було обрано вуглецеву сталь Ст.3, хімічний склад якої наведено у табл. 2.

Зразки з нікелевого сплаву розміщували у піщаній формі, як це показано на рис. 9, нагрівали до температури 300 °C та витримували в печі 3 години. Розплав конструктивної складової біметалу сталі Ст.3, перегрітої до температури 1600 °C, через окрему ливникову систему подавався на поверхню зразків. Після заливки зразки разом з формою охолоджувались на протязі 4 годин. Концентрація вуглецю в сталі Ст.3 становила 0,30 мас. %.

Хімічний склад нікелевого сплаву і вуглецевої сталі Ст.3, як функціональної і конструктивної складових біметалу, у %

Елемент / Матеріал	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Ti	Al	Fe	V
Нікелевий сплав	-	0.34	0.1	23.5	основа	1,23	13,7	0,35	0,49	3,1	-
Сталь Ст.3	0.3	0.33	0.4	0.3	0.1	0,033	-	-	-	основа	0,05

Зразки біметалів після охолодження відрізаються від ливника та піддавались механічним випробуванням на зріз та відрив. Отримані біметали, які пройшли механічні випробування і залишилися нерозшарованими розрізалися електроіскровим способом.

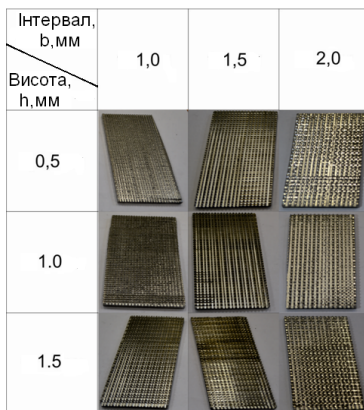


Рис. 8. Зразки з нікелевого сплаву з нанесеним макрорельєфом

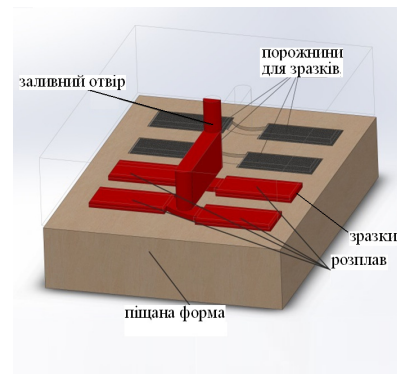


Рис. 9. Піщана форма зі зразками із нікелевого сплаву і нанесеним розплавом сталі Ст.3

Для виявлення мікроструктури зі зразків виготовлялися мікрошліфи, які піддавались травленню спеціальним розчином “Мураками” та 3 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті. Потім шліф промивали водою, спиртом і просушували фільтрувальним папером.

Для визначення фазового складу отриманих біметалів проводився рентгеноструктурний аналіз з використанням “ $\Theta$ - $2\Theta$ ” методу на рентгенівському дифрактометрі Rigaku Ultima IV 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-2с; 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.

Особливості формування зони з'єднання складових біметалу вивчалися із застосуванням електронного мікроскопа РЕМ-1061 з системою енергодисперсійного мікроаналізу (EDX). Основні характеристики приладу: вакуум до  $5 \times 10^{-6}$  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.

Дослідження фізико-механічних властивостей зразків біметалів проводилось на приладі “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 і виконувався автоматично з використанням програмного забезпечення приладу, що базується на методі Олівера і Фара, який прийнятий у якості міжнародного стандарту.

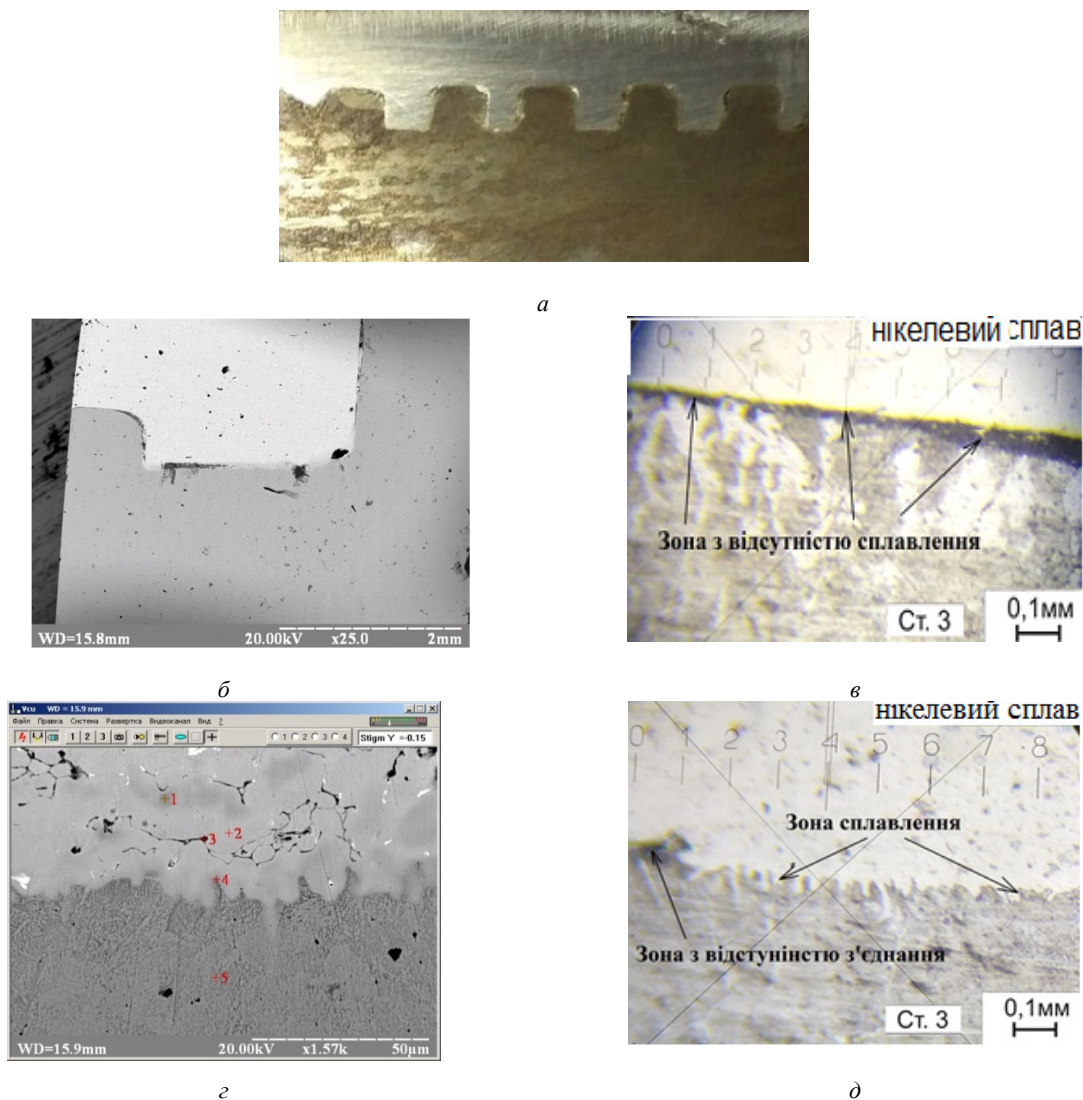
### Результати дослідження та їх обговорення

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 розплаву 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.

На рис. 10 представлено фотографії макро-та мікроструктур шліфів поперечного перерізу ділянок зразка біметалу з макрорельєфом,  $b \times h = (2 \times 1,5)$  мм, розташованого поряд з ливником. Як видно з наведених фотографій розплаву сталі Ст.3 достатньо щільно заповнює проміжки між виступами у нікелевому сплаві (рис. 10, а).



**Рис. 10.** Фотографії мікрошліфа поперечного перерізу 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 (а) та мікроструктур зон з'єднання (б) з механічним контактом (в) і металургійним зв'язком (г, д)

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 обумовленою цим, адгезією (рис. 10, б, в). Невелику частину рівномірно розташованих вздовж зони контакту (1 %) становлять порожнини.

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. 10, г, д). В таблиці 3 наведено вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення і в закристалізованому шарі сталі Ст.3, як це показано на рис. 10, г.

Вміст легуючих елементів в різних ділянках зони сплавлення нікелевого сплаву і сталі Ст.3 (b×h = (2x1,5) мм)

	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

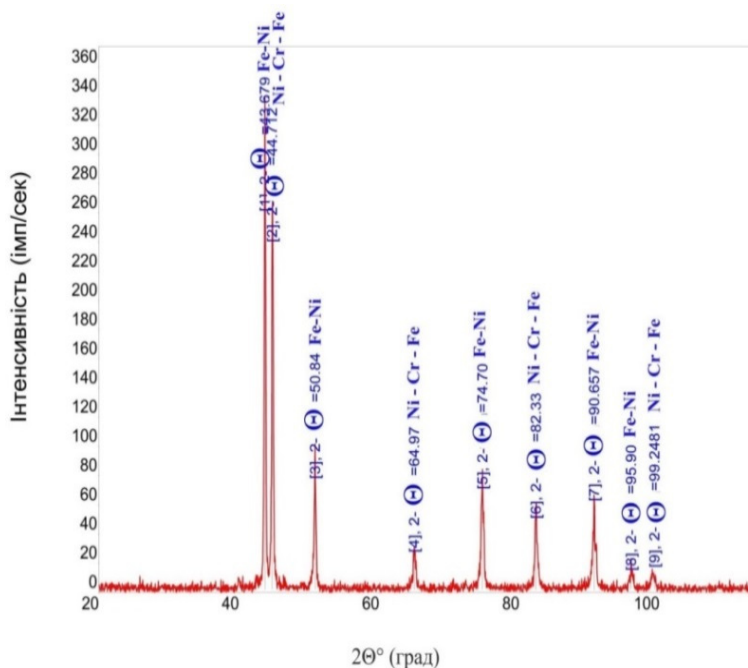


Рис. 11. Дифрактограма перехідного шару біметалу “нікелевий сплав-сталь Ст.3” з макрорельєфом на поверхні сплаву b×h = (2x1,5) мм

На рис. 11 наведено дифрактограму, зняту з ділянки поперечного перерізу біметалу діаметром 6 мм симетричну відносно умовної лінії з’єднання.

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 (тетрааеніту) – 10,9 %.

Досліджувались зразки біметалів, функціональні складові яких мали інші параметри макрорельєфів: b×h = (1,5×0,5) мм і (1,5×1,0) мм.

На рис. 12, 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.

Наведене свідчить, що виступи на функціональній складовій практично повністю розплавилась, внаслідок чого утворився розчин нікелевого сплаву у вуглецевій сталі.

Границя розділу розмита і має хвилясту форму, що обумовлено геометрією виступів, які були на поверхні нікелевого сплаву до взаємодії з розплавом. На зразках з виступами, які мали більшу висоту (1 мм), хвилястість зон сплавлення має більшу амплітуду, у певній мірі відтворюючи профілі виступів.

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

На фотографіях мікроструктур чітко виділяються два шари. У верхній її частині розташований шар, мікроструктура якого практично не проявляється при обробці звичайними реактивами і належить вона нікелевому сплаву. Межує з ним ферито-перлітна структура вуглецевої сталі Ст.3 (рис. 12, б, в, г). При збільшенні на межі зі структурою вуглецевої сталі і на окремих її ділянках проявляються скупчення зерен білого кольору і різних розмірів, які також погано піддаються травленню і містять підвищену кількість Cr, Ni і W (рис. 12, д табл. 4).

Значний інтерес представляють мікроструктури зон сплавлення при різних величинах збільшення, що представлені на рис. 12, б, в, г, д.

Звертає на себе увагу наявність в світлих зонах структури ділянок білого кольору, які містять підвищену кількість Ni і W (табл. 4).

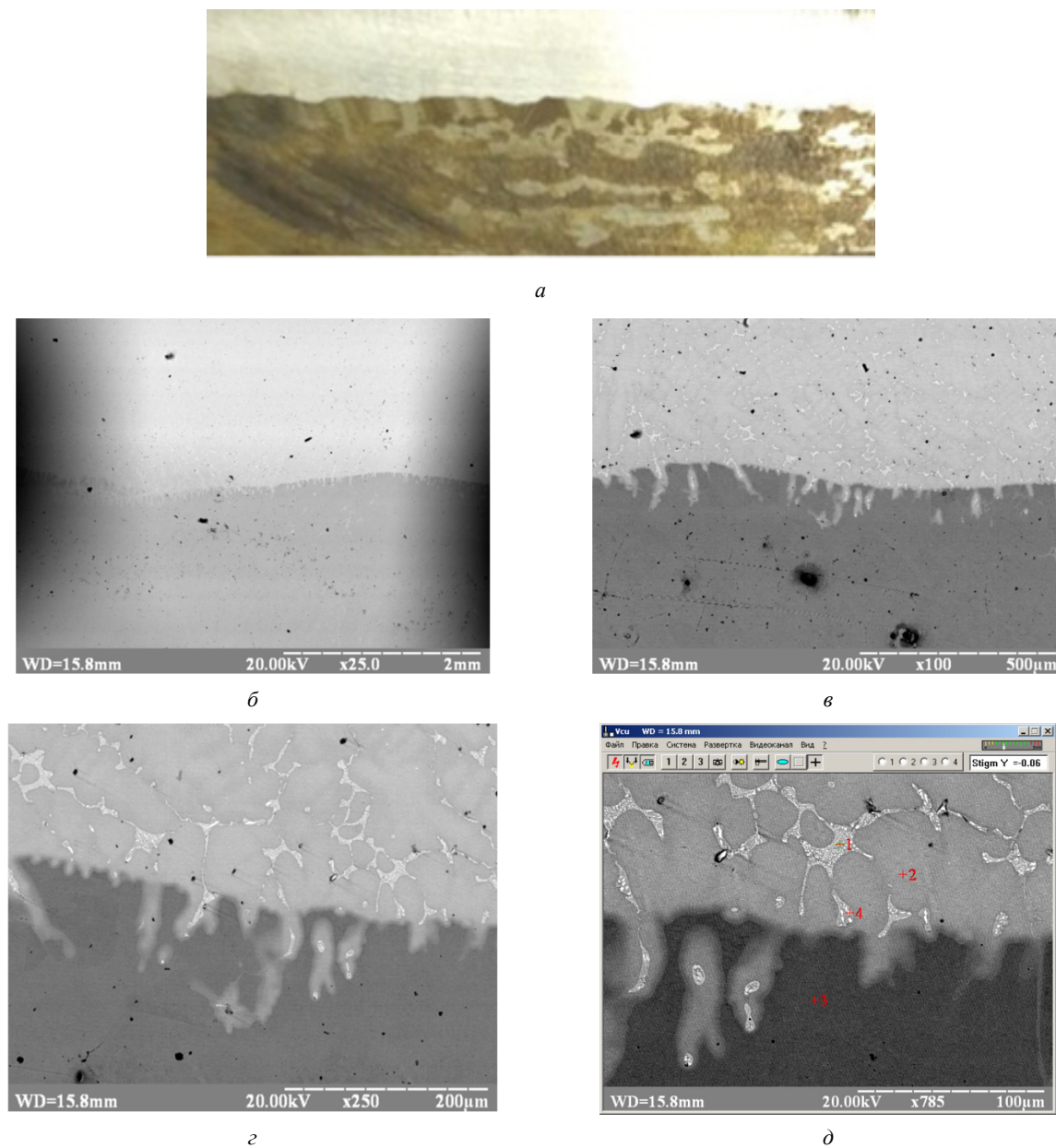


Рис. 12. Фотографії шліфа поперечного перерізу зразка  $b \times h = (1 \times 0,5)$  мм біметалу нікелевий сплав–Ст.3, з висотою виступів 0,5 мм і кроком 1,0 мм (а) та мікроструктур зон сплавлення зі збільшення  $\times 25$ (б),  $\times 100$ (в),  $\times 250$ (г) і  $\times 785$ (д)

Таблиця 4

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

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

На рис. 13 наведено дифрактограму, яка, як і у попередньому випадку, знята з ділянки зразка, розташованої по центру зони з'єднання нікелевого сплаву з макрорельєфом  $1,5 \times 0,5$  зі сталю Ст.3.

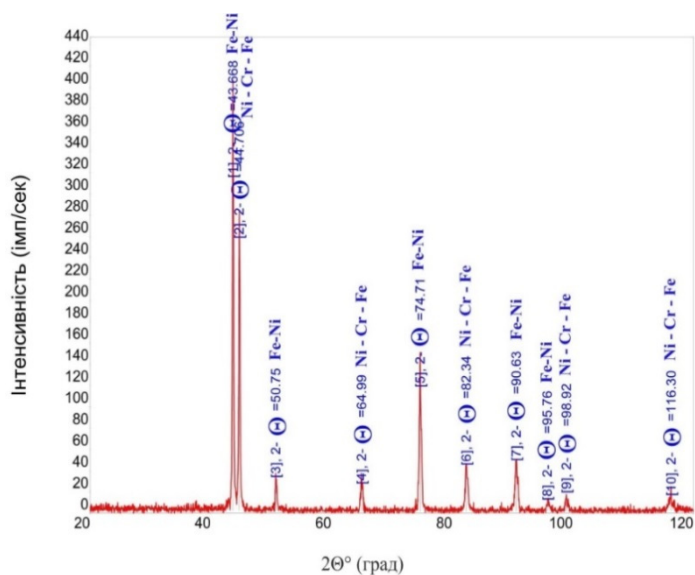


Рис. 13. Дифрактограма перехідного шару біметалу “нікелевий сплав-сталь Ст.3” з макрорельєфом (1,5x0,5) мм на поверхні функціональної складової сплаву

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 (тетрагасніту) 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.14 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.

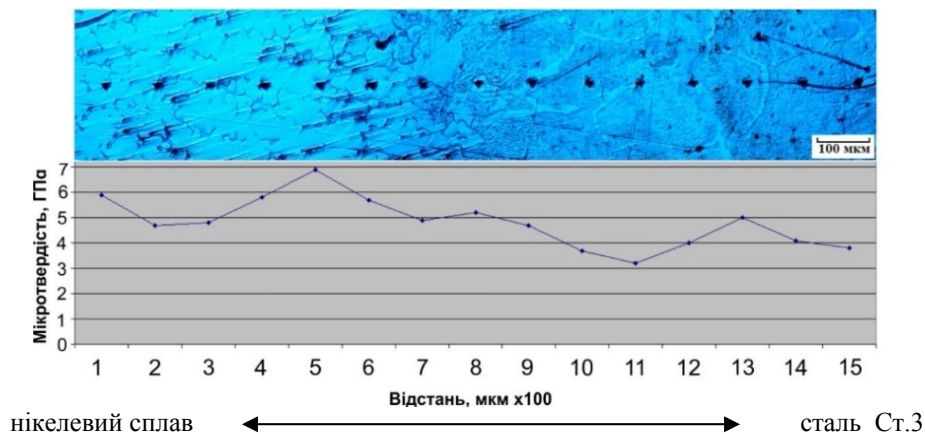


Рис. 14. Розподіл мікротвердості поперек зони сплавлення нікелевого сплаву і вуглецевої сталі Ст.3

Аналіз всієї кількості зразків отриманого біметалу запропонованим способом показав, що основним їх недоліком є нерівномірність з’єднання по площині контакту складових та недостатня керованість процесом його формування.

На рис. 15 наведено залежності відсотку площі з’єднання складових біметалу по відношенню до загальної площі контакту від кроку між виступами макрорельєфу (*a*) і його висоти (*b*). Наведене свідчить тому, що максимальна ефективність розробленого процесу виготовлення біметалу обраним способом досягається при висоті макровиступів 0,5 мм і кроку між ними 1,5 мм.

Отримані в роботі результати дозволяють сформуванати шляхи подальшого удосконалення розробленого процесу виготовлення біметалів оптимізацією схеми заливки його конструкційної складової.

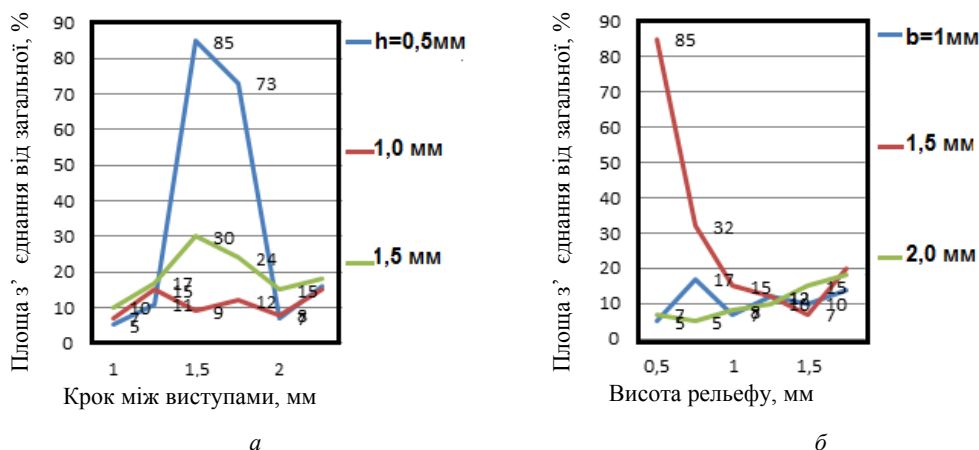


Рис. 15. Залежність площі з'єднання компонентів біметалу від геометричних параметрів рельєфу

### Висновки

Запропоновано і експериментально реалізовано оригінальний процес виготовлення біметалів, який не має аналогів, відрізняється високою продуктивністю і якістю виробів при конкурентоспроможній собівартості, можливістю повної його автоматизації, організації як малосерійного так крупносерійного виробництва.

Моделюванням визначено умови, при яких відбувається поетапне розплавлення вершин виступів з різними геометричними параметрами на функціональній складовій при їх нагріванні розплавом конструкційної складової. Співставлення результатів моделювання з даними вибіркового експериментального дослідження показало достатню міру достовірності використаної математичної моделі. Розбіг отриманих результатів не перевищував 15%. Зокрема, як при теоретичних, так і експериментальних дослідженнях спостерігався вплив величини заглиблень та рівень перегрівання розплаву на ступінь затікання розплаву матеріалу і швидкість його охолодження.

Встановлено, що вирішальну роль на формування високоякісної структури біметалу з плавним градієнтом властивостей відіграють раціональні значення висоти виступів і величини кроку між ними, які в даному випадку становлять 0,5 мм і 1,5 мм відповідно.

Доведено, що в зоні сплавлення складових біметалу нікелевого сплаву і сталі Ст.3 утворюється перехідний шар, що містить до 86,4% фази Ni-Cr-Fe і фази Fe 0,507-Ni 0,493 (тетратасніту).

### References

1. Розроблення нової технології зварювання тертям з перемішуванням / [М. М. Прокопів, О. В. Харченко, І. В. Цап та ін.]. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – С. 12–18.
2. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник / В. В. Квасницький. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 437 с.
3. Wróbel T. Bimetallic layered castings alloy steel-carbon cast steel / T. Wróbel, M. Cholewa, S. Tenerowicz. // Archives of Foundry Engineering. – 2011. vol. 11. no. 1. – С. 105–107.
4. Wang, T., Liang, C., Chen, Z., та ін. Development of an 8090/3003 bimetal slab using a modified direct-chill casting process. Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – vol. 214, no. 9. – С. 1806–1811. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.029>
5. Панфилов А. И. Перспективы использования биметаллических износостойких листов SWIP в угольной промышленности / А. И. Панфилов, А. В. Копощко, Ю. М. Кусков. // Физико-технические проблемы горного производства. – 2011. – №14. – С. 181–187.
6. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей / [И. Г. Родионова, А. А. Павлов, А. И. Зайцев та ін.]. – Москва: ЗАО Металлургиздат, 2011. – 292 с.
7. Плазменная наплавка высоколегированной стали 10X18H8T на низколегированную сталь 09Г2С / Ю.Д.Щицин, С.Д. Неульбин, П.С. Кучев, И.А. Гилев //Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, №3. — С. 5–13.
8. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом / М. Шмидт, С. В. Курынцев // Автомат. сварка. – 2010. – №6. – С. 30–33.
9. Спосіб одержання зносостійких багаточарових металевих виливків: пат. № 54486 Україна: МПК: B22C 19/00, №u201005922; заявл. 17.05.2010, опуб. 10.11.2010, Бюл.№ 21. 3с
10. Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів: пат. № 96621 України: МПК: B23K 26/352 / № u201409701; заявл. 04.09.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. 5 с.

11. Лазерно-литейный метод получения дисперсно-упрочненных композиционных материалов / А. Н. Тимошенко, В. П. Лихошва, М. И. Голубчик. – Могилев: Машиностроение и металлообработка: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – (Ин-т технологии металлов Нац. акад. наук Беларуси), 2019. – 99–100 с.
12. Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetals / [L. Golovko, S. Salii, M. Bloschchysyn та ін.]. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – С. 47–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139483>
13. Solidification of a pure metal at a vertical wall in the presence of liquid superheat / [F. Wolff, R. Viskanta]. // Int.J. Heat and Mass Transfer, 1988, vol. 31, no. 8. – С. 1735–1744.
14. Alexiades V. Tin melting: effect of grid size and scheme on the numerical solution / V. Alexiades, N. Hannoun, T. Mai. // Fifth Mississippi State Conference on Differential Equations and Computational Simulations, Electronic Journal of Differential Equations. – 2003. – vol.10. – P. 55–69.
15. CFD Module User's Guide [Электронный ресурс] // COMSOL, Inc.. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>.
16. Anup Singh, Alok Kumar, Arvind Kumar. Numerical Modelling of Pure Metal Solidification using OpenFOAM [Электронный ресурс].- 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02101324v2/document>

## Комбинированный лазерно-литейный процесс изготовления биметаллов

С. С. Салий, Л. Ф. Головко, А. Л. Головко, В. В. Романенко

**Аннотация.** Приведен анализ существующих способов и представлен новый комбинированный процесс изготовления биметалла, в соответствии с которым на поверхности его функциональной составляющей путем лазерной или механической обработки изготавливается специальный регулярный макрорельеф. Подготовленная таким образом составляющая биметалла размещается в песчаной форме, размеры полости которой соответствуют его размерам. На поверхность функциональной составляющей через отверстие в форме из специального устройства, с определенным расходом подается расплав конструктивной составляющей биметалла. Исследовался процесс изготовления биметалла, функциональной составляющей которого был никелевый сплав, а конструктивной - сталь Ст.3.

Математическим моделированием определены закономерности распределения температур по высоте фактуры макрорельефа при их нагревании расплавом конструктивной составляющей биметалла в зависимости от их геометрических параметров, теплофизических характеристик материала, схем и условий заливки. Металлографическими исследованиями установлены условия, при которых между составляющими биметалла образуется металлургическая связь и обеспечивается высокая прочность их соединения. Доказано, что для обеспечения высокой прочности сцепления составляющих биметалла и равномерности ее распределения по плоскости соединения, нужно чтобы высота макрорельефов и шаг между ними имели рациональную величину. В данном случае при поперечных размерах выступов (1x1) мм рациональные размеры высоты выступов составляют 0,5 мм, шаг между ними - 1,5 мм. Продемонстрирована высокая эффективность новой, инновационной комбинированной технологии изготовления биметаллов.

**Ключевые слова:** биметалл, комбинированный процесс, регулярный макрорельеф, расплав, функциональная конструктивная составляющая, математическое моделирование, металлургическая связь, прочность сцепления, микроструктура, распределение элементов, фазовый состав.

## Combined laser-foundry manufacturing process of bimetals

Serhii Salii, Leonid Golovko, Alina Golovko, Victor Romanenko

**Abstract.** An analysis of existing methods and a new combined process of bimetallic fabrication are presented, according to which a special regular macro relief is made on the surface of its functional component by laser or mechanical treatment. The bimetallic component thus prepared is placed in sand form, the dimensions of the cavity of which correspond to its dimensions. A melt of the structural component of bimetal is fed to the surface of the functional component through a hole in the form of a special device with a defined flow rate. The process of manufacturing bimetal, the functional component of which was a nickel alloy, and structural – carbon steel St.3

Mathematical modelling and computing determine the patterns of temperature distribution over the height of the projections of the macro relief when they are heated by the melt of the structural component of bimetal, depending on their geometrical parameters, thermophysical characteristics of the material, schemes and conditions of pouring. Metallographic studies have established the conditions under which metallurgical bonds are formed between bimetal components and their bond strength is ensured. It is proved that to insure high bond strength of bimetallic components and uniform distribution over the joint plane, it is necessary that the height of the macro relief and the step between them have the optimum value. In this case, the transverse dimensions of the projections (1x1) mm, the optimal dimensions of the projection height are 0.5 mm, the steps between them - 1.5 mm. The high efficiency of the new, innovative combined technology of bimetal manufacturing has been demonstrated.

**Keywords:** bimetal, combined process, regular macro relief, melt, functional structural component, computational modeling, metallurgical bonding, adhesion strength, microstructure, element distribution, phase composition.

## References

1. Prokopiv, M.M., Kharchenko, O.V., Cap, I.V., Ushhapovs'kyj, Ju.P. and Prys'jazhnyk, P.M. (2015), Rozroblennja novoji tekhnologiji zvarjuvannja tertjam z peremishuvannjam, *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i ghazovykh rodovyshh*, vol. 57, no. 4, pp. 12–18.
2. Kvasnyckyj, V.V. (2003), *Specialjni sposoby zvarjuvannja: Navchalnyj posibnyk*, UDMTU, Mykolajiv, Ukraine.
3. Wróbel, T., Cholewa, M. and Tenerowicz, S. (2011), Bimetallic layered castings alloy steel–carbon cast steel. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 105–107.
4. Wang, T., Liang, C., Chen, Z., and others (2014), Development of an 8090/3003 bimetal slab using a modified direct-chill casting process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 9, pp. 1806–1811.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.029>
5. Panfilov, A.I., Koposhko, A.V. and Kuskov, Ju.M. (2011), Perspektivy ispol'zovanija bimetallicheskih iznosostojkikh listov SWIP v ugol'noj promyshlennosti, *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, no. 14, pp. 181–187.
6. Rodionova, I.G., Pavlov, A.A., Zajcev, A.I. and others (2011), Korroziionno-stojkie bimetally s prochnym sceppleniem sloev dlja neftehimicheskoj promyshlennosti i drugih otraslej, *ZAO Metallurgizdat Moskva*, Moscow, Russia.
7. Shhicin, Ju.D., Neulybin, S.D., Kuchev, P.S. and Gilev, I.A. (2014), Plazmennaja naplavka vysokolegirovannoj stali 10H18N8T na nizkolegirovannuju stal' 09G2S, *Vestnik PNIPU, Mashinostroenie, materialovedenie*, vol. 16, no. 3, pp. 5–13.
8. Schmidt, M. and Kuryncev, S.V. (2010), Poluchenie bimetallicheskih zagotovok s pomoshh'ju lazernoj svarki proplavnym shvom, *Avtomat. svarka*, no. 6, pp. 30–33.
9. Lykhoshva, V.P., Najdek, V.L., Karychkovs'kyj, P.M., Pelikan, O.A., Ghlushkov, D.V. and Nadashkevych, R.S. (2010), Sposib oderzhannja znosostijkykh baghatosharovykh metalevykh vylyvkiv, Ukraine, Pat. № 54486.
10. Romanenko, V.V., Lykhoshva, V.P., Shatrava, O.P., Gholovko, L.F. and Kryvcun, I.V. (2015), Prystrij dlja lazerno-lyvarnogho vygotovlennja bimetaliv, Ukraine, Pat. № 96621.
11. Timoshenko, A.N., Lihoshva, V.P., Golubchik, M.I., (2019), Lazerno-litejnyj metod poluchenija dispersno-uprochnennyh kompozicionnyh materialov, *Mashinostroenie i metalloobrabotka: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. In-t tehnologii metallov Nac. akad. nauk Belarusi*, Mogilev, pp. 99–100.
12. Golovko, L., Salii, S., Bloshchytyn, M., and others (2018), Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetal, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4/1, no. 94, pp. 47–54,  
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139483>
13. Wolff, F. and Viskanta, R. (1988), Solidification of a pure metal at a vertical wall in the presence of liquid superheat, *Int.J. Heat and Mass Transfer*, vol. 31, no. 8, pp. 1735–1744.
14. Alexiades, V., Hannoun, N. and Mai, T.Z. (2003), Tin melting: effect of grid size and scheme on the numerical solution, Fifth Mississippi State Conference on Differential Equations and Computational Simulations, *Electronic Journal of Differential Equations*, Conference, vol. 10, pp. 55–69.
15. COMSOL, Inc.. (2018), CFD Module User's Guide, available: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>. Last accessed 4th April 2020.
16. Anup Singh, Alok Kumar, Arvind Kumar. (2019), Numerical Modelling of Pure Metal Solidification using OpenFOAM, available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02101324v2/document>. Last accessed 4th April 2020.