

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ В ПРОЦЕСІ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ОБ'ЄМНИХ ВИРОБІВ ІЗ АЛЮМІНІЙ-МАГНІЄВОГО СПЛАВУ

Л.М. Лобанов², В.М. Коржик^{1,2}, М.О. Пашин², О.Л. Міходуй², П.Р. Устименко³,
Чжан Юйпэн (Zhang Yupeng)¹, А.О. Альошин², О.М. Войтенко²

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou, 510650, China

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: olga.mikhodui@gmail.com

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.
E-mail: mail@kpi.ua

Розглянуто комбіновану технологію 3D друку, що включає поєднання адитивного (пошарового) наплавлення із електродинамічною обробкою наплавленого шару. На базі математичного моделювання із застосуванням співвідношень Прандтля-Рейса на прикладі алюміній-магнієвого сплаву АМг6 проведено дослідження впливу форми індентора для електродинамічної обробки на розподіл по товщині наплавленого шару основних параметрів та компонент напружено-деформованого стану, зокрема, величини зони пластичних деформацій та напружень, глибини та ширини зони контактної взаємодії в металевому шарі, який взаємодіє із ролик-індентором, що рухається по нормалі до шару зі швидкістю 1, 5 і 10 м/с. Встановлено, що використання ролика із поверхнею контакту, яка має форму напівкола, призводить до практично рівномірного розподілу компонент напружень стиску у наплавленому шарі, значення яких може досягати границі текучості сплаву АМг6. Результати математичного моделювання дають підстави рекомендувати використання електрода у формі напівкола (ЕК) для розробки комбінованих технологій 3D друку об'ємних металевих виробів, які полягають в поєднанні адитивного наплавлення (WAAM, плазмове, мікроплазмове наплавлення, тощо) об'ємного металевих виробів із електродинамічною обробкою кожного наплавленого шару. Бібліогр. 14, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: 3D друк, адитивне наплавлення, технології формоутворення, електродинамічна обробка, алюмінієвий сплав, ударна взаємодія, математичне моделювання, залишкові напруження, пластичні деформації, ролик-індентор, твірна, пружно-пластичне середовище

Вступ. 3D друк (адитивне наплавлення) – метод формоутворення об'ємних виробів на основі цифрових моделей, суть якого полягає у пошаровому відтворенні об'єктів. Використання технологій 3D друку деталей зі сплавів на основі алюмінію є перспективним у інженерній практиці виробництва високотехнологічних відповідальних конструкцій для авіаційної і космічної промисловості. Широке застосування алюмінієвих сплавів продиктовано тим, що вони мають високу хімічну стійкість та краще відношення міцності до питомої ваги серед більшості конструкційних металевих матеріалів [1]. Зазвичай в авіакосмічній галузі промисловості для 3D друку застосовують сплави АК12, АК94, 6061, 7075, AlSi12, AlSi10Mg тощо.

Перспективним напрямом 3D друку є використання зварювальних технологій, таких як пошарове (адитивне) імпульсно-дугове наплавлення шарів із застосуванням дротів в якості формуючого матеріалу (технологія WAAM – Wire Direct Energy Deposition/Wire Arc Additive

Manufacturing), а також плазмове (мікроплазмове) пошарове наплавлення із використанням порошків або дротів в якості присадкових матеріалів, тощо [1, 2]. В даних технологіях матеріал пошарово наплавляється роботизованим маніпулятором (або 3D позиціонером) відповідно до 3D-моделі, в результаті чого отримують тривимірну заготовку для подальшої механічної обробки на верстаті з числовим програмним управлінням (ЧПУ) [3, 4].

Слід зазначити, що, з точки зору безпечної експлуатації конструкцій авіакосмічної техніки, наявність навіть мінімальних дефектів структури 3D друківаних деталей із алюмінієвих сплавів має критично важливе значення для прийняття рішення щодо придатності вказаної технології. З одного боку, існує потреба подрібнення мікроструктури та підвищення втомної міцності деталей, отриманих адитивним наплавленням [4]. З другого боку, в наведених технологіях існують ризики виникнення та потреба усунення такого дефекту, як несутільність матеріалу [5].

Лобанов Л.М. Scopus Author ID 6603876807, Коржик В.М. Scopus Author ID: 7004132288, Пашин М.О. Scopus Author ID 7801572218, Міходуй О.Л. Scopus Author ID 36189953300, Устименко П.Р. Scopus Author ID 57225143676

© Л.М. Лобанов, В.М. Коржик, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, П.Р. Устименко, Чжан Юйпэн (Zhang Yupeng), А.О. Альошин, О.М. Войтенко, 2023

Для вирішення вказаних задач може слугувати електродинамічна обробка (ЕДО), яка є одним з перспективних методів впливу на структуру поверхневих шарів металевих матеріалів і регулювання напружено-деформованого стану (НДС) [6]. Технологія ЕДО може бути реалізована в комбінованому процесі сумісно із адитивним наплавленням. Процес ЕДО друкованого (наплавленого) шару є близьким до такого в умовах зварювання, де виконавчий пристрій (електродна система) рухається позаду за зварювальним пальником на відстані $L_{\text{ЕДО}}$ позаду від нього [7]. Значення $L_{\text{ЕДО}}$ задають температуру $T_{\text{ЕДО}}$ нагріву надрукованого шару в наслідок дії термічного циклу наплавлення, за якої може здійснюватись його електродинамічне оброблення. При цьому ЕДО може підлягати надрукований шар, метал якого знаходиться при підвищеній або кімнатній температурах.

Для дослідження процесу ЕДО використовують експериментальні та чисельні методи аналізу НДС. У роботі [8] розглядалися результати чисельного розрахунку процесу ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною з АМгб при ЕДО на основі рівнянь Прандтля-Рейса [9], що описують рух середовища в плоскій двовимірній постановці у програмному пакеті «ANSYS/LS-DYNA».

Електрод – індентор для ущільнення надрукованого шару методом ЕДО може бути виконаний у вигляді циліндричного ролика із різною формою контактної поверхні, наприклад у вигляді прямої лінії (рис. 1). Результати математичного моделювання впливу різних конструктивних форм індентора при ЕДО на залишкові зварювальні напруження представлені в роботі [10].

Результати роботи [10] довели, що конструктивна форма індентора при ЕДО має суттєвий вплив на розподіли залишкових зварювальних напружень у пластині зі сплаву АМгб. Управління



Рис. 1. Процес 3D друку із пластичним деформуванням наплавленого шару електродинамічною обробкою: 1 – пальник для 3D друку; 2 – циліндричний електрод-індентор із контактною поверхнею у формі прямої лінії; 3 – надрукований шар металу

зварювальними напруженнями, в тому числі формування стискаючих напружень, якраз є одним із важливих завдань при розробці технологій адитивного наплавлення. Враховуючі наведене, слід зазначити, що форма контактної поверхні індентора для ЕДО має впливати на характеристики пластичного деформування металу після 3D друку, яке визначається формуванням у ньому напружень стискування. Таким чином, оптимізація геометричної форми поверхні контакту ролика – індентора для ЕДО, який здійснює обробку наплавленого шару, в цілому може підвищити механічні характеристики надрукованого металу.

Метою роботи є оцінка на основі математичного моделювання впливу форми електрода-індентора на розподіл компонентів пластичних деформацій та залишкових напружень при формуванні об'ємних металевих виробів у комбінованому процесі «адитивне наплавлення – пошарова електродинамічна обробка».

Розрахункова (математична) модель задачі. Математичне моделювання залишкових напружених станів після ЕДО зварних з'єднань докладно розглянуто у роботі [8]. Схему процесу ЕДО металу пластини після 3D друку показано на рис. 2. Електродинамічний тиск при ЕДО на диск 2 із феромагнетика (рис. 2, а) та індентор 4 є результатом взаємодії вихрових струмів із імпульсним магнітним полем індуктора 1 при запуску контактором К розрядного циклу конденсатора С [6].

На Рис. 2 показано, що в процесі ЕДО ударно взаємодіють мідний електрод-індентор 4 та наплавлений шар 5 зі сплаву АМгб товщиною $\delta = 4$ мм та шириною 50 мм, який в розрахунках приймається у вигляді пластини, що розташована на абсолютно жорсткій поверхні (робочому столі 6). При тому електрод-індентор рухається в напрямку (по нормалі) до пластини 5 зі швидкістю V_0 . Геометрична симетрія при моделюванні дозволяє використовувати лише половину пластини та індентора, що розташовані праворуч від лінії електродинамічного тиску V_0 на рис. 2, б, в. При моделюванні прийнято допущення, що поперечний переріз друкованого шару не виходить за межі перерізу пластини.

Таким чином, проведення чисельного розрахунку із застосуванням плоскої двовимірної моделі в лагранжевій постановці буде відповідати моделюванню процесу ЕДО пластини електродом-індентором з профільованою поверхнею контакту у формі напівкола – ЕК (рис. 2, б) або у плоскій формі (ЕП) (рис. 2, в). Різниця двох наведених схем розрахунку полягає у тому, що контакт поверхні ЕК і пластини відбувається в точці (рис. 2, б), а поверхні ЕП і пластини – по лінії (рис. 2, в).

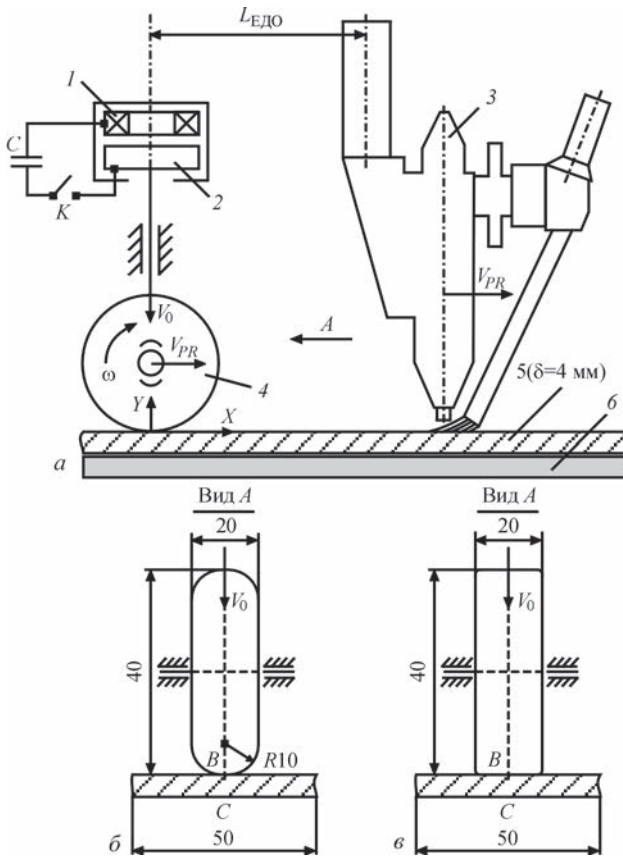


Рис. 2. Процес ЕДО металу пластини після 3D друку: а – схема процесу ЕДО після 3D друку: 1 – індуктор; 2 – диск; 3 – пальник для 3D друку; 4 – індентор; 5 – пластина для 3D друку товщиною δ ; 6 – робочий стіл; С – конденсатор; К – контактор-вмикач; $L_{\text{ЕДО}}$ – відстань між пальником 3 і індентором 4; X, Y – вісі дії напружень; V_0 – лінія напрямку електродинамічного тиску; V_{PR} – напрямок 3D друку; ω – напрямок обертання; б – геометричні характеристики електрода-індентора із поверхнею контакту у формі напівкола (ЕК), де В і С – точки вздовж лінії V_0 відповідно на зовнішній і зворотній поверхнях пластини 5 (рис. 2, а); в – геометричні характеристики електрода-індентора із поверхнею контакту у плоскій формі (ЕП), де В і С – аналогічно б)

Створення математичної моделі описаного вище процесу проводили із використанням спрощеної двовимірної (2D) плоскої постановки. Розв’язання задачі виконували за допомогою програми ANSYS/LS-DYNA [8–10]. Для побудови скінченно-елементної сітки задачі використовувався плоский двовимірний скінченний елемент у вигляді прямокутника SOLID162. Враховуючи те, що в даній задачі розглядається напружено-деформований стан твердих тіл, то комп’ютерне моделювання слід проводити з використанням лагранжевого підходу [8–10]. Як відомо, у лагранжевому підході використовується рухома скінченно-елементна сітка, яка жорстко зв’язана із середовищем та деформується разом з ним.

Наявність описаної вище геометричної симетрії тіл, що ударно взаємодіють, дозволяє розглядати лише половину їхнього перерізу відносно вісі OY з одночасним накладанням відповідних

граничних умов. До цих умов відноситься накладання заборони на переміщення вузлів скінченно-елементної сітки (СЕС) тіл, що знаходяться на вісі симетрії, в горизонтальному напрямку OX. Наявність в схемі електродинамічної обробки пластини робочого стола 6 (рис. 2, а) доцільно замінити спіранням на абсолютно жорстку основу, яка у математичній постановці буде еквівалентна накладання заборони на переміщення у вертикальному напрямку OY вузлам СЕС, які належать нижній поверхні пластини 5, що контактує зі столом.

Для побудови скінченно-елементної моделі пластини та електрода-індентора був обраний скінченний елемент з максимальним характерним розміром – 0,1 мм. Побудовані скінченно-елементні моделі для обох варіантів розрахункової схеми мали однакову кількість скінченних елементів (тип SOLID 162) – 4288 та однакову кількість вузлів – 4514, де електрод-індентор мав 2688 елементів та 2797 вузлів, а пластина складалася з 1600 елементів та 1717 вузлів.

Для чисельного моделювання процесу швидкісного удару використовували континуальну модель дослідного середовища [8–10]. Основою моделі є гіпотеза про безперервність зміни характеристик середовища у просторі (координата, час) яка дозволяє записати закони збереження маси, кількості руху та енергії у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Якщо обрати декартову (прямокутну) систему координат для опису адиабатичного руху пружно-пластичного середовища густиною ρ (кг/м³), то система відповідних рівнянь у двовимірній постановці буде мати вигляд [9]:

Рівняння нерозривності:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

де u, v – компоненти вектора швидкості руху середовища, м/с.

Рівняння руху середовища:

$$\rho \frac{du}{dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}, \quad \rho \frac{dv}{dt} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}, \quad (2)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень, Па.

Рівняння енергії E^* для одиниці маси:

$$\rho \frac{dE^*}{dt} = \sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy}, \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

де $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{d\epsilon_{ij}}{dt}$ – компоненти тензора швидкостей деформації, (с⁻¹).

Для дослідження процесів пов’язаних з великими пластичними деформаціями середовища ви-

користуються кінцеві деформації та теорію пластичної течії. Дана теорія розглядає пластичну деформацію твердого тіла як стан руху. Відповідні співвідношення у формі Прандтля-Рейсса можна записати як:

$$\frac{dD_{\sigma_{xx}}}{dt} + 2G\dot{\lambda}D_{\sigma_{xx}} = 2G\left(\dot{\epsilon}_{xx} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt}\right), \quad (4)$$

$$\frac{dD_{\sigma_{yy}}}{dt} + 2G\dot{\lambda}D_{\sigma_{yy}} = 2G\left(\dot{\epsilon}_{yy} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt}\right), \quad (5)$$

$$\frac{dD_{\sigma_{xy}}}{dt} + 2G\dot{\lambda}D_{\sigma_{xy}} = 2G\dot{\epsilon}_{xy}, \quad (6)$$

де G – модуль зсуву, Па; D_{ij} – компоненти девіатора напружень:

$$D_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij}, \delta_{ij} = 1 (i=j), \delta_{ij} = 0 (i \neq j), \quad (7)$$

де p – середнє нормальне напруження, Па:

$$p = -\frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}.$$

Величина питомої потужності пластичної деформації визначається як:

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2Y^2} \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p, \left(\frac{1}{\text{Па} \cdot \text{с}}\right) \quad (8)$$

де Y – динамічна границя текучості матеріалу, що досліджується.

Замикається система рівнянь рівнянням стану середовища у вигляді:

$$p = p(\rho, E). \quad (9)$$

В математичній постановці поведінка матеріалів пластини (алюмінієвий сплав АМг6) та електрода-індентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описувалася за допомогою ідеальної пружно-пластичної реологічної моделі матеріалу, яка є в бібліотеці матеріалів програми *ANSYS/LS-DYNA*. Для даної моделі значення динамічної границі текучості матеріалу Y приймалося рівним значенню границі текучості σ_T . Відповідні величини параметрів даної моделі в роботі були прийняті такими:

Пластина з розмірами $500 \times 500 \times 4$ мм із алюмінієвого сплаву АМг6:

- густина $\rho = 2640$ кг/м³;
- модуль пружності $E = 71$ ГПа;
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,34$;
- границя текучості $\sigma_T = 150$ МПа/

Електрод-індентор із мідного сплаву М1 масою 102,5 г отримує три значення V_0 , а саме, 1, 5 та 10 м/с:

- густина $\rho = 8940$ кг/м³;
- модуль пружності $E = 128$ ГПа;
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,35$;
- границя текучості $\sigma_T = 300$ МПа.

По всій області руху ідеально-пластичного середовища повинно виконуватися співвідношення, яке представляє собою умову текучості Мізеса:

$$D\sigma_1^2 + D\sigma_2^2 + D\sigma_3^2 \leq \frac{2}{3}Y^2, \quad (10)$$

де $D\sigma_1, D\sigma_2, D\sigma_3$ – головні компоненти девіатора напружень, Па.

Таким чином, для оцінки впливу форми ЕК і ЕП на ефективність ЕДО сплаву АМг6 після 3Д друку були проведені чисельні розрахунки процесу їх взаємодії із пластиною на швидкостях контакту $V_0 = 1, 5, 10$ м/с на основі співвідношень Прандтля-Рейсса. Значення V_0 задавали, виходячи із електрофізичних характеристик системи конденсатор С + індуктор (рис. 2, а), які застосовуються для ЕДО [8].

Результати моделювання та порівняння технологічних підходів. У результаті моделювання встановлені геометричні характеристики перерізу наплавленого (надрукованого шару 3), рис. 1, який може бути деформований ЕДО за один прохід внаслідок його контактної взаємодії із електродом-індентором (ЕК або ЕП) при різних значеннях швидкості V_0 . Значення висоти h_{PR} і ширини b_{PR} надрукованого шару, який підлягає формозміні ЕДО за період тривалості контактної взаємодії $t_{ЕДО}$ наведено в табл 1.

Значення h_{PR} визначали як таке, що дорівнює глибині лунки в результаті нормального впровадження індентора у наплавлений шар в точці В (рис. 2, б, в) від її початкового положення до положення, що відповідає завершенню контакту. Приймали, що значення h_{PR} шару, за якої гарантоване його деформування урівень із поверхнею пластини, має бути не меншою за глибину лунки. Значення b_{PR} шару визначали як відстань від лінії удару (вісь Y на рис. 2, а) до точки, яка є урівень із поверхнею пластини Розрахунок значень h_{PR} і b_{PR} , якій проводили без урахування умов стисненої або вільної пластичної деформації [11], слід вва-

Таблиця 1. Параметри контактної взаємодії електрода і геометричні характеристики наплавленого шару, що підлягає формозміні при ЕДО

Номер	Форма електрода	Швидкість електрода V_0 , м/с	Тривалість контакту $t_{ЕДО}$, мкс	Висота шару h_{PR} , мм	Ширина шару b_{PR} , мм
1	ЕП	1	74	0,016	0,53
2		5	86	0,168	1,89
3		10	102	0,451	3,06
4	ЕК	1	166	0,049	1,27
5		5	128	0,266	2,56
6		10	120	0,547	3,76

жати спрощеним. Але результати розрахунку є достатніми для підбору режиму адитивного наплавлення, що забезпечує потрібні значення h_{PR} і b_{PR} друкованого шару, який може бути підданий ЕДО.

З даних табл. 1 видно, що $t_{ЕДО}$ між шаром та ЕП збільшується на 28 мкс (38%) зі збільшенням на порядок початкової швидкості руху V_0 . При застосуванні ЕК навпаки, збільшення V_0 до 10 м/с призводить до зменшення $t_{ЕДО}$ на 46 мкс (27%). Це пояснюється особливостями у процесах обміну енергією між електродом-індентором та пластиною. Відповідно зі збільшенням швидкості V_0 зростає кінетична енергія, яка під час контакту переходить у енергію пластичного деформування у місці контакту, що позначається на розмірах h_{PR} і b_{PR} ущільненого шару на пластині.

Зростання V_0 з 1 до 5 та до 10 м/с збільшує розмір h_{PR} в обох постановках задачі. При цьому значення h_{PR} і b_{PR} для ЕП збільшується при зростанні швидкості до 5 м/с відповідно у 10 та 3,6 рази,

а при $V_0 = 10$ м/с значення h_{PR} і b_{PR} ще зростають в 2,5 та 1,6 рази. У той же час для ЕК зростання має менш стрімкий характер, глибина та ширина збільшуються при $V_0 = 5$ м/с у 5,4 та 2 рази відповідно, а при $V_0 = 10$ м/с зростають ще у 2 та 1,4 рази відповідно.

Для оцінки рівня пластичних деформацій використовували ефективні пластичні деформації ϵ_{eff}^p , які представляють собою скалярну величину пластичної складової тензора швидкості деформації, яка зростає, коли напружений стан знаходиться на рівні границі текучості. Значення ϵ_{eff}^p визначалися за формулою [10]:

$$\epsilon_{eff}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}, \quad (11)$$

де $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – головні деформації.

Хоча зростання значень h_{PR} і b_{PR} для ЕП більш інтенсивне, абсолютні значення геометричних розмірів ущільненого перерізу при однакових швидкостях для ЕК більші, що призводить

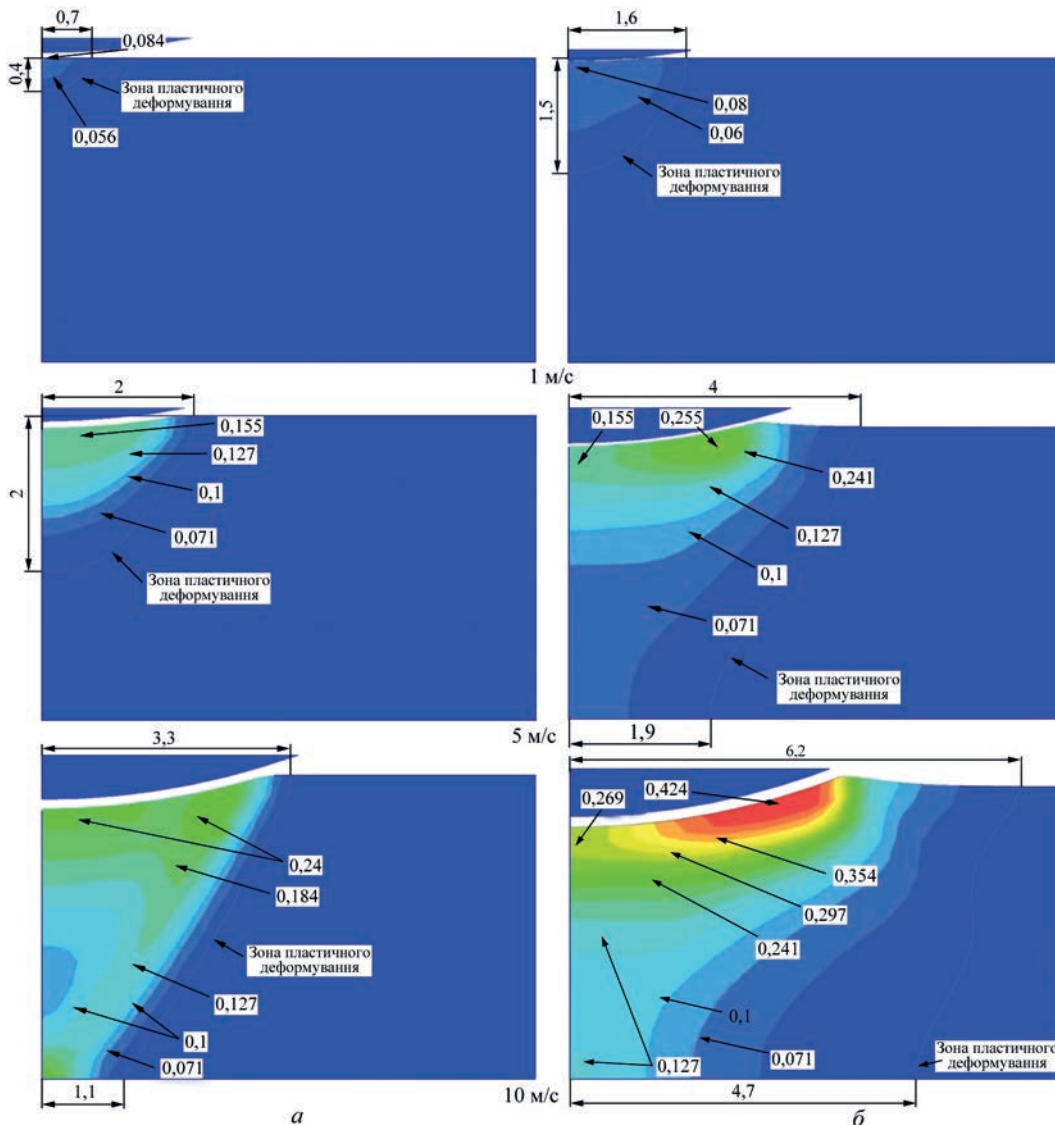


Рис. 3. Розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій ϵ_{eff}^p вздовж вісі OX по лінії V_0 (рис. 2) в пластині після ЕДО ЕП (а) та після ЕДО ЕК (б) при значеннях швидкості $V_0 = 1, 5$ та 10 м/с

до відповідного зростання величини ефективних пластичних деформацій ϵ_{eff}^p та розмірів зони пластичного деформування (рис. 3). Слід зазначити, що границі зони пластичного деформування, які позначено стрілкою, визначалися за умови $\epsilon_{eff}^p \geq 0,01$.

З Рис. 1 видно, що зона розповсюдження ϵ_{eff}^p зростає зі збільшенням V_0 і форма розподілу змінюється від сегмента кола до форми, що є близької до трапеції. Площа зони пластичного деформування зростає швидше під час обробки ЕК (рис. 3, б). ЕДО при $V_0 = 5$ м/с не деформує тильну поверхню металу при використанні ЕП (рис. 3, а) на відміну від варіанту застосування ЕК (рис. 3, б). Водночас при однакових V_0 можна побачити, що ширина зони деформування на лицевій поверхні при ЕК у 2 рази більша, ніж при ЕП. Це свідчить про переваги форми ЕК над ЕП, як технологічного інструменту для пластичного деформування металу чергового друкованого шару при адитивному наплавленні.

Так, використання ЕДО при швидкості 1 м/с дозволяє отримати поверхневий ефект деформування з радіусом сегмента з центром у точці контакту величиною 0,7 та 1,6 мм при ЕП та ЕК формах електрода відповідно. При збільшенні швидкості до 5 м/с ЕП забезпечує зону деформування з радіусом 2 мм, а ЕК формує зону у вигляді трапеції з більшою основою на лицевій поверхні величиною 4 мм та меншою основою 1,9 мм. Зростання V_0 до 10 м/с призводить до створення зони пластичного деформування у вигляді трапеції в обох випадках, з більшою та меншою основою величиною 3,3 та 1,1 мм відповідно при ЕП, а також 6,2 та 4,7 мм відповідно при ЕК.

Також з Рис. 1 видно що зі зростанням V_0 збільшуються не тільки розміри зони пластичного деформування, а й величини ϵ_{eff}^p . Відповідно до цього можна сказати, що при застосуванні ЕП максимальні значення ϵ_{eff}^p формуються на контактній поверхні друкованого шару з електродом ближче до площини симетрії. У випадку використання ЕК навпаки, пікові значення ϵ_{eff}^p зміщуються на 1,8...2,0 мм від лінії удару (вісі симетрії) з переходом від сегментної форми зони деформування до трапецеїдальної. Для порівняння значен-

ня максимальних ϵ_{eff}^p та значення ϵ_{eff}^p у точках В та С (Рис. 2 2, б, в), розташованих по лінії удару, наведено у.

Аналізуючи дані табл. 2 та Рис. 1, можна сказати, що збільшення V_0 в загальному випадку призводить до зростання максимальних значень ϵ_{eff}^p незалежно від форми електрода. При застосуванні ЕП зростання V_0 з 1 до 5 м/с призводить до збільшення максимальних ϵ_{eff}^p у 2,9 рази, а подальше збільшенні до 10 м/с сприяє зросту ще на 30 %. При застосуванні ЕК відповідні показники зросту дещо більші: при 5 м/с – у 3,8 рази, а при 10 м/с – ще у 1,8. Таким чином можна бачити, що застосування контактної поверхні ЕК сприяє більшій інтенсивності ущільнення при ЕДО, ніж у ЕП.

Геометричні характеристики зони деформування при застосуванні ЕК або ЕП мають певні відмінності. Але якщо розглядати розподіл ϵ_{eff}^p при швидкості 1 м/с, то ϵ_{eff}^p концентруються на лицевій поверхні, а їх значення не перевищують 6 %, з поступовим зниженням до нуля вздовж лінії удару незалежно від форми електрода.

При збільшенні V_0 до 5 м/с при ЕП розподіл ϵ_{eff}^p досягає середини пластини, але все ще має поверхневий характер з максимальними значеннями на контактній поверхні 17 % та поступовим зниженням практично до нуля на тильній поверхні пластини. Застосування ЕК формує трапецеїдальну зону деформування з концентрацією максимальних ϵ_{eff}^p на її краю величиною до 17,1 %. При цьому по лінії удару значення ϵ_{eff}^p поступово зменшуються з 15,1 % на лицевій поверхні до 3,8 % на тильній.

При обробці із $V_0 = 10$ м/с із застосуванням ЕП ϵ_{eff}^p мають розподіл у формі трапеції з найбільшими значеннями на тильній та лицевій поверхнях, від 22,4 до 20,5 % відповідно. При цьому межа зони пластичної деформації представляє майже пряму лінію, а максимальні значення ϵ_{eff}^p знаходяться у т. С. Також на відстані 2,5 мм від лицеві поверхні по лінії удару спостерігається локальне зменшення ϵ_{eff}^p до 8,5 %, що необхідно враховувати при визначенні критичних зон руйнування при проектуванні друкованих виробів. В той же час застосування ЕК при $V_0 = 10$ м/с визначає гео-

Таблиця 2. Значення ефективних пластичних деформацій ϵ_{eff}^p

Номер	Форма електрода	Швидкість електрода-ударника, м/с	Максимальні значення ϵ_{eff}^p	Значення ϵ_{eff}^p на поверхнях пластини	
				Лицьова (т. В)	Тильна (т. С)
1	ЕП	1	0,06	0,06	0
2		5	0,171	0,165	0,004
3		10	0,224	0,205	0,224
4	ЕК	1	0,063	0,04	0
5		5	0,239	0,151	0,038
6		10	0,424	0,260	0,116

метричну форму зони деформування, що є якісно подібною до зони при $V_0 = 5$ м/с, але з більшою величиною ε_{eff}^p – до 42,4 %. При цьому на лінії удару значення ε_{eff}^p зменшуються від точки В до точки С з 26 до 11,6 % відповідно.

Розподіли ε_{eff}^p (рис. 3) є результатом впливу форми електроду при ЕДО на загальну інтенсивність пластичного деформування металу, яка характеризує його ущільнення при 3D-друку. З метою більш поглибленої оцінки характеру ущільнення друкованого металу проведено розрахунок

розподілу компонент ε_x^p і ε_y^p вздовж осей OX та OY (рис. 2) деформування ε_{eff}^p . Розподіл величин ε_x^p визначає характер деформування вздовж напрямку друку V_{PR} (рис. 2), а ε_y^p вздовж лінії удару V_0 (рис. 2). Розподіл компонент ε_x^p показано на Рис. 2.

При порівнянні ε_x^p для усіх розглянутих випадків видно, що зі зростанням швидкості збільшується вплив дії ударника на її розподіл. При $V_0 = 1$ і 5 м/с ε_x^p не досягає помітних значень при

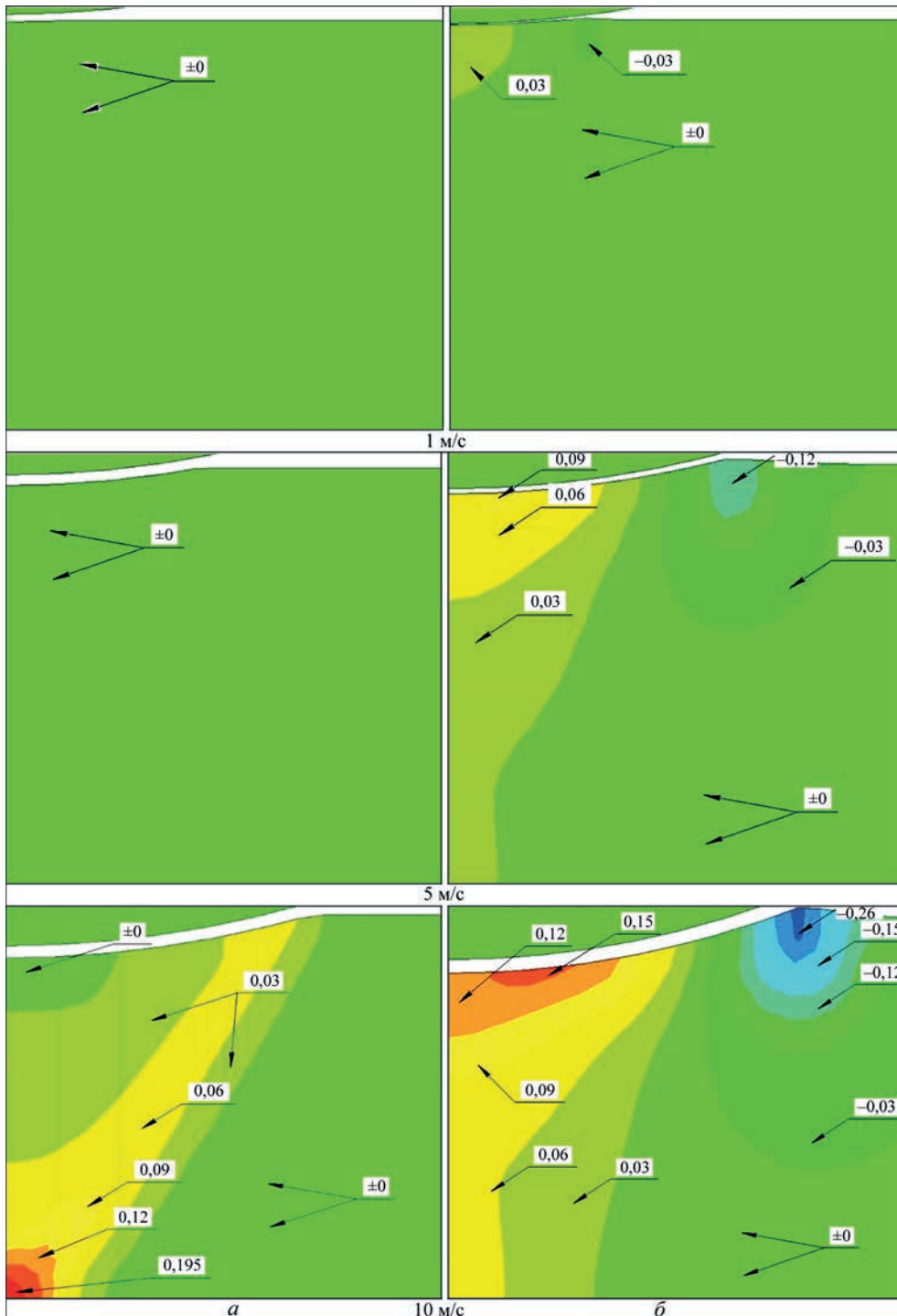


Рис. 4. Розрахунковий розподіл пластичних деформацій ε_x^p для форми електроду ЕП (а) та ЕК (б) при початкових швидкостях V_0 електрода 1, 5 та 10 м/с

ЕП, але при збільшенні V_0 до 10 м/с на тильній поверхні у т. С утворюється зона деформування ϵ_x^p величиною більше за 19 %. При цьому розподіл ϵ_x^p у центральному перерізі має форму, що є близькою до рівнобедреного трикутника.

У той же час при ЕК спостерігається поступове нарощування інтенсивності деформування при зростанні V_0 від 1 м/с до 10 м/с, де спостерігається супутнє збільшення ϵ_x^p на контактній поверхні та в зоні біля вісі симетрії (Y). При цьому на лицевій поверх-

ні на межі поверхні взаємодії пластини з електродом утворюється зона від'ємних значень до -26 %.

При розгляді розподілу компонент пластичних деформацій ϵ_y^p маємо більш динамічну картину зміни процесу зі збільшенням швидкості (Рис. 5).

Розглядаючи розподіл компонент пластичних деформацій ϵ_y^p при ЕП, спостерігається створення зони від'ємних значень на контактній поверхні пластини у вигляді сегмента кола, яка зі зростанням V_0 збільшується по площині і трансформується у трапецію з основами на поверхнях пластини.

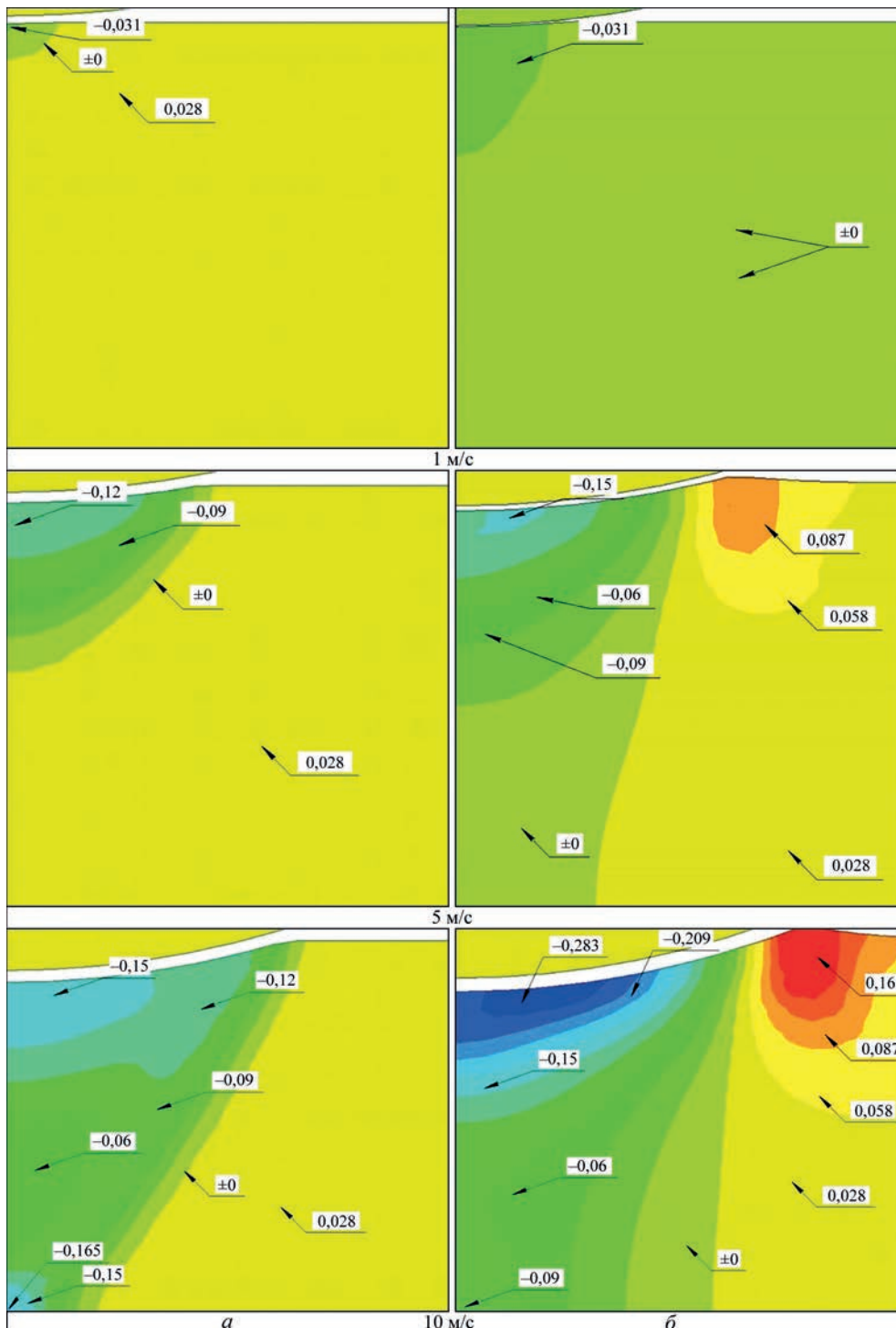


Рис. 5. Розрахунковий розподіл пластичних деформацій ϵ_y^p для форми електрода ЕП (а) та ЕК (б) при початкових швидкостях V_0 електрода 1, 5 та 10 м/с

Якщо аналізувати дію ЕК, то ефект від зростання швидкості більший, ніж при застосуванні ЕП. Спостерігається перехід від зони від'ємних значень на контактній поверхні у вигляді сегмента кола до зони у формі трапеції при $V_0 = 5$ м/с та прямокутника при $V_0 = 10$ м/с. Локальна зона додатних пікових значень на границі поверхні контакту відсутня при $V_0 = 1$ м/с, але стає помітною при $V_0 = 5$ та 10 м/с.

З метою аналізу розподілу значень компонент напруженого стану по товщині пластини було побудовано відповідні розрахункові картини розподілу σ_x (Рис. 6) та σ_y (Рис. 7), які визначають характеристики ущільнення друкованого металу при ЕДО із застосуванням ЕК або ЕП.

Зі збільшенням початкової швидкості електрода-індентора можна умовно побачити траєкторію руху зон стиску та розтягу стосовно загальної кінетики зміни розподілу полів компонент напружень σ_x та σ_y . Так, якщо розглядати розподіли σ_x

за швидкості 1 м/с при ЕП (Рис. 6б, а), можна побачити вздовж площини симетрії зародження зони розтягу на контактній поверхні, за якою створюється зона стиску, і після неї знову зона розтягу.

При зростанні швидкості до 5 м/с спостерігається розвиток приповерхневої зони розтягу від місця удару вздовж поверхні точки В (рис. 2). При цьому зона стискальних напружень розповсюджується до половини товщини пластини, а в ширину – за зону контакту ЕП із друкованим шаром. Зони розтягу у вигляді сегментів кола із центром у точки С (рис. 2) формуються на тильній поверхні пластини, де пікове значення σ_x сягає 76 МПа.

Підвищення швидкості V_0 до 10 м/с призводить до збільшення поверхневої зони розтягу по товщині пластини та за величиною. При цьому зона стискальних напружень зменшується і за розмірами і за величиною, переміщуючись до середини пластини. У той же час зменшуються напруження розтягу в околі точки В і зменшується геометричні розміри зони.

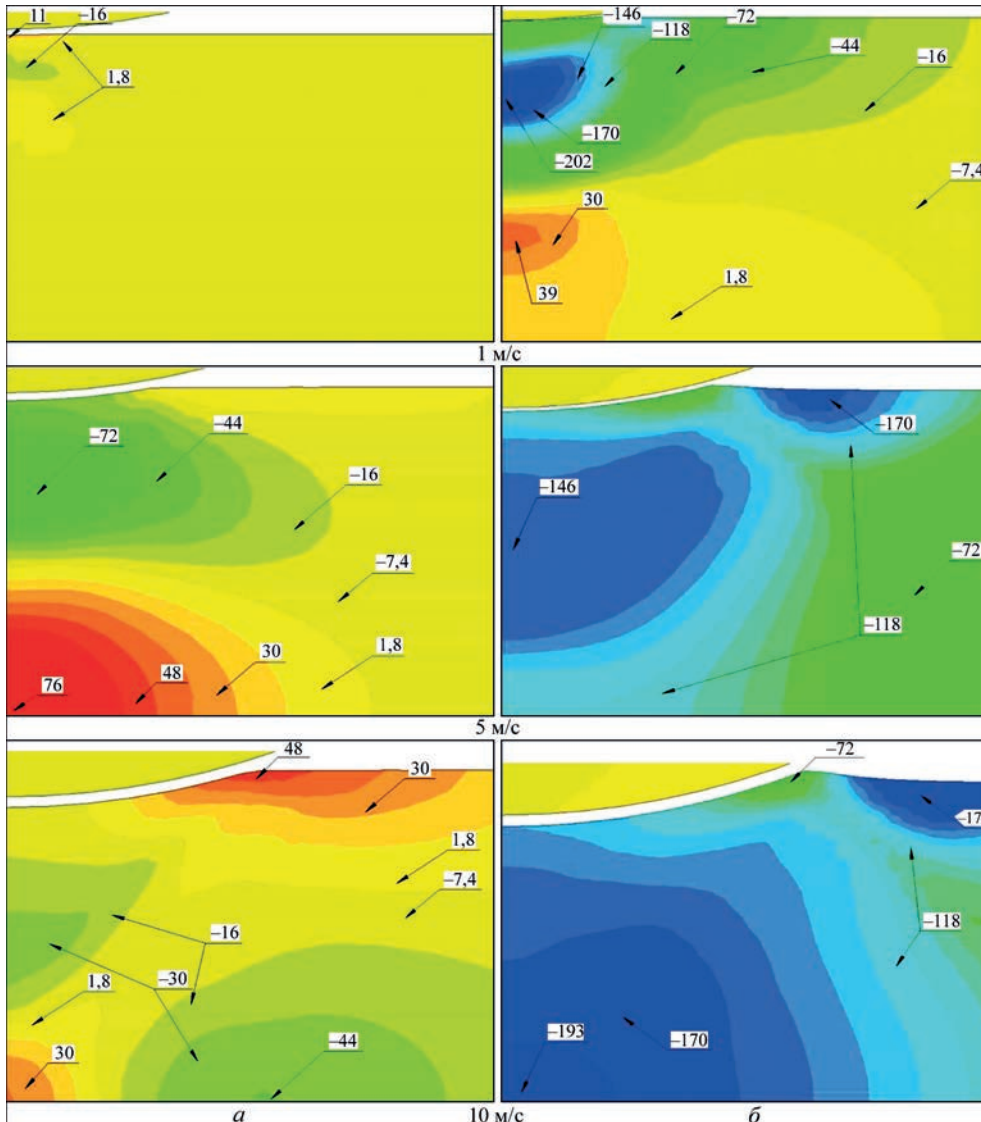


Рис. 6. Розподіл значень залишкових напружень σ_x (МПа) в результаті ЕДО із застосуванням ЕП (а) та ЕК (б) при початкових швидкостях V_0 електрода 1, 5 та 10 м/с.

Відмічається створення нової зони стиску на тильній поверхні симетрично до поверхневої зони розтягу.

Пластичне деформування металу наплавлено-го шару із використанням ЕК є більш ефективним (ніж із ЕП), тому що призводить до домінування зон σ_x стиску по площі дії і величинам (у порівнянні із зонами розтягу). При тому величини і площа розповсюдження σ_x стиску зростають зі збільшенням V_0 .

При ЕДО ЕК вже при $V_0 = 1$ м/с створюється зона стиску близько -200 МПа, яка поширюється на верхню половину товщини пластини. Область найбільшої концентрації напружень стиску з піковим значенням знаходиться на глибині 1 мм від лицевої поверхні пластини, а її ширина дорівнює ширині зони контакту ЕК із металом. На нижній половині товщини пластини формується зона розтягу біля вісі симетрії, ширина якої також відповідає ширині зони контакту. Максимальні значення σ_x в цій зоні досягають 25 МПа.

Зростання V_0 до 5 м/с по всій товщині пластини в зоні обробки утворює напруження стиску з двома зонами концентрації. Одна з них створюється у вигляді сегмента кола на поверхні пластини за краєм зони контакту, а інша формується по товщині пластини з рівномірним стиском за значеннями близькими до умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$ сплаву АМг6 (150 МПа).

Застосування ЕК при $V_0 = 10$ м/с призводить до збільшення напружень стиску до -200 МПа за зоною контакту. При цьому зона стиску у товщині пластини зміщується своїм мінімумом до точки С, де пікові значення досягають -200 МПа.

У той же час розподіл σ_y має свої особливості, які відображені на Рис. 77. При загальному розгляді еволюції компоненти σ_y напружень при ЕДО із застосуванням ЕП відмічається перехід від незначної зміни напруженого стану при $V_0 = 1$ м/с до утворення двох виражених зон розтягу та стиску при збільшенні швидкості до 5 та 10 м/с. Зона роз-

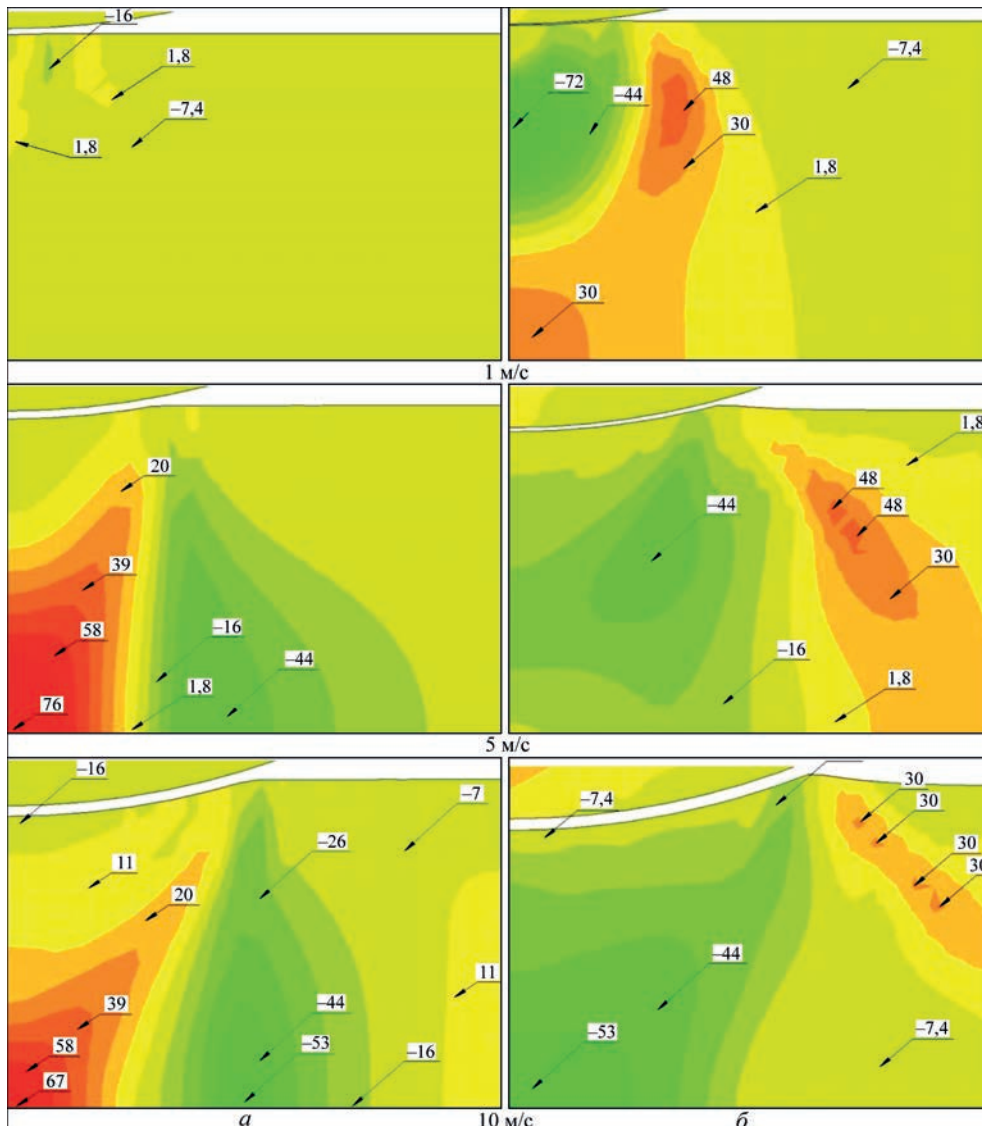


Рис. 7. Розподіл значень залишкових напружень σ_y (МПа) в результаті ЕДО із застосуванням ЕП (а) та ЕК (б) при початкових швидкостях V_0 електрода 1, 5 та 10 м/с.

тягу, яка створюється з піком у точці С, по формі схожа на прямокутник з витягнутим кутом в напрямку межі вм'ятини. Зона стиску, яка формується за зоною розтягу, за формою схожа на трикутник з основою на тильній поверхні та вершиною, яка зі збільшенням швидкості наближається до краю вм'ятини. При $V_0 = 5$ та 10 м/с не спостерігається значних змін напруженого стану на лицевій поверхні у порівнянні зі станом при $V_0 = 1$ м/с.

При розгляді розподілу компоненти σ_y напружень при ЕДО зі застосуванням ЕК також спостерігається формування почергових зон розтягу та стиску. Зона стиску створюється під поверхнею вм'ятини у вигляді сегмента кола, зовнішній радіус якого досягає половини товщини пластини при $V_0 = 1$ м/с. При $V_0 = 5$ та 10 м/с площа зони стиску розповсюджується на всю товщину пластини, а по ширині доходить до краю вм'ятини, зменшуючи площу зони розтягу та посуваючи її від лінії удару. При цьому зі збільшенням швидкості форма зони розтягу перетворюється у загострену смугу із вершиною вістря біля краю вм'ятини.

Узагальнення результатів розрахунку значень компонент σ_x , σ_y залишкових напружень в контрольних точках по лінії удару зведено відповідно у табл. 3 і 4.

Виходячи з даних табл. 3 можна бачити, що компонента σ_x при $V_0 = 1$ м/с за застосування ЕП є виключно розтягу, а при ЕК набуває від'ємного знаку вже на верхній половині товщини пластини. При тому за рахунок інтенсивного пластичного деформування значення напружень σ_x за ЕК вже при $V_0 = 1$ м/с досягаються 202 МПа, тобто знаходяться за межею пружності на локальній ділянці під поверхнею контакту (в точці на відстані 1 мм від поверхні).

Таблиця 3. Розрахункові значення компонент залишкового напруженого стану σ_x (в МПа) по товщині пластини (від точки В до точки С – рис. 2)

Форма електрода	V_0 , м/с	Координата точки по товщині пластини (по лінії удару), мм				
		0 (т.В)	1	2	3	4 (т.С)
ЕП	1	15	4	1	0	0
	5	-25	-61	-2	59	76
	10	-6	-7	-16	13	32
ЕК	1	-29	-202	-16	21	13
	5	-133	-160	-164	-153	-128
	10	-147	-163	-166	-177	-180

Таблиця 4. Розрахункові значення компоненти залишкового напруженого стану σ_y (в МПа) по товщині пластини (від точки В до точки С – рис. 2)

Форма електрода	V_0 , м/с	Координата точки по товщині пластини (по лінії удару), мм				
		0 (т.В)	1	2	3	4 (т.С)
ЕП	1	-7	2	0,5	0	0
	5	0,1	0,1	23	61	78
	10	0,1	5	12	40	60
ЕК	1	-5	-79	-24	21	21
	5	0	-12	-18	-17	-7
	10	-3	-20	-25	-36	40

В діапазоні $V_0 = 5 \dots 10$ м/с значення σ_x набувають від'ємного знаку на верхній половині пластини при застосуванні ЕП та є виключно від'ємними при використанні ЕК. Також при $V_0 = 5 \dots 10$ м/с за застосування ЕП значення σ_x стиску на верхній половині пластини близькі за величиною до σ_x розтягу на нижній.

При зростанні V_0 використання ЕК дозволяє збільшувати величину напружень σ_x стиску та зону їх розповсюдження. Значення напружень стиску досягають значень, близьких до границі текучості матеріалу по усій товщині металу.

Аналізуючи розподіли компоненти σ_x (табл. 4), слід зазначити, що значення даної компоненти напружень суттєво нижчі у порівнянні із σ_x . Так, при застосуванні ЕП вплив на лицьову половину пластини по лінії удару є мінімальним не залежно від швидкості. Водночас при швидкостях 5 і 10 м/с спостерігається збільшення напружень розтягу на тильній половині пластини до 78 МПа.

Використання ЕК в усьому діапазоні швидкостей ініціює формування напружень σ_y стиску в межах $-5 \dots -36$ МПа, окрім точки на товщині 1 мм від лицьової поверхні при швидкості обробки 1 м/с, де $\sigma_y = -79$ МПа. Але на зворотній утворюється локалізована зона розтягу величиною до 40 МПа.

Базуючись на вище наведених порівняннях значень компонент напруженого стану по лінії удару (табл. 3, 4), слід зазначити, що на відміну від форми електрода-індентора ЕП використання форми ЕК призводить до утворення практично рівномірного розподілу обох компонент напруження (σ_x і σ_y) по товщині наплавленого шару. Крім того, використання ЕП призводить до формування як напружень стиску, так більш небезпечних напружень розтягу зі значеннями, що можуть досягати половини значення границі текучості матеріалу. В той час, як використання ЕК призводить до формування обох компонент напружень σ_x і σ_y стиску, значення яких може досягати границі текучості матеріалу. Як було показано в роботах [12–14], такий розподіл пластичних деформацій сприяє подрібненню структури металу, а отриманий розподіл компонентів напружень стиску напружень сприяє підвищенню спротиву руйнуванню виробів в умовах втомних навантажень.

Таким чином, шляхом поєднання електродинамічної обробки із адитивним наплавленням можна очікувати підвищення фізико-механічних характеристик матеріалу металевих виробів в технологіях 3D друку.

Висновки

1. На основі співвідношень Прандтля-Рейса виконані чисельні експерименти по дослідженню ефективності впливу форми контактної поверх-

ні електрода-індентора для електродинамічної обробки наплавленого шару в технологіях адитивного наплавлення на розподіл в ньому компонентів пластичних деформацій та залишкових напружень.

2. Установлено, що використання для ЕДО мідного електрода-індентора у вигляді ролика із поверхнею контакту у формі напівкола (ЕК) у порівнянні із електродом із поверхнею контакту у вигляді прямої (ЕП), який рухається за тих же умов, призводить до:

– збільшення тривалості контакту із наплавленим шаром, що обробляється, на 50 % і як наслідок цього збільшуються розміри глибини та ширини шару відповідно на 55 і 35 %;

– поширення на всю товщину наплавленого шару зони ефективних пластичних деформацій, яка має форму, близьку до трапеції (у випадку ЕП зона ϵ_{eff}^p поширюється лише на половину товщини пластини та має форму сегмента кола), а значення максимальних деформацій при ЕК є у 1,4 рази більшими, ніж від дії ЕП;

– формування по товщині пластини практично рівномірного розподілу обох компонент напруженого стану – як σ_x , так і σ_y , які на відміну від ЕП є напруженнями стиску, значення яких може досягати границі текучості сплаву АМг6.

3. Результати математичного моделювання дають підстави рекомендувати використання форму електрода-індентора – ЕК для розробки комбінованих технологій 3D друку об'ємних металевих виробів, які полягають в поєднанні пошарового (адитивного) наплавлення (WAAM, плазмове, мікроплазмове наплавлення, тощо) об'ємного металевого виробу із електродинамічною обробкою кожного наплавленого шару.

Робота виконана при підтримці проектів:

1) *The National Key Research and Development Program of China [grant number 2020YFE0205300].*

2) *GDAS'Project of Science and Technology Development (2020GDASYL-20200301001), China.*

Список літератури

1. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O. et al. (2017) Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern European J. of Enterprise Technologies*, 3/1 (87), 42–52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
2. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Lahodzinkyi, I. et al. (2020) Creation of Volumetric Products Using Additive Arc Cladding with Compact and Powder Filler Materials. *Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties»*, Sumy, Ukraine, 9–13 Nov. 2020, 02SAMA16-1-02SAMA16-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>
3. Soshi, M. (2017) Innovative grid molding and cooling using an additive and subtractive hybrid CNC machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 66 (1), 401–404.
4. Dongqing, Yang, Gang, Wang, Guangjun, Zhang (2017) Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. *J. Materials Proc. Technology*, 244, 215–224.

5. Trufyakov V.I. (1973). *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
6. Lobanov, L.M., Pashchyn, N.A., Kondratenko, I.P. et al. (2018) Development of Post-weld Electrodynamic Treatment Using Electric Current Pulses for Control of Stress-Strain States and Improvement of Life of Welded Structures. *Materials Performance and Characterization*, 7 (4). DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
7. Лобанов Л.М., Коржик В.М., Пашин та ін. (2022) Бездеформаційне зварювання TIG сплаву АМг6 із застосуванням електродинамічної обробки металу шва. *Автоматичне зварювання*, 8, 14–19.
8. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2017) Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 49 (3), 369–380.
9. Lobanov, Y.M., Shlenskii, P. (2013) On the Assessment of Stress-strain State of the Load-Bearing Structural Elements in the Tubular Explosion Chamber. *Strength of Materials*, 45, (2), 210–220.
10. Лобанов Л.М., Пашин М.О., Миходуй О.Л. та ін. (2022) Вплив форми електрода на напружено-деформований стан сплаву АМг6 при його електродинамічній обробці. *Автомат. зварювання*, 9, 5–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.09.01>
11. Джонсон К. (1989) *Механика контактного взаємодія*. Москва, Мир.
12. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Соломийчук Т.Г. (2012) Изменение структуры алюминиевого сплава АМг6 в зоне электродинамических воздействий. *Вісник українського матеріалознавчого товариства*, 5, 30–42.
13. Лобанов Л. М., Пашин Е.Н., Бердникова Е.Н. (2015) Влияние электродинамической обработки на особенности микромеханизма разрушения алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении. *Вісник українського матеріалознавчого товариства*, 8, 27–37.
14. Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Timoshenko, N. et al. (2017) Effect of the Electrodynamic Treatment on the Life of AMg6 Aluminum Alloy Weld Joints. *Strength of Materials*, 49 (2), 234–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>

References

1. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O. et al. (2017) Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern European J. of Enterprise Technologies*, 3/1 (87), 42–52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
2. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Lahodzinkyi, I. et al. (2020) Creation of Volumetric Products Using Additive Arc Cladding with Compact and Powder Filler Materials. In: *Proc. of the 2020 IEEE 10th Int. Conf. on Nanomaterials: Applications and Properties* (Sumy, Ukraine, 9–13 Nov. 2020), 02SAMA16-1-02SAMA16-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>
3. Soshi, M. (2017) Innovative grid molding and cooling using an additive and subtractive hybrid CNC machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 66 (1), 401–404.
4. Dongqing, Yang, Gang, Wang, Guangjun, Zhang (2017) Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. *J. Materials Proc. Technology*, 244, 215–224.
5. Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Lobanov, L.M., Pashchyn, N.A., Kondratenko, I.P. et al. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials Performance and Characterization*, 7 (4). DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
7. Lobanov, L.M., Korzhyk, V.M., Pashchyn, M.O. et al. (2022) Deformation-free TIG welding of AMg6 alloy with application of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, 8, 3-8.
8. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2017) Effect of the indenting electrode impact on the stress-

- strain state of an AMg6 alloy on electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, 49 (3), 369–380.
9. Sidorenko, Y.M., Shlenskii, P. (2013) On the assessment of stress-strain state of the load-bearing structural elements in the tubular explosion chamber. *Strength of Materials*, 45, (2), 210–220.
 10. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2022) Influence of electrode shape on stress-strain state of AMg6 alloy during its electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, 9, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.09.01>
 11. Johnson, K. (1989) *Mechanics of contact interaction*. Moscow, Mir [in Russian].
 12. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Solomijchuk, T.G. (2012) Changes of structure of aluminium alloy AMg6 in the zone of electrodynamic actions. *Visnyk Ukr. Materialoznavchogo Tovarystva*, 5, 30–42 [in Russian].
 13. Lobanov, L.M., Pashchin, E.N., Berdnikova, E.N. (2015) Influence of electrodynamic treatment on features of fracture micro-mechanism of aluminium alloy AMg6 at cyclic loading. *Visnyk Ukr. Materialoznavchogo Tovarystva*, 8, 27–37 [in Russian].
 14. Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Timoshenko, N. et al. (2017) Effect of the Electrodynamic Treatment on the Life of AMg6 Aluminum Alloy Weld Joints. *Strength of Materials*, 49 (2), 234–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>

MATHEMATICAL MODELING OF THE IMPACT OF ELECTRODYNAMIC TREATMENT IN THE PROCESS OF ADDITIVE SURFACING ON THE STRESS-STRAINED STATE OF VOLUMETRIC PRODUCTS FROM ALUMINIUM-MAGNESIUM ALLOY

L.M. Lobanov², V.M. Korzhyk^{1,2}, M.O. Pashchyn², O.L. Mikhoduj², P.R. Ustylenko³, Zhang Yupeng¹, A.O. Alyoshin², O.M. Voitenko²

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou, 510650, China

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: olga.mikhodui@gmail.com

³NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: mail@kpi.ua

Combined 3D printing technology including a combination of additive (layer-by-layer) surfacing with electrodynamic treatment of deposited layer was considered. On the basis of mathematical modeling with the use of the Prandtl-Reiss ratio, on the example of aluminium-magnesium AMg6 alloy, the influence of the shape of the indenter for electrodynamic treatment on the distribution of basic parameters and components of the stress-strained state, in particular, the size of the zone of plastic deformations and stresses, depth and width of the contact interaction zone in a metal layer interacting with a roller-indenter moving along the normal to a layer at a speed of 1, 5 and 10 m/s across the thickness of the deposited layer was studied. It was established that the use of a roller with a contact surface, having a shape of a semi-circle, leads to an almost uniform distribution of compression stresses components in the deposited layer, the values of which can reach the yield strength of AMg6 alloy. The results of mathematical modeling give reasons to recommend the use of an electrode in the form of a semicircle (EC) for the development of combined technologies of 3D printing of volumetric metal products, which consist in combination of additive surfacing (WAAM, plasma, microplasma surfacing, etc.) of a volumetric metal product with electrodynamic treatment of each deposited layer. 14 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Keywords: 3D printing, additive surfacing, shaping technologies, electrodynamic treatment, aluminium alloy, impact interaction, mathematical modeling, residual stresses, plastic deformations, roller-indenter, generatrix, elastic-plastic environment

Надійшла до редакції 14.06.2023

НОВІ КНИГИ



Ахонін С.В., Березос В.О., Северин А.Ю. Електронно-променева плавка злиwkів інтерметалідів на основі алюмінію титану. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 98 с.

У монографії розглянуто технологію електронно-променевої плавки злиwkів сплавів інтерметаліду системи Ti–Al. Проведено дослідження, які дозволили розробити методику вибору технологічних параметрів електронно-променевої плавки (ЕПП) злиwkів інтерметаліду TiAl за допомогою математичної моделі випаровування легуючих елементів, що дозволяє визначити точний хімічний склад вихідної шихти. Показано особливості кристалізації рідкого металу злиwkів сплавів інтерметаліду системи Ti–Al в умовах дії електронно-променевого нагріву. Досліджено можливість отримання злиwkів ЕПП інтерметаліду TiAl з введенням додаткових легуючих елементів Nb, Cr, Mo, Zr, В, La. Описано дослідні плавки злиwkів методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Наведено

характеристики хімічного стану, макро-, мікроструктури та деяких механічних властивостей сплавів, отриманих методом ЕПП. Розглянуто можливість деформаційної обробки інтерметаліду TiAl, додатково легованого бором і лантаном. Описано мікроструктуру та механічні властивості деформованого та термічно обробленого металу.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей. Бібліогр. 131, табл. 25, рис. 56.



Позняков В.Д. Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 232 с.

У науково-технічному посібнику розглянуто питання щодо впливу різних факторів на структуру та механічні властивості металу швів і зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних низьколегованих та легованих високоміцних сталей з границею текучості 350...700 МПа. Розглянуто проблеми стосовно стійкості зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин і проредмонстровано, як на цей процес впливають залишкові напруження, хімічний склад, структура, вміст дифузійного водню в наплавленому металі та технологічні параметри зварювання. Запропоновано способи зменшення рівня залишкових напружень у характерних для ремонтного зварювання жорстко закріплених з'єднаннях великої товщини, які реалізуються шляхом оптимізації технології зварювання. Розглянуто питання щодо впливу ремонтно-зварювальних технологій і зміцнюючих обробок на механічні властивості та циклічну довговічність зварних з'єднань високоміцних сталей. Викладено загальні рекомендації стосовно способів видалення дефектів і підготовки з'єднань до ремонтного зварювання, вибору зварювальних матеріалів, температури попереднього підігріву та режимів і техніки зварювання високоміцних сталей. Наведено приклади застосування ремонтно-зварювальних технологій при відновленні цілісності та працездатності металевих конструкцій кар'єрних екскаваторів і автосамоскидів великої потужності, резервуарів для переробки нафти, суцільнолитих масивних базових вузлів пресового обладнання та дробарок.

Посібник призначено для наукових працівників дослідних установ та ВУЗів, аспірантів, студентів, інженерних працівників, що спеціалізуються у галузі виготовлення і ремонту зварних металевих конструкцій тривалої експлуатації. Бібліогр. 126, табл. 54, рис. 159.

Замовлення на книги надсилайте до редакції журналу.