

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ СТАНІВ СПЛАВУ АМг6 ВНАСЛІДОК УДАРНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОДА-ІНДЕНТОРА ПРИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІЙ ОБРОБЦІ*

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, П.В. Гончаров¹, Ю.М. Сидоренко², П.Р. Устименко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Представлено розрахункову модель процесу ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною із алюмінієвого сплаву АМг6 при електродинамічній обробці. Рішення задачі проведено на базі співвідношень Прантля-Рейсса для руху пружно-пластичного середовища в плоскій двумірній лагранжівій постановці з використанням програми «ANSYS/LS-DYNA». Представлені результати розрахунку процесу формування зон залишкових напружень і пластичних деформацій при ударному впливі індентора. Встановлено, що при ударній дії індентора зі швидкістю 10 м/с на зворотній поверхні пластини зі сплаву АМг6 величини пластичних деформацій є більшими, ніж на контактній. Це пояснюється ефектом відбиття пластично деформованого шару металу від зворотнього боку пластини, яка знаходиться в умовах спирання на жорстку опору. Проведено експериментальну перевірку адекватності моделі при оцінюванні розподілу пластичних деформацій після електродинамічної обробки зварної пластини зі сплаву АМг6. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електродинамічна обробка, алюмінієвий сплав, ударна взаємодія, математичне моделювання, залишкові напруження, пластичні деформації, електрод-індентор, рух, пружно-пластичне середовище

Зварювання, що є одним з основних технологічних процесів в машино-, суднобудуванні та будівництві, викликає в конструкціях залишкові напруження розтягу, пікові значення яких близькі до порогу плинності металу. Залишкові напруження мають негативний вплив на точність зварних деталей, викликаючи у останніх залишкові деформації згину, скручування, повздовжнього скорочення. Також дані напруження мають негативний вплив на втомну міцність та корозійну стійкість як зварних з'єднань, так і конструкцій в цілому [1]. Для усунення залишкових зварювальних напружень та деформацій застосовують відповідні конструктивні та технологічні заходи, наприклад, різні методи обробки металевих конструкцій після зварювання [2].

Одним із перспективних технологічних методів регулювання напружено-деформованого стану є електродинамічна обробка (ЕДО) зварних авіаційних та суднобудівних конструкцій, виготовлених з легких сплавів [3, 4]. Принцип дії ЕДО оснований на спільній дії на зварне з'єднання двох факторів – імпульсного електричного струму та динамічного тиску. В роботі [5] описані результати експериментальних досліджень впливу ЕДО на напружено-деформований стан зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву АМг6. Показано, що ЕДО ініціює в металі пластичні деформації розтягу. Результатом їхньої взаємодії із залишковими (пластичними) зварювальними деформаціями стискан-

ня є зниження залишкових напружень в зварному з'єднанні.

В той же час, експериментальний метод оцінки ефективності ЕДО, який описано в роботі [6], достатньо складно використовувати для пошуку оптимальних режимів обробки широкої гами металів, сплавів і зварних з'єднань. Це пов'язано із розглядом і оцінкою великої кількості технологічних варіантів ЕДО на відповідність встановленому критерію оптимізації – зниженню залишкових зварювальних напружень до заданого рівня.

Крім того, для визначення напрямку удосконалення ЕДО необхідно мати інформацію про параметри напружено-деформованого стану по товщині елементів конструкцій, що зварюються. Експериментально отримати таку інформацію досить складно за застосування існуючих методик, оскільки зазвичай зони реєстрації напружень розміщуються на зовнішніх поверхнях зварних конструкцій [7]. Таким чином, доцільним способом розв'язання поставленої проблеми є застосування методів математичного моделювання.

Метою даної роботи є розробка методу та відповідної математичної моделі для оцінки напружено-деформованого стану пластин із алюмінієвого сплаву АМг6 від впливу складової ЕДО – ударної дії електрода-індентора.

Методика досліджень. Створення динамічного тиску на поверхнях пластин, що обробляють-

* Друкується за матеріалами доповіді на міжнародній конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ, 31 травня – 02 червня 2021 р.

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,

Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, П.В. Гончаров, Ю.М. Сидоренко, П.Р. Устименко, 2021

ся ЕДО, проводиться за схемою, що представлена на рис. 1. Зразки 4, що обробляються ЕДО, у вигляді пластин розташовані на робочому столі 5. За допомогою електричного ланцюга установки, що містить ємність C та індуктор L , формується магнітне поле відповідної потужності. Під дією даного поля диск 2 разом з електродом-індентором 3 отримують різні значення початкової швидкості руху (V_0) в напрямку робочого стола 5. Значення V_0 були вибрані на основі попередніх досліджень, по результатах яких було встановлено кореляцію швидкості зростання значень імпульсного струму при ЕДО із V_0 . Ударна взаємодія електрода-індентора ЕДО з поверхнею пластин призводить до формування в них широкої гами напружено-деформованих станів в залежності від значення V_0 . Слід зазначити, що в даній роботі розглядається ударна взаємодія електрода-індентора ЕДО з пластиною, яка знаходиться у ненапруженому стані, тобто в ній відсутні залишкові напруження.

Створення математичної моделі описаного вище процесу доцільно проводити з використанням спрощеної двовимірної (2D) плоскої постановки. Розрахункова схема задачі щодо процесу ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною представлена на рис. 2.

Розв'язання задачі проводили за допомогою програми ANSYS/LS-DYNA [8, 9]. Для побудови скінченно-елементної сітки (СЕС) задачі використовували 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 [10–12]. Як відомо, у лагранжевому підході використовується рухома скінченно-елементна сітка, яка жорстко зв'язана зі середовищем та деформується разом з ним.

Наявність описаної вище геометричної симетрії тіл, що ударно взаємодіють, дозволяє розглядати лише половину їхнього перерізу з одночасним на-

кладанням на неї відповідних граничних умов. До цих умов відноситься накладання заборони на переміщення вузлів СЕС тіл, що знаходяться на вісі симетрії, в горизонтальному напрямку X . Наявність в схемі електродинамічної обробки пластин робочого стола 5 (рис. 1) доцільно замінити спіранням на абсолютно жорстку основу 3 (рис. 2), яка у математичній постановці буде еквівалентна накладанню заборони на переміщення у вертикальному напрямку Y вузлам СЕС, які належать нижній поверхні пластини, що контактує зі столом.

Досвід розв'язання задач подібного класу показує, що кількість рядів (шарів) скінченних елементів, що приходяться на одиницю товщини металевієї пластини, повинна бути не менш десяти [13]. Тому для побудови скінченно-елементної моделі пластини та електрода-індентора був обраний скінченний елемент з максимальним характерним розміром – 0,1 мм. Побудована СЕС задачі зі скінченим елементом такого характерного розміру мала такі характеристики: кількість (шт.) скінчених елементів – 128203; вузлів – 131042.

Для чисельного моделювання процесів високошвидкісного удару в більшості практичних задач використовуються континуальні моделі (макромоделі) середовища, що досліджується [11]. Основою макромоделей 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 [14]:

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

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

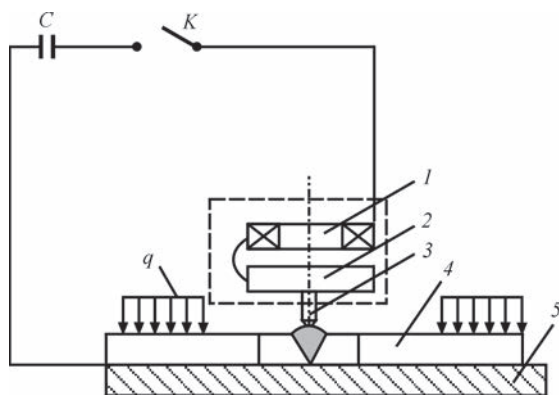


Рис. 1. Схема електродинамічної обробки пластин: 1 – індуктор; 2 – диск; 3 – рухомий електрод-індентор; 4 – зразок, що обробляється; 5 – робочий стіл; q – навантаження, що фіксує зразок

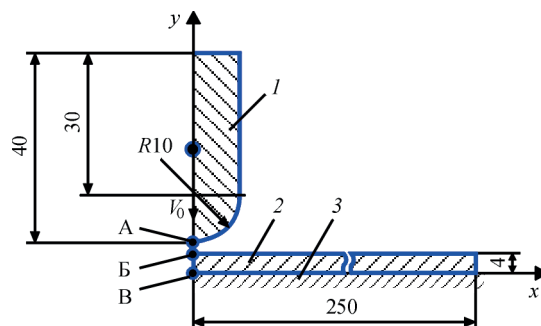


Рис. 2. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластин, що обробляються ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа, 4 – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора; Б – пластини; В – на зворотній поверхні пластини

рівняння руху середовища:

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

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень, Па;
рівняння енергії для одиниці маси:

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

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

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

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

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

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

де G – модуль зсуву, Па; $D_{\sigma_{ij}}$ – компоненти девіатора напружень, тоді

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

де p – середнє нормальне напруження (Па) має вигляд:

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

Величина питомої потужності пластичної деформації визначається як:

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

де Y – динамічна межа плинності матеріалу, що досліджується.

Замикається система рівнянь рівнянням стану середовища у вигляді:

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

В математичній постановці поведінку матеріалів пластини (алюмінієвий сплав АМг6) та електрода-ін-

Таблиця 2. Розрахункові параметри зони ефективної пластичної деформації

Швидкість руху електрода-індентора (V_0), м/с	Глибина вдавлювання (Δy), мм	Глибина зони (y), мм	Ширина зони (x), мм	Максимальне значення ϵ_{eff}^p
1	0,02	0,46	0,68	0,076
5	0,17	1,95	1,96	0,174
10	0,46	4,00	2,97	0,238

дентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описувався за допомогою ідеальної пружно-пластичної реологічної моделі матеріалу, яка в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/LS-DYNA має назву PLASTIC-KINEMATIC. Для даної моделі значення динамічної межі плинності матеріалу (Y) приймалося рівним значенню границі текучості (σ_T). Відповідні величини параметрів даної моделі в роботі були прийняті такими:

– пластина з розмірами 500×500×4 мм із алюмінієвого сплаву АМг6:

густина (ρ), кг/м ³	2640
модуль пружності (E), ГПа.	71
коефіцієнт Пуассона (μ)	0,34
межа плинності (σ_T), МПа	150

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

густина (ρ), г/м ³	8940
модуль пружності (E), ГПа.	128
коефіцієнт Пуассона (μ)	0,35
межа плинності (σ_T), МПа	300

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

$$D_{\sigma_1}^2 + D_{\sigma_2}^2 + D_{\sigma_3}^2 \leq \frac{2}{3} Y^2,$$

де $D_{\sigma_1}, D_{\sigma_2}, D_{\sigma_3}$ – головні компоненти девіатора напружень, Па.

Результати математичного моделювання та їх обговорення. Проведений чисельний аналіз показав відмінності в процесі взаємодії пластини 2 та електрода-індентора 1 (рис. 2) за різних значень його початкової швидкості руху (табл. 1).

Із табл. 1 видно, що збільшення V_0 з 1 до 10 м/с збільшує час контактної взаємодії тіл на 35 %. Внаслідок цього сформувалася різна глибина вдавлювання електрода-індентора в пластину.

Глибина вдавлювання знаходилася, як величина вертикального переміщення вздовж лінії удару точки B , яка знаходиться на зовнішній поверхні пластини на осі симетрії y (рис. 2):

$$y = y_0 - y_k,$$

Таблиця 1. Розрахунковий час взаємодії електрода-індентора з пластиною

Швидкість руху електрода-ударника V_0 , м/с	Час контакту, мкс		
	Початок	Закінчення	Тривалість
1	96	172	76
5	20	106	86
10	10	112	102

де y_0 – початкова координата точки B до моменту взаємодії тіл, мм; y_k – значення координати точки B після взаємодії тіл, мм.

Розрахункові значення глибини вдавлювання індентора в пластину представлені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що різне значення глибини Δu стало наслідком формування різних розмірів зони ефективної пластичної деформації ε_{eff}^p , яка визначалася за формулою:

$$\varepsilon_{eff}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні деформації.

Тут слід відмітити, що глибина зони пластичних деформацій (y) вимірюється від контактної поверхні пластини вздовж лінії удару. Значення ширини зони (x) (табл. 2), вираховується від вісі симетрії задачі у горизонтальному напрямку x (рис. 2) та вказано без врахування симетрії задачі.

Часові етапи (кінетика) формування зони ефективних пластичних деформацій (ε_{eff}^p , в) пластини по усій її товщині в момент контакту з електродом-індентором, що рухається зі швидкістю $v_0 = 10$ м/с, показаний на рис. 3. З рисунку видно, що на 20 мкс процесу взаємодії індентора з пластиною форма профілю зони ефективних пластичних деформації нагадує форму круго-

вого сегменту (рис. 3, а). Величина ε_{eff}^p в даний момент досягає значення 0,15. На 40 мкс процесу (рис. 3, б) границі даної зони виходять на зворотну поверхню пластини. Тобто електроду-індентору знадобилося 30 мкс для формування зони пластичних деформацій по всій товщині пластини (період з 10 мкс (табл. 1) до 40 мкс (рис. 3, б)). В цей момент величина ε_{eff}^p зростає на 25 % до $\varepsilon_{eff}^p = 0,20$. У подальшому (60, 80 мкс) форма профілю зони трансформується з трикутної (рис. 3, б) на форму трапеції зі зростанням ε_{eff}^p до 0,22 та 0,24 відповідно (рис. 3, в, г).

При тому у період часу від 40 до 80 мкс зона, де $\varepsilon_{eff}^p = 0,14$, розповсюджується по товщині пластини, змінюючи форму від кругового сегменту (40 мкс) до трапеції (60...80 мкс). Після часу, що дорівнює 80 мкс (рис. 3, г), на зворотній поверхні пластини формується локальна зона, де $\varepsilon_{eff}^p = 0,24$, що перевищує ε_{eff}^p у зоні контакту. Такий результат можна пояснити інерційною складовою процесу взаємодії двох тіл, яка у порівнянні зі ударно-хвильовою у даній задачі має значну перевагу. В результаті контакту частина кінетичної енергії індентора поступово передається пластині. Після чого в ній формується хвиля стискування, яка змушує шари матеріалу рухатися вслід за собою вер-

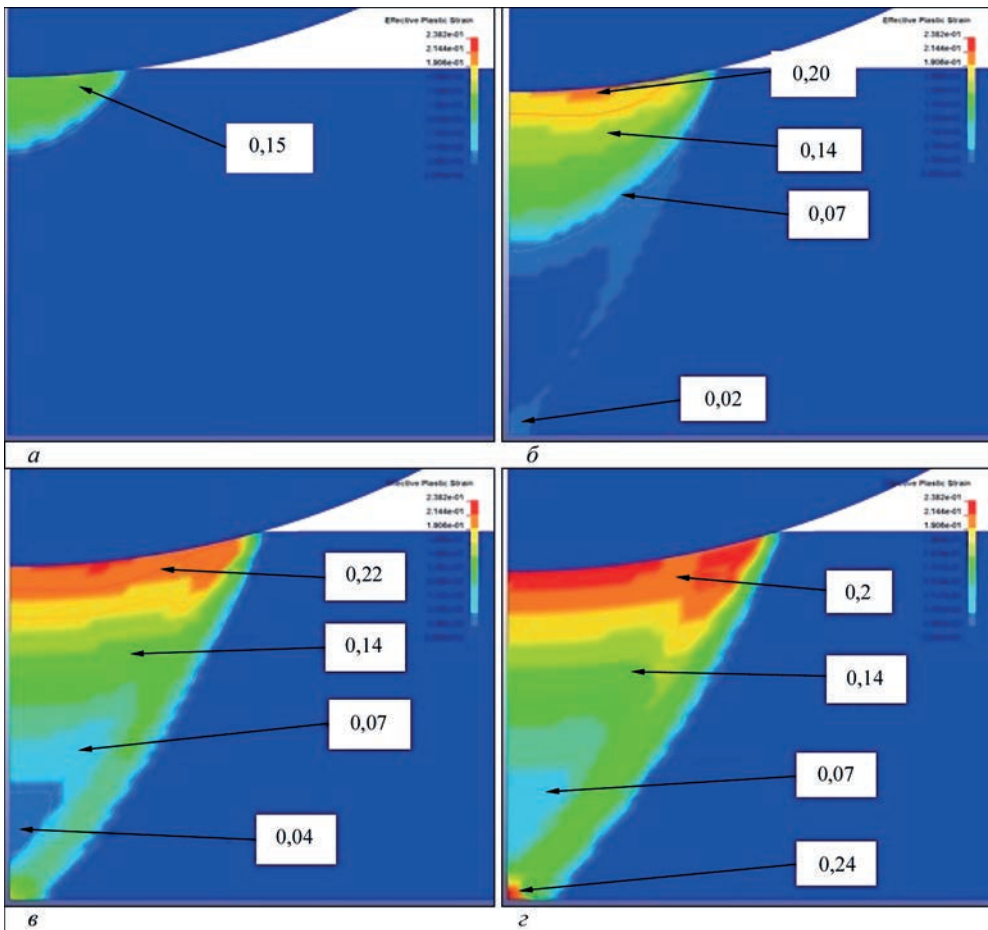


Рис. 3. Процес формування зони ефективних пластичних деформацій ε_{eff}^p в пластині (швидкість індентора 10 м/с) у період часу, мкс: а – 20; б – 40; в – 60; г – 80

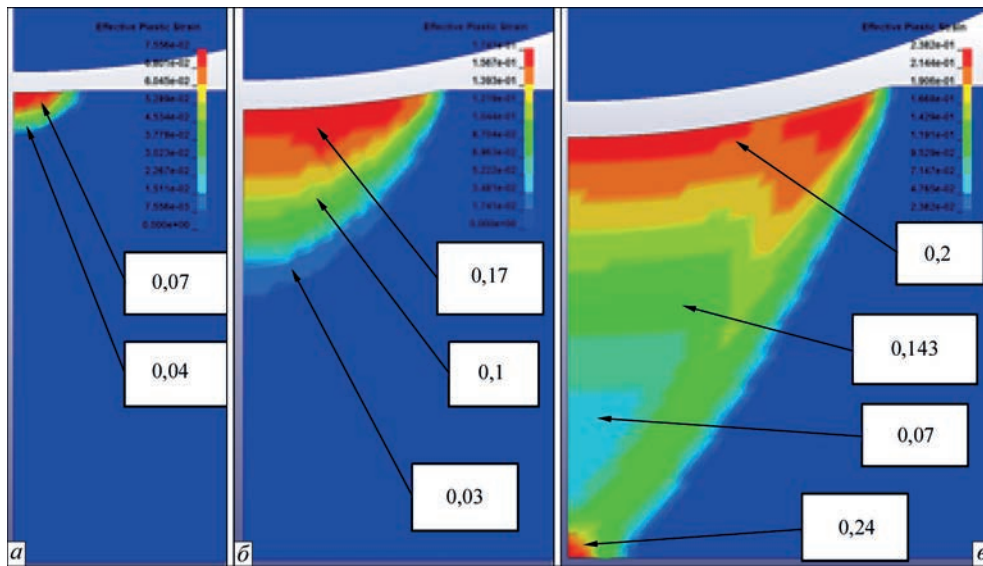


Рис. 4. Залишковий розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій в середині пластини за різних значень швидкості зіткнення з електродом-індентором, м/с: а – 1; б – 5; в – 10

тикально у напрямку робочого стола. Зустрівши на своєму шляху жорстку опору матеріал пластини відбивається від неї. У зв'язку з тим, що цей процес не є миттєвим, то першими зупиняться прикордонні з робочим столом шари матеріалу пластини. В подальшому вони будуть намагатися розпочати свій рух у зворотному напрямку. Але зробити це їм заважають інші рухомі шари матеріалу пластини, які продовжують наближатися до стола. В результаті цього прикордонна область пластини стає затисненою між нерухомим абсолютно жорстким столом та рухомою частиною матеріалу пластини. Таким чином, величина ε_{eff}^p отримує додатковий імпульс для збільшення свого значення. Тобто при $v_0 = 10$ м/с має місце «ефект відбиття» шарів матеріалу на зворотній поверхні пластини, які контактують з жорсткою основою 3 (рис. 2).

Залишковий розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій по товщині пластини за різних значень швидкості зіткнення з електродом-ін-

дентором показаний на рис. 4. З рис. 4 видно, що радіус відбитку на поверхні пластини від взаємодії з електродом-індентором практично відповідає ширині зони пластичного деформування x (табл. 2) на відміну від зони пластичного деформування на зворотній поверхні, яка звужується по товщині. Таким чином, форма зони пластичного деформування має форму трикутника. Але завдяки «ефекту відбиття» залишкові значення ε_{eff}^p на зворотній поверхні пластини є вищими за ε_{eff}^p на поверхні контакту.

Кінетика значень ефективної пластичної деформації в точках пластини, розташованих на різних відстанях від зони контакту по лінії удару, за різних значень швидкості руху v_0 електрода-індентора, представлена на рис. 5. Так, у разі руху індентора зі швидкістю $v_0 = 5$ м/с (рис. 5, а) максимальні значення ε_{eff}^p формуються в зоні контакту електрода-індентора і пластини (т. Б, рис. 2), які представлені в табл. 2. Якщо $v_0 = 10$ м/с, то до

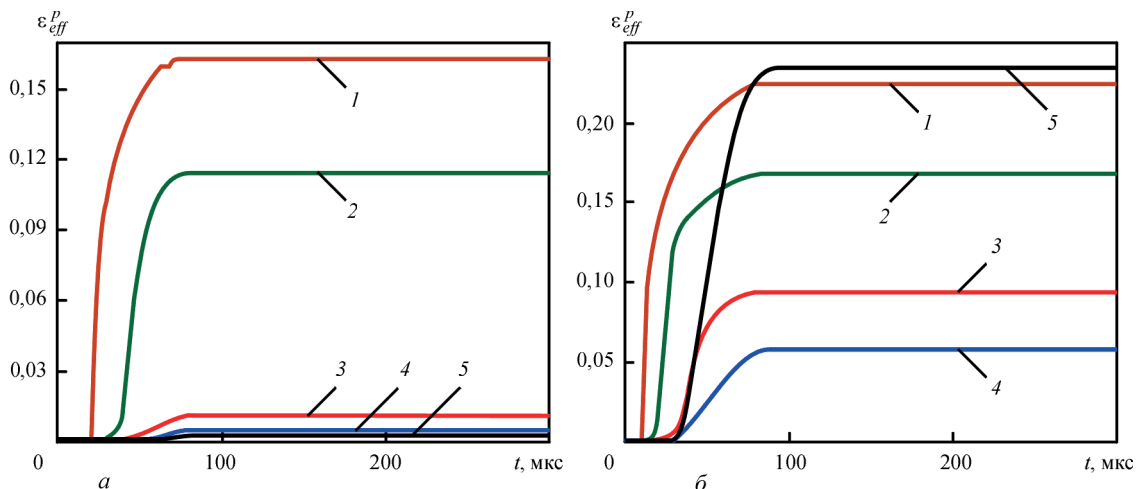


Рис. 5. Зміна з часом значень ефективної пластичної деформації ε_{eff}^p в точках пластини, розташованих на різних відстанях від точки контакту (мм: 1 – 0; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4) по лінії удару, за різних значень швидкості руху електрода-індентора, м/с: а – 5; б – 10

$t = 80$ мкс максимальні значення величини ϵ_{eff}^p теж формуються в місті контакту електрода-індентора. Але після 80 мкс цей процес суттєво змінюється (рис. 5, б). З цього моменту значення ϵ_{eff}^p для точки, розташованої на зворотній поверхні пластини (точка В, рис. 2), починає поступово перевищувати аналогічні значення для точки А. Це можна пояснити «ефектом відбиття», механізм якого наведено вище.

В той же час, залежності ϵ_{eff}^p (рис. 5) не дають можливості оцінити повну картину деформованого стану пластини, наприклад, положення зон стиску та розтягу.

На рис. 6 представлено розподіл складових пластичної деформації ϵ_x^p та ϵ_y^p . Можна бачити, що на швидкості $v_0 = 1$ м/с індентор має практично поверхневий вплив на матеріал пластини (що підтверджує дані рис. 4, а), на відміну від взаємодії пластини та індентора, коли швидкість останнього становила 5 м/с (рис. 6, в, з) та 10 м/с (рис. 6, д, е),

що підтверджує дані рис. 4, б, в, при якій ϵ_x^p та ϵ_y^p розподіляються по товщині пластини.

При $v_0 = 5$ м/с, значення вертикальної компоненти ϵ_y^p пластичної деформації перевищують значення компоненти ϵ_x^p . При цьому, значення ϵ_y^p , які в поверхневих шарах металу знаходяться у стані інтенсивної плинності, є переважно стискаючими. Пікове значення складової ϵ_y^p становить $-0,143$. Це також свідчить про формування широкої зони деформацій стиску. Розподіл горизонтальної компоненти ϵ_x^p є практично ідентичним ϵ_y^p , але тільки в зоні наближеної до контактної поверхні. По мірі проходження в середину пластини по лінії удару зона деформацій стиску поступово перетворюється зі значення $\epsilon_x^p = -0,0134$ на зону деформацій розтягу з піковим значенням в центрі зони $\epsilon_x^p = 0,015$.

Якщо індентор має швидкість $v_0 = 5$ м/с, то деформації стискування вертикальної компоненти ϵ_y^p мають два екстремуми, значення яких близькі до пластичної течії, але на досить локалізованих ділянках. Перша – на контактній поверхні у

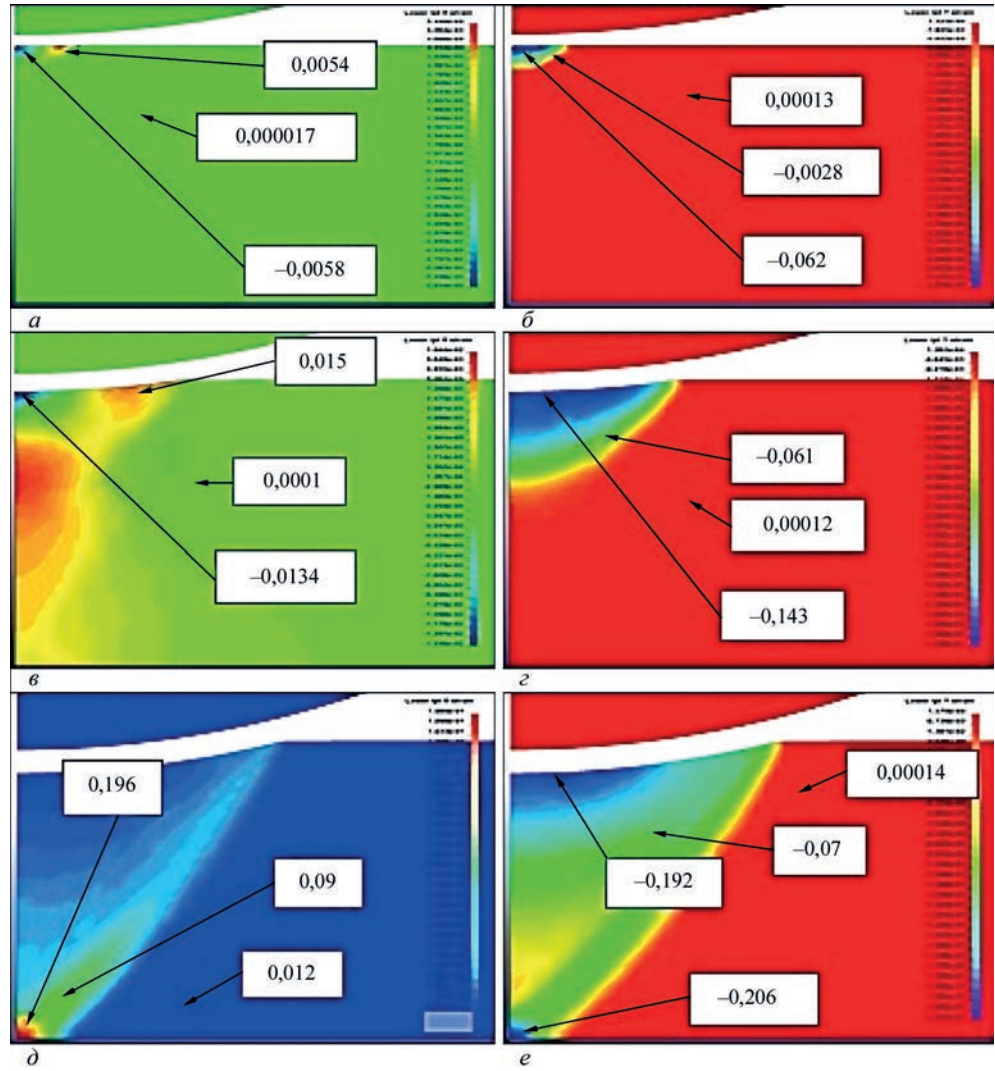


Рис.6. Залишковий розрахунковий розподіл значень компонент пластичних деформацій по товщині пластини за різних значень швидкості зіткнення (м/с: а, б – 1; в, г – 5; д, е – 10) з електродом-індентором: а, в, д – ϵ_x^p ; б, г, е – ϵ_y^p

точці B (рис. 2) зі значенням $\varepsilon_y^p = -0,192$, друга – на зворотній поверхні ($\varepsilon_y^p = -0,206$) у точці B (рис. 2). В той же час значення компоненти ε_x^p на контактній поверхні дорівнює $0,01$, а на тильній – переходить у деформацію розтягу, яка зростає до значення $\varepsilon_x^p = 0,196$.

Всі ці процеси відобразилися на кінетиці (зміни з часом) компонент напружень в пластині за значення швидкості руху електрода-індентора $V_0 = 5$ м/с (рис. 7). Слід зазначити, що кінетика напружень при $V_0 = 10$ м/с близька до представленої на рис. 7.

На рис. 7 видно, що процес взаємодії індентора з пластиною супроводжується формуванням в останній на лінії удару стискаючих напружень σ_y з виходом даних значень на межу плинності. По закінченню контакту між тілами напруження σ_y падають до нуля з наступним зростанням значення на поверхні пластини до 75 МПа, якщо $V_0 = 5$ м/с (рис. 7, б) і до 50 МПа, якщо $V_0 = 10$ м/с. Зміна значень σ_x має різноспрямований характер. В зоні контакту при $V_0 = 5$ та 10 м/с у пластині формуються переважно напруження стискування зі значенням до -110 МПа, а на відстані від зони 4 мм – напруження розтягування. Суперпозиція в пластині напружень стискування (-110 МПа), які формуються в результаті зіткнення з індентором, із залишковими зварювальними напруженнями розтягування, величина яких може становити 150 МПа, має забезпечити суттєве зниження останніх до майже ненапруженого стану. Взаємодія в пластині напружень розтягування (110 МПа), які формуються в результаті ударної дії індентора, із залишковими зварювальними напруженнями розтягування, величина яких може становити 150 МПа, має забезпечити перевищення межі плинності сплаву АМгб, наслідком чого є перехід деформованого шару до пружно-пластичного стану, де домінують пластичні деформації розтя-

гування. Це, як і у випадку взаємодії напружень розтягування і стискування на поверхні контакту, має сприяти зниженню початкового (до обробки) рівня залишкових напружень розтягування.

На рис. 8 представлено відповідний залишковий розрахунковий розподіл компонент напружень σ_x та σ_y за різних значень швидкості зіткнення з електродом-індентором. При швидкості $V_0 = 1$ м/с зона впливу дії індентора досить локалізована, а середні значення σ_x та σ_y по товщині пластини досягають відповідно -6 та -3 МПа.

При швидкості удару $V_0 = 5$ м/с по мірі віддалення від лінії зіткнення в горизонтальному напрямку x зона напружень σ_y розтягу поступово змінюється зоною стискування з подальшим виходом на ненапружений стан.

Крім того, лінія переходу напружень σ_y від розтягування до стиснення при $V_0 = 5$ м/с має практично вертикальне розташування.

Якщо швидкість зростає до 10 м/с вихід σ_y на нульове значення відбувається після повторного переходу функції в область напружень, що розтягують. При цьому лінія переходу між зонами стиску і розтягу (на відміну від лінії переходу між зонами на швидкості $V_0 = 5$ м/с) нахилена під кутом 75° . При $V_0 = 10$ м/с σ_y стискування, значення яких сягають до -47 МПа, локалізовані на краю зони контакту і розвинуті по товщині зразка. Вони урівноважені σ_y розтягу, які локалізовані по товщині зразка і сягають до 54 МПа.

Можна бачити, що контакт індентора на швидкості $V_0 = 1$ м/с не викликає суттєвих змін компоненти σ_x напруженого стану по товщині пластини. Впровадження при $V_0 = 5$ м/с забезпечує значення σ_x стиску в зоні контакту у поверхні пластини до -72 МПа, які компенсуються $\sigma_x = 75$ МПа розтягу поблизу зворотної поверхні зразка. Значно більше зона впливу стискування до $\sigma_x = -35$ МПа, яка розповсюджується майже по усій товщині пластини

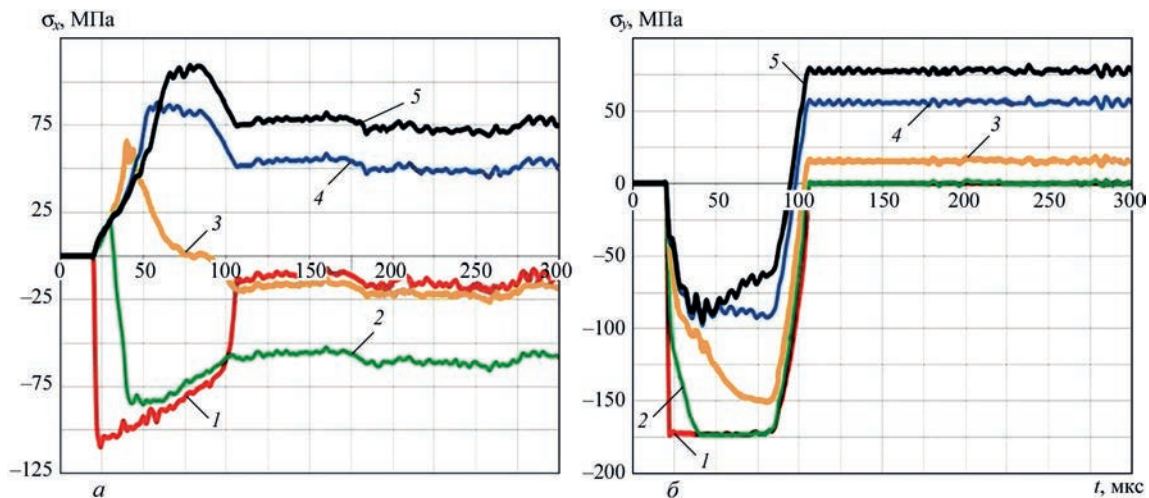


Рис. 7. Графіки зміни з часом значень горизонтальної σ_x (а) та вертикальної σ_y (б) компонент напружень в точках пластини, розташованих на різних відстанях від зони контакту (мм: 1 – 0; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4) по лінії удару за значення швидкості руху індентора $V_0 = 5$ м/с

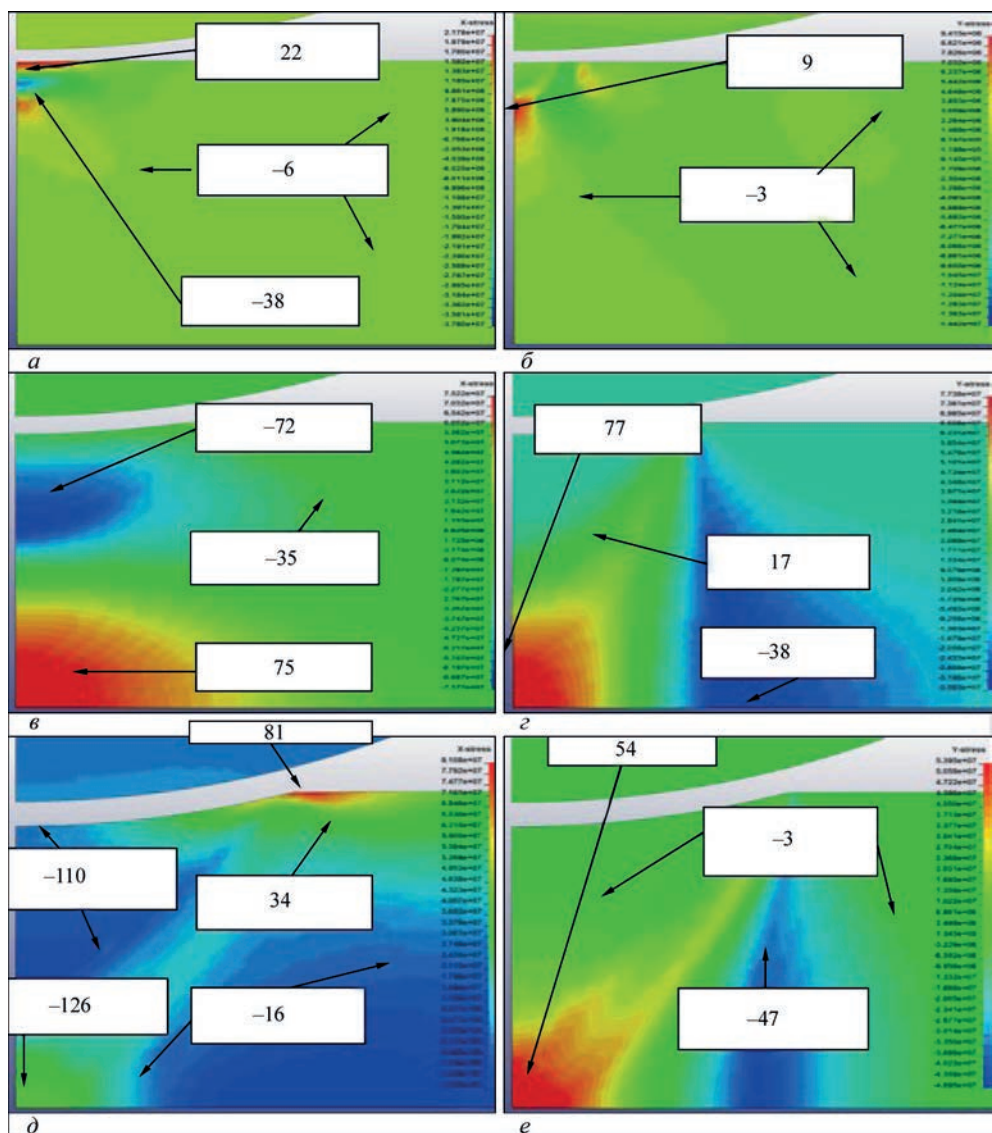


Рис. 8. Розрахунковий розподіл компонент залишкових напружень (МПа) в середині пластини за різних значень швидкості (м/с: а, б – 1; в, г – 5; д, е – 10) зіткнення з електродом-індентором: а, в, д – σ_x ; б, г, е – σ_y

у зони, наближеної до лінії удару. Інший розподіл σ_x має місце при $V_0 = 10$ м/с, де на зовнішній і зворотній поверхнях домінують напруження σ_x стискування відповідно від -110 до -126 МПа, розповсюджені по товщині пластини, що якісно підтверджує ефект відбиття пластично деформованих шарів пластини при $V_0 = 10$ м/с. На крайку зони контакту ($\sigma_x = 81$ МПа) розтягу локалізовані на малій ділянці і суттєво не впливають на загальний напружений стан пластини внаслідок її контакту з індентором.

При порівнянні розподілів σ_x при $V_0 = 5$ та 10 м/с можна бачити, що максимальні значення компоненти σ_x напружень стискування досягаються при $V_0 = 10$ м/с у зовнішніх поверхневих шарах вздовж лінії удару. При $V_0 = 10$ м/с ділянки напружень σ_x стискування розповсюджені на більшій площі перерізу пластини (у порівнянні із σ_x при $V_0 = 5$ м/с).

Для оцінювання адекватності моделювання експериментально досліджували розподіл поздовжньої компоненти пластичних деформацій ϵ_x^p на по-

верхніх B і B (рис. 2) відпаленої пластини зі сплаву АМг6 розмірами $400 \times 360 \times 4$ мм. Режим термічної обробки пластини виключав наявність в металі будь-яких початкових напружень. ЕДО поверхні B проводили на режимі, електрофізичні параметри якого відповідають значенню $V_0 = 10$ м/с. Розподіли ϵ_x^p , які наведено на рис. 9, реєстрували згідно методики із застосуванням деформометра з базою вимірювання $B_d = 25$ мм [15]. Можна бачити, що вплив ударної дії розповсюджується по перерізу пластини, а значення ϵ_x^p на боці B (протилежному контакту) переважають ϵ_x^p на боці B (контакту). Домінуючий вплив ЕДО спостерігається по ширині пластини (вздовж лінії X) на боці, протилежному обробці. Це в якісному відношенні підтверджує результати моделювання, подані на рис. 7, і дозволяє зробити висновок, що результатом взаємодії шарів металу, що рухаються у протилежних напрямках вздовж лінії удару (ЛІУ) є «ефект відбиття», механізм якого наведено вище. Наслідком «ефекту від-

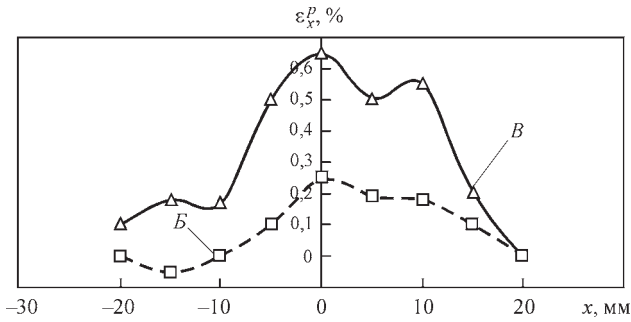


Рис. 9. Розподіл поздовжньої компоненти пластичних деформацій ε_x^p на поверхнях B і \bar{B} (рис. 2) відпаленої пластини зі сплаву АМгб після ударної дії на поверхню B при $V_0 = 10$ м/с вздовж ЛУ, де $X = 0$

биття» є підвищений рівень залишкових деформацій ε_x^p на поверхні, протилежній обробці.

Порівняння результатів моделювання (рис. 7) і експерименту (рис. 9) проводили на поверхнях пластини B і \bar{B} (рис. 2). Можна бачити, що на зворотній поверхні \bar{B} розраховані і експериментально визначені значення ε_x^p поблизу лінії удару сягають відповідно 1,2 та 0,65 %, а на контактній B – відповідно 0,6 та 0,25 %, тобто відрізняються приблизно у два рази. Таким чином, розраховані величини ε_x^p переважають ті, що отримані експериментально. Невідповідність результатів можна пояснити неврахуванням еволюції механічних характеристик сплаву АМгб внаслідок дії імпульсного струму щільністю $\geq 1,0$ кА/мм², тобто реалізації ефекту електропластичності [4, 5]. Урахування впливу імпульсного струму на напружено-деформований стан сплаву АМгб при ЕДО представлено в роботі [16].

Також різниця результатів моделювання і експериментальної оцінки розподілу деформацій вздовж лінії удару пояснюється тим, що значення ε_x^p , отримані методом механічної тензометрії, є усередненими по довжині B_d . Наслідком цього є менші експериментальні значення ε_x^p у порівнянні із розрахованими на базі моделі.

Аналізуючи загальні результати розрахунків напруженого стану при їх порівнянні із експериментальними даними, наведеними в [4, 5], можна зазначити, що моделювання дозволяє здійснювати прогнозування напружено-деформованого стану зварної пластини, який є результатом її взаємодії із напівсферичним індентором. При тому швидкість контакту задається електрофізичними параметрами електродинамічної обробки. Це дозволяє оптимізувати параметри режиму ЕДО широкою гамою металів, сплавів і зварних з'єднань з метою мінімізації їх напружено-деформованого стану.

Висновки

1. Розроблено математичну модель впливу ударної дії електрода-індентора на напружено-деформований

стан ненапруженої пластини із алюмінієвого сплаву АМгб при її електродинамічній обробці.

2. На основі чисельного аналізу процесу ударної взаємодії електрода-індентора із пластиною отримані параметри напружено-деформованого стану, які можуть сприяти зниженню залишкових напружень в зварному шві.

3. Якщо швидкість руху електрода-індентора зростає до 10 м/с, то на зворотній поверхні пластини величина ефективної пластичної деформації починає перевищувати аналогічні значення на контактній поверхні.

4. Суперпозиція в пластині напружень стиску, які формуються в результаті зіткнення з електродом-індентором, із залишковими зварювальними напруженнями розтягування має забезпечити суттєве зниження останніх.

5. Експериментальні дослідження розподілів пластичних деформацій на зовнішній і зворотній поверхнях пластини зі сплаву АМгб в результаті ударної дії при швидкості руху електрода-індентора 10 м/с в якісному відношенні підтвердили адекватність моделювання.

Список літератури/References

- Masubuchi, K. (1980) *Analysis of Welded structures*. Pergamon Press.
- Лашченко Г.И., Демченко Ю.В. (2008) *Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций*. Киев, Экотехнология.
- Lashchenko, G.I., Demchenko, Yu.V. (2008) *Energy-saving technologies of postwelding treatment of metal structures*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mihoduy, O.L., Khokhlova, J.A. (2016) Investigation of residual stress in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment. *Journal of Magnesium and Alloys*, 4, 77–82.
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mihoduy, O.L. (2014) Repair the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld Research and Application*, 1, 55–62.
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mikhodui, O.L., Sidorenko, Yu.M. (2018) Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 50, 2, 246–253. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9965-x>.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Timoshenko, A.N. et al. (2017) Effect of the Electrodynamic Treatment on the Life of AMg6 Aluminum Alloy Weld Joint. *Ibid*, 49, 2, 234–238. <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>.
- Sidorenko, Yu.M., Shlenskii, P.S. (2013) On the Assessment of Stress-strain State of the Load-Bearing Structural Elements in the Tubular Explosion Chamber. *Ibid*, 45, 2, 210–220.
- <http://www.ansys.com/>
- <http://www.ls-dyna.ru/>
- Муйземнек А.Ю., Богач А.А. (2005) *Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. Учеб. пособие*. Пенза, Информ.-изд. центр ПГУ.
- Mujzemnek, A.Yu., Bogach, A.A. (2005) *Mathematical modeling of shock and explosion processes in LS-DYNA program. In: Manual*. Penza, Inform. Izd. Tsentr PGU [in Russian].
- Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н. и др. (2000) *Численные методы в задачах физики взрыва и удара. Учебник для вузов*. Селиванов В.В. (ред.). Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Т.3.
- Babkin, A.V., Kolpakov, V.I., Okhitin, V.N. et al. (2000) *Numerical methods in problems of explosion and shock physics. In: Manual for higher educ. instit. Ed. by V.V. Selivanov*. Moscow, MGUTU, Vol. 3 [in Russian].

12. Рудаков К.М. (2007) *Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навчальний посібник*. Київ, НТУУ «КПІ».
Rudakov, K.M. (2007) *Numerical methods of analysis in dynamics and strength of structures. In: Manual*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
13. Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. (2001) Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации. *Оборонная техника*, 1-2, 17–20.
Odintsov, V.A., Sidorenko, Yu.M. (2001) Modeling of the explosion process of standard fragmentation cylinder with varying degrees of detail. *Oboronnaya Tekhnika*, 1-2, 17–20 [in Russian].
14. Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mykhodui, O.L., Sydorenko, Yu.M. (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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9877-1>
15. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. (1987) *Напряжения и деформации при сварке*. Киев, Вища школа.
Kasatkin, B.S., Prokhorenko, V.M., Chertov, I.M. (1987) *Welding stresses and strains*. Kiev, Vyscha Shkola [in Russian].
16. Sydorenko, Y.M., Pashchyn, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2020) Effect of Pulse Current on Residual Stresses in AMg6 Aluminum Alloy in Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 52(5), 731–737. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00226-2>

MODELING OF STRESSED AND STRAIN STATES OF AMg6 ALLOY DUE TO IMPACT ACTION OF INDENTER-ELECTRODE IN ELECTRODYNAMIC TREATMENT

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mikhoduj¹, P.V. Goncharov¹, Yu.M. Sydorenko², P.R. Ustymenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 03056, Kyiv, 37 Peremohy Ave, Ukraine.

The calculated model of the process of impact interaction of the indenter-electrode with the plate of aluminum AMg6 alloy during electrodynamic treatment is presented. The solution of the problem is carried out on the basis of the Prantle-Reiss relations for the motion of an elastic-plastic medium in a plane two-dimensional Lagrangian formulation using the program «ANSYS/LS-DYNA». The results of the calculation of the process of forming areas of residual stresses and plastic deformations under the impact of the indenter are presented. It was found that under the impact of the indenter at a speed of 10 m/s on the back surface of the plate of AMg6 alloy, the values of plastic deformations are higher than on the back one. This is explained by the effect of reflection of a plastically deformed layer of metal from the back side of the plate, which stays in the conditions of resting on a rigid support. An experimental verification of the model adequacy during evaluation of the distribution of plastic deformations after electrodynamic treatment of a welded plate of AMg6 alloy was performed. 16 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: *electrodynamic treatment, aluminum alloy, impact interaction, mathematical modeling, residual stresses, plastic deformations, electrode-indenter, motion, elastic-plastic medium*

Надійшла до редакції 26.03.2021



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція

ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ та ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

6 – 11 вересня 2021 р.

Україна, Одеса

Голова програмного комітету

академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

- Лазерне та електронно-променеве зварювання, різання, наплавлення, термообробка, нанесення покриттів
- 3D технології
- Електронно-променева плавка та рафінування
- Моделювання променевих технологій
- Гібридні процеси
- Неруйнівний контроль
- Матеріалознавчі проблеми лазерних та електронно-променевих технологій

ОБЛАДНАННЯ ♦ ТЕХНОЛОГІЇ ♦ МОДЕЛЮВАННЯ



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ
Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2021>

