

## Вплив ударної дії електрода-індентора на напружено-деформований стан сплаву АМгб при електродинамічній обробці

Л. М. Лобанов<sup>а</sup>, М. О. Пашин<sup>а</sup>, О. Л. Миходуй<sup>а</sup>, Ю. М. Сидоренко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

<sup>б</sup> Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

*Описано розрахункову модель процесу ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною з алюмінієвого сплаву АМгб при електродинамічній обробці зварних з'єднань. Задача розв'язувалась у плоскій двовимірній лагранжівій постановці з використанням програми ANSYS/LS-DYNA. Представлено результати розрахунку процесу формування областей залишкових напружень і пластичних деформацій при ударному пружно-пластичному впливі електрода-індентора.*

**Ключові слова:** електродинамічна обробка, алюмінієвий сплав, ударна взаємодія, залишкові напруження, пластичні деформації, скінченноелементна модель, електрод-індентор, теорія пластичної течії.

**Вступ.** Зварювання, що є одним з основних технологічних процесів у машино-, суднобудуванні та будівництві, зумовлює виникнення у конструкціях залишкових напружень розтягу, максимальні значення яких близькі до границі текучості металу. Під впливом залишкових напружень відбувається деформація деталей, зокрема згин, крутіння, поздовжнє укорочення та ін. Таким чином, дані напруження негативно впливають як на міцність з'єднань, так і на міцність конструкції в цілому [1]. Для усунення залишкових зварювальних напружень та деформацій використовують відповідні конструктивні та технологічні 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 із легких сплавів [3, 4]. Принцип дії ЕДО базується на спільному впливі на зварне з'єднання двох факторів: імпульсного електричного струму та динамічного тиску, при цьому в металі ініціюються пластичні деформації розтягу. Результатом взаємодії цих факторів із залишковими (пластичними) зварювальними деформаціями стиску є зниження залишкових напружень у зварному з'єднанні.

Для вирішення питання пошуку оптимального режиму обробки зварних з'єднань описаний раніше [5] експериментальний метод оцінки ефективності ЕДО є достатньо складним при використанні. Це пов'язано з розглядом і оцінкою великої кількості варіантів обробки на відповідність установленому критерію оптимізації.

Окрім того, для визначення шляхів удосконалення ЕДО необхідно мати інформацію про параметри напружено-деформованого стану по товщині елементів конструкцій, що зварюються. Експериментально отримати таку інформацію практично неможливо, оскільки тензодатчики розміщуються виключно на зовнішніх поверхнях зварних конструкцій [6]. Таким чином, єдиним способом розв'язання поставленої задачі є використання чисельних (математичних) методів досліджень.

Метою даної роботи є розробка методу та відповідної математичної моделі для оцінки напружено-деформованого стану пластин з алюмінієвого сплаву АМгб після ударної дії електрода-індентора.

**Методика досліджень.** На рис. 1 показано схему виникнення динамічного тиску на поверхнях пластин після ЕДО. Зразки у вигляді пластин розташовують на робочому столі. За допомогою електричного ланцюга установки, що містить ємність  $C$  та індуктор, формується магнітне поле відповідної потужності. Під дією цього поля диск разом з електродом-індентором набувають різних значень початкової швидкості руху  $V_0$  в напрямку робочого стола. Значення  $V_0$  вибрано за результатами попередніх досліджень. Ударна взаємодія електрода-індентора ЕДО з поверхнею пластин призводить до формування в них різного рівня залишкових напружень та деформацій в залежності від значення  $V_0$ . Необхідно зазначити, що в даній роботі розглядається ударна взаємодія електрода-індентора ЕДО з пластиною, яка знаходиться у ненапруженому стані, тобто в ній відсутні зварювальні напруження.

Розробку математичної моделі вищеописаного процесу доцільно проводити з використанням спрощеної двовимірної (2D) плоскої постановки. Розрахункову схему процесу ударної взаємодії електрода-індентора з пластинами наведено на рис. 2.

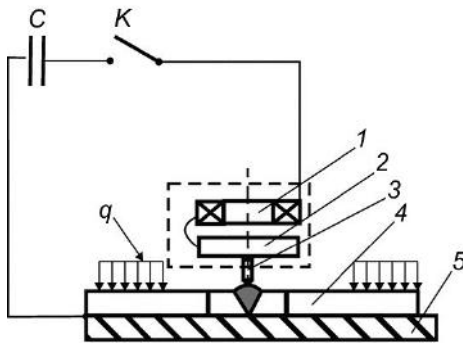


Рис. 1

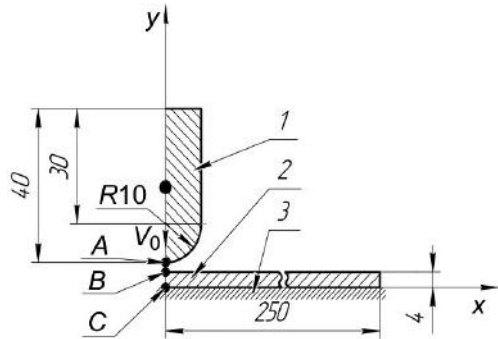


Рис. 2

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

Рис. 2. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластин після ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа. (A – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора, B – точка на зовнішній поверхні пластини, C – точка на зворотній поверхні пластини.)

Задача розв'язувалася за допомогою програми ANSYS/LS-DYNA [7, 8]. Для побудови скінченноелементної сітки (СЕС) задачі використовувався плоский двовимірний скінченний елемент у вигляді прямокутника SOLID162.

Враховуючи те, що в даній задачі розглядається напружено-деформований стан твердих тіл, комп'ютерне моделювання необхідно проводити з використанням лагранжевого підходу [9–11]. Як відомо, у цьому підході використовується рухома скінченноелементна сітка, яка жорстко зв'язана із середовищем та деформується разом із ним.

Нявністю вищеописаної геометричної симетрії тіл, що ударно взаємодіють, дозволяє розглядати лише половину їхнього перерізу з одночасним накладанням на неї відповідних граничних умов. До цих умов відноситься накладання обмежень на переміщення вузлів СЕС тіл, що знаходяться на вісі симетрії, в горизонтальному напрямку  $x$ . Робочий стіл у схемі електродинамічної обробки пластин (рис. 1) доцільно замінити опиранням на абсолютно жорстку основу (рис. 2). Остання у математичній постановці буде еквівалентна накладанню обмежень на переміщення у вертикальному напрямку у вузлах СЕС, які належать нижній поверхні пластини, що контактує зі столом.

Аналіз результатів розв'язку задач подібного класу показує, що кількість рядів (шарів) скінченних елементів на одиницю товщини металевої пластини має бути не меншою, ніж десять [12]. Тому для побудови скінченноелементної моделі пластини та електрода-індентора використовували скінченний елемент із максимальним характерним розміром 0,1 мм. Побудована СЕС задача зі скінченним елементом такого характерного розміру мала наступні характеристики: кількість скінченних елементів – 128203 шт; кількість вузлів – 131042 шт.

Для чисельного моделювання процесів високошвидкісного удару в більшості практичних задач використовуються континуальні моделі (макромоделі) середовища, що досліджується [10]. В основі макромоделей лежить гіпотеза про неперервність 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 для опису адіабатичного руху пружно-пластичного середовища густиною  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) обрати декартову систему координат, система відповідних рівнянь у двовимірній постановці буде мати такий вигляд [13]:

рівняння неперервності:

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

де  $u$ ,  $v$  – компоненти вектора швидкості руху середовища, м/с;  
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  $\sigma_{ij}$  – компоненти тензора напружень, Па;  
рівняння енергії для одиниці маси:

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

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

де  $\dot{\varepsilon}_{ij} = d\varepsilon_{ij}/dt$  – компоненти тензора швидкостей деформації (с<sup>-1</sup>).

Для дослідження процесів, пов'язаних із 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 як

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

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

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

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

$p$  – середнє нормальне напруження, Па

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

Величина питомої потужності пластичної деформації визначається так:

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

де  $Y$  – динамічна границя текучості матеріалу, що досліджується.

Доповнюється система рівнянь рівнянням стану середовища у вигляді

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

У математичній постановці поведінка матеріалів пластини (алюмінієвий сплав АМг6) та електрода-індентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описується за допомогою ідеальної пружно-пластичної моделі матеріалу, яка в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/LS-DYNA має назву "PLASTIC-KINEMATIC". Для даної моделі значення динамічної границі текучості матеріалу  $Y$  приймається рівним значенню границі текучості  $\sigma_T$ . Відповідні величини параметрів даної моделі прийнято такими:

пластина розміром  $500 \times 500 \times 4$  мм з алюмінієвого сплаву АМг6: густина  $\rho = 2640$  кг/м<sup>3</sup>; 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 із початковою швидкістю руху  $V_0 = 1, 5$  і  $10$  м/с: густина  $\rho = 8940$  кг/м<sup>3</sup>; модуль пружності  $E = 128$  ГПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,35$ ; границя текучості  $\sigma_T = 300$  МПа.

По всій області руху ідеально-пластичного середовища має виконуватися співвідношення, що являє 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 та електрода-індентора (рис. 2) за різних значень його початкової швидкості руху (табл. 1).

Т а б л и ц я 1

**Розрахунковий час взаємодії електрода-індентора з пластиною**

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

Із даних табл. 1 видно, що зі збільшенням швидкості  $V_0$  на порядок (з 1 до 10 м/с) час контактної взаємодії тіл зростає на 35%, внаслідок чого величина вдавлення електрода-індентора в пластину є різною (рис. 3).

Глибина вдавлення знаходиться як величина переміщення точки  $B$  на зовнішній поверхні пластини по осі симетрії  $y$  (рис. 2):

$$\Delta y = y_0 - y_k,$$

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

Розрахункові значення глибини вдавлення індентора в пластину наведено в табл. 2.

Т а б л и ц я 2

## Розрахункові параметри області ефективної пластичної деформації

Швидкість руху електрода-індентора $V_0$ , м/с	Глибина вдавлення $\Delta y$ , мм	Глибина області $y$ , мм	Ширина області $x$ , мм	$\varepsilon_{eff}^p$
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

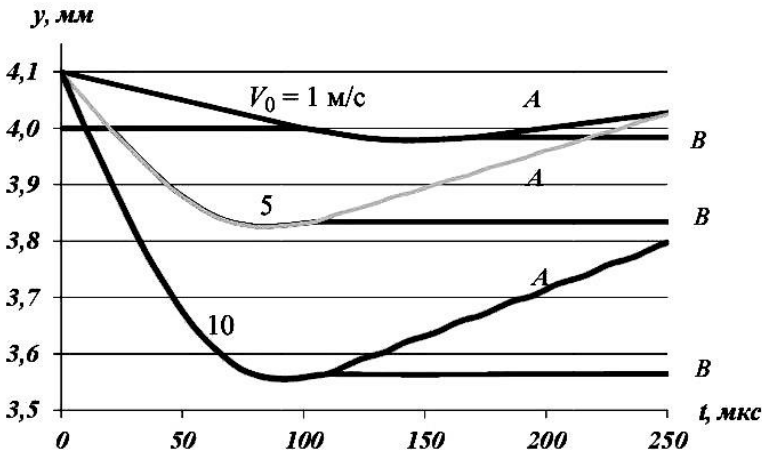


Рис. 3. Зміна з часом вертикальної координати точок, розташованих на поверхнях електрода-індентора (A) та пластини (B), по осі симетрії за різних значень швидкості їхньої взаємодії.

Із даних табл. 2 видно, що внаслідок формування області ефективної пластичної деформації  $\varepsilon_{eff}^p$  різних розмірів значення  $\Delta y$  теж різні. Величина  $\varepsilon_{eff}^p$  визначається за формулою [13]

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

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

Необхідно відмітити, що глибина області пластичних деформацій  $y$  вимірюється від контактної з електродом-індентором поверхні пластини у середину її товщини. Значення ширини області  $x$  (табл. 2) вираховується від вісі симетрії задачі у горизонтальному напрямку  $x$  (рис. 2) без врахування симетрії задачі. В іншому випадку дане значення потрібно помножити на два. Також необхідно зауважити, що розміри областей  $x$  та  $y$  визначаються за умови, що  $\varepsilon_{eff}^p \geq 0,01$ .

Значення  $\Delta y$ ,  $x$ ,  $y$  та  $\varepsilon_{eff}^p$ , в залежності від швидкості руху електрода-індентора  $V_0$ , описуються практично лінійними функціональними залежностями:

$$\Delta y = k_1 V_0 - b_1;$$

$$y = k_2 V_0 + b_2;$$

$$x = k_3 V_0 + b_3;$$

$$\varepsilon_{eff}^p = k_4 V_0 + b_4,$$

де  $k_1 = 0,049$  с;  $b_1 = 0,046$  м;  $k_2 = 0,394$  с;  $b_2 = 0,035$  м;  $k_3 = 0,252$  с;  $b_3 = 0,525$  м;  $k_4 = 0,018$  с/м;  $b_4 = 0,068$ .

Значення коефіцієнта апроксимації указаних залежностей за методом найменших квадратів відповідно становлять:  $R_{\Delta y}^2 = 0,986$ ,  $R_y^2 = 0,999$ ,  $R_x^2 = 0,983$  і  $R_{\varepsilon_{eff}^p}^2 = 0,966$ .

Процес формування області ефективних пластичних деформацій  $\varepsilon_{eff}^p$  в пластині по усій її товщині в момент контакту з електродом-індентором, що рухається зі швидкістю  $V_0 = 10$  м/с, показано на рис. 4.

Видно, що на 20-й мкс форма профілю області ефективних пластичних деформацій нагадує форму кругового сегменту. Величина  $\varepsilon_{eff}^p$  в даний момент сягає 0,15. На 40-й мкс границі даної області виходять на нижню поверхню пластини, тобто електроду-індентору знадобилося 30 мкс для формування області пластичних деформацій по всій товщині пластини (період із 10 мкс – табл. 1 до 40 мкс – рис. 4). У цей момент величина  $\varepsilon_{eff}^p$  збільшується на 25% (до 0,20). У подальшому (на 60- і 80-й мкс) форма профілю області трансформується з трикутної (40 мкс) на трапецієподібну зі зростанням  $\varepsilon_{eff}^p$  до 0,22 та 0,24 відповідно. При цьому у період часу від 40 до 80 мкс область, де  $\varepsilon_{eff}^p = 0,14$ , розповсюджується по товщині пластини зі зміною форми від кругового сегменту (40 мкс) до трапеції (60–80 мкс). Після 80 мкс на зворотній поверхні пластини формується локальна область, де  $\varepsilon_{eff}^p = 0,22$ , що є близьким до  $\varepsilon_{eff}^p$  на поверхні контакту.

Залишковий розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій по товщині пластини за різних значень швидкості зіткнення з електродом-індентором показано на рис. 5. Видно, що радіус відбитка на поверхні пластини від взаємодії з електродом-індентором практично відповідає ширині області пластичного формування  $x$  (табл. 2).

Зміну значень ефективної пластичної деформації в точках пластини, розташованих на різній відстані від поверхні контакту по лінії удару, за різних значень швидкості руху  $V_0$  електрода-індентора наведено на рис. 6. Так, у разі руху індентора зі швидкістю  $V_0 = 5$  м/с (рис. 6,а) максимальні значення  $\varepsilon_{eff}^p$  (табл. 2) формуються на поверхні контакту електрода-індентора і пластини (на рис. 2 т. В). Якщо  $V_0 = 10$  м/с,

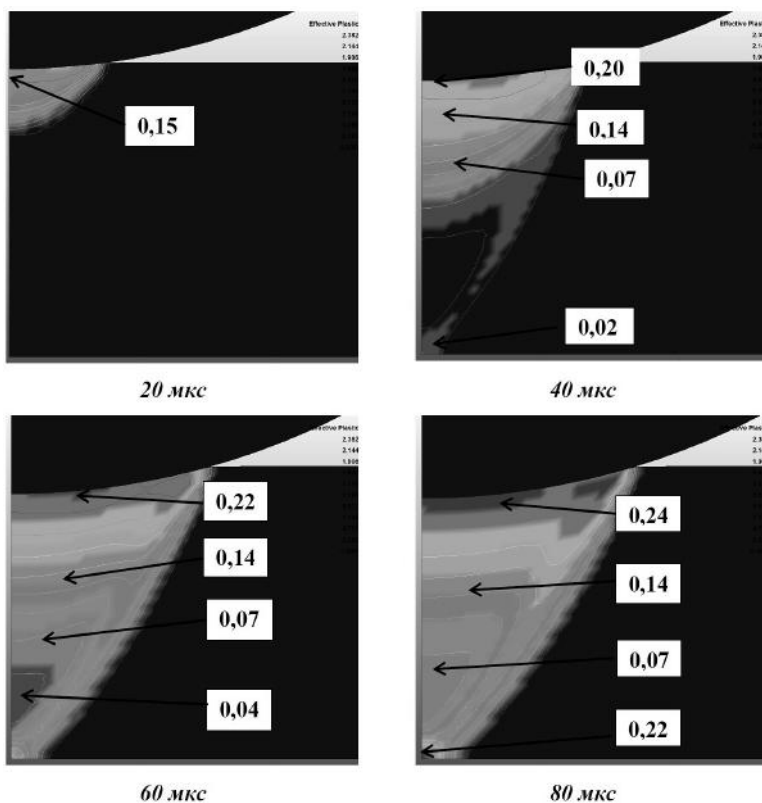


Рис. 4. Процес формування області ефективних пластичних деформацій  $\epsilon_{eff}^P$  в пластині ( $V_0 = 10$  м/с).

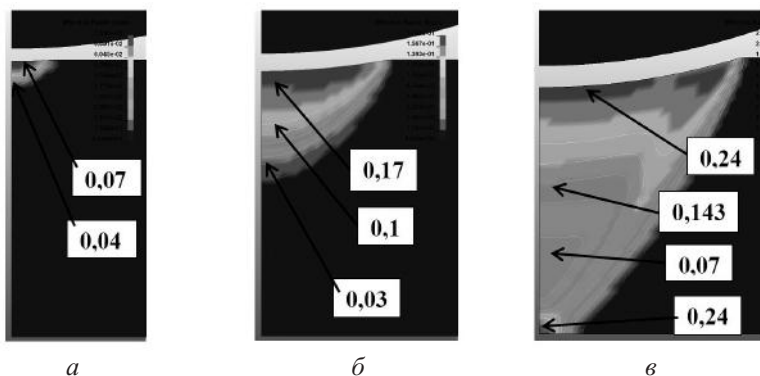


Рис. 5. Залишковий розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій в середині пластини за різних значень швидкості зіткнення з електродом-індентором: а –  $V_0 = 1$  м/с; б –  $V_0 = 5$  м/с; в –  $V_0 = 10$  м/с.

то до  $t = 80$  мкс максимальні значення  $\epsilon_{eff}^P$  теж формуються на поверхні контакту електрода-індентора і пластини. Але після 80 мкс цей процес суттєво змінюється (рис. 6,б). Із цього моменту значення  $\epsilon_{eff}^P$  для точки, розташованої на нижній поверхні пластини (на рис. 2 т. С), починає поступово перевищувати аналогічне значення для точки В.

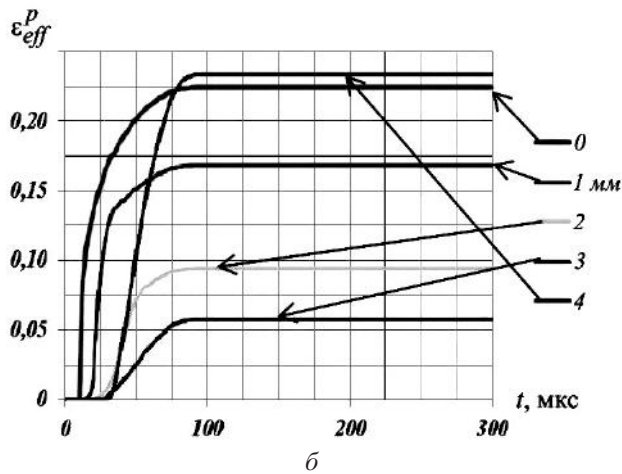
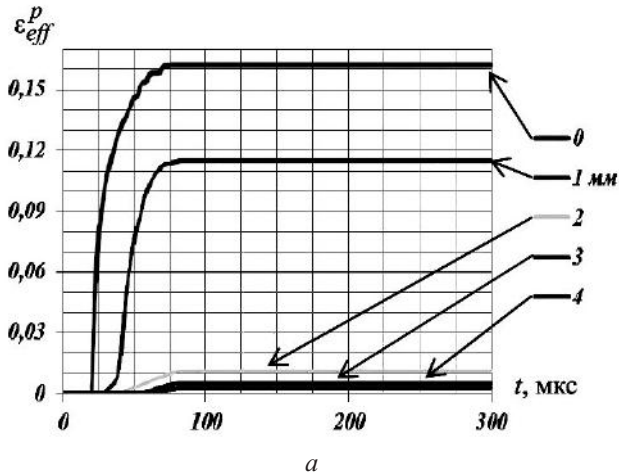


Рис. 6. Зміна з часом значень ефективної пластичної деформації  $\varepsilon_{eff}^p$  в точках пластини, розташованих на різній відстані (0–4 мм) від точки контакту по лінії удару при  $V_0 = 5$  (а) і 10 м/с (б).

У той же час залежності  $\varepsilon_{eff}^p$  від  $t$  (рис. 6) не дають можливості оцінити повну картину деформованого стану пластини, наприклад положення областей стиску та розтягу.

Для візуалізації деформованого стану пластини на рис. 7 показано розподіл складових пластичної деформації  $\varepsilon_x^p$  та  $\varepsilon_y^p$ . Видно, що при  $V_0 = 1$  м/с електрод-індентор має практично поверхневий вплив на матеріал пластини (це підтверджують дані, наведені на рис. 5,а), на відміну від взаємодії пластини та індентора, коли швидкість останнього становила 5 і 10 м/с (рис. 5,б,в), за якої  $\varepsilon_x^p$  та  $\varepsilon_y^p$  розподілялися по товщині пластини. Окрім того, якщо швидкість електрода-індентора становить 5 м/с, підсумкова величина пластичної деформації формується в основному за рахунок вертикальної компоненти  $\varepsilon_y^p$ . При цьому значення  $\varepsilon_y^p$  переважно від'ємні. Екстремальне значення складової  $\varepsilon_y^p = -0,143$ , що свідчить про формування широкої області деформацій стиску. Розподіл горизонтальної компоненти  $\varepsilon_x^p$  є практично ідентичним  $\varepsilon_y^p$ , але тільки в області, що наближена до контактної поверхні. По мірі



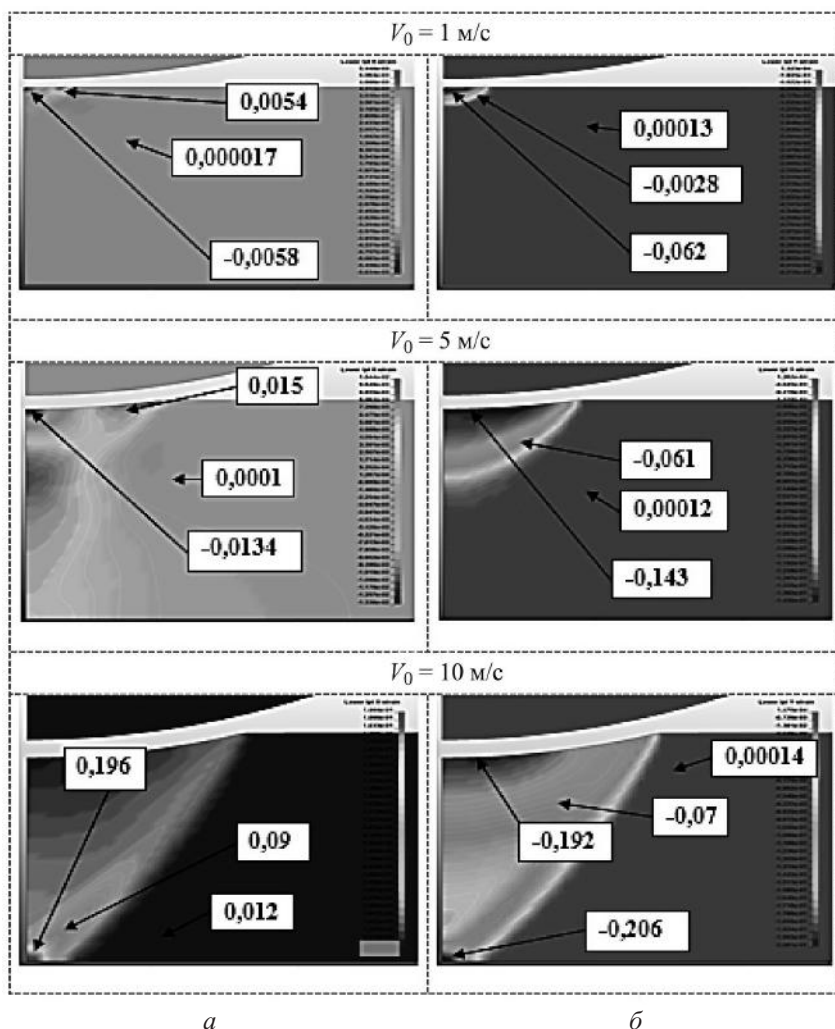


Рис. 7. Залишковий розрахунковий розподіл значень компонент пластичних деформацій по товщині пластини за різних значень швидкості зіткнення з електродом-індентором: а –  $\varepsilon_x^p$ ; б –  $\varepsilon_y^p$ .

проходження в середину пластини по лінії удару область деформації стиску поступово зі значенням  $\varepsilon_x^p = -0,0134$  перетворюється на область деформації розтягу з піковим значенням у центрі області 0,015.

Якщо швидкість електрода-індентора 10 м/с, область деформації стиску вертикальної компоненти  $\varepsilon_y^p$  має два екстремуми. Перший – на контактній поверхні при  $\varepsilon_y^p = -0,192$  (на рис. 2 т. В), другий – на нижній поверхні при  $\varepsilon_y^p = -0,206$  (на рис. 2 т. С). У той же час компонента  $\varepsilon_x^p$  на поверхні контакту дорівнює нулю, а на тильній поверхні переходить у деформацію розтягу (0,196).

Розподіл компонент  $\varepsilon_x^p$  і  $\varepsilon_y^p$  по лінії удару наведено на рис. 8. Видно, що для компоненти  $\varepsilon_x^p$  по лінії удару у досліджуваному діапазоні швидкостей  $V_0$  домінуючими є деформації розтягу, на відміну від деформацій стиску  $\varepsilon_y^p$ . При цьому підвищення значень  $\varepsilon_x^p$  та  $\varepsilon_y^p$  прямо залежать від зростання  $V_0$ .

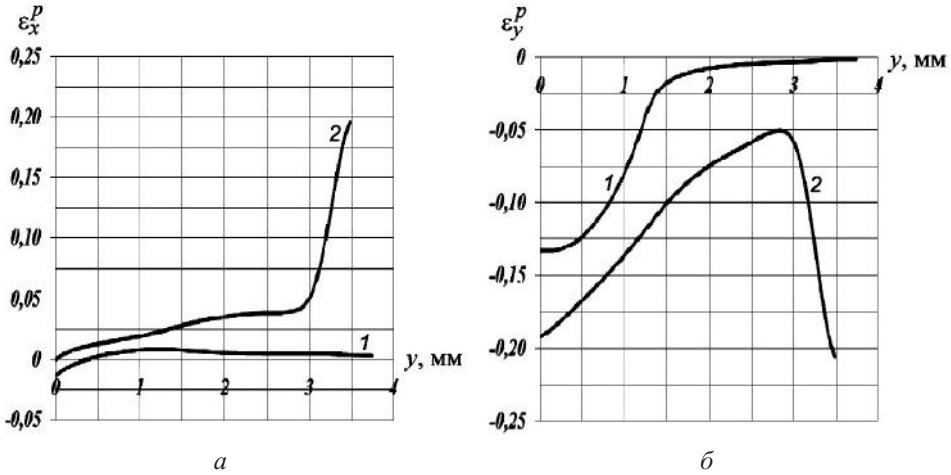


Рис. 8. Розрахунковий розподіл компонент залишкової пластичної деформації  $\varepsilon_x^p$  (а) і  $\varepsilon_y^p$  (б) в пластині по лінії удару: 1 –  $V_0 = 5$  м/с; 2 –  $V_0 = 10$  м/с.

Всі ці процеси впливають на кінетику (зміна з часом) компонент напружень у пластині за значення швидкості руху електрода-індентора  $V_0 = 5$  м/с (рис. 9). Слід зазначити, що кінетика напружень при  $V_0 = 10$  м/с близька до показаної на рис. 9. Видно, що процес взаємодії індентора з пластиною супроводжується формуванням в останній на лінії удару напружень стиску  $\sigma_y$  з досягненням даних значень границі текучості. Після закінчення контакту між тілами напруження  $\sigma_y$  падають до нуля з наступним зростанням значення на поверхні пластини до 75 МПа при  $V_0 = 5$  м/с (рис. 9,б) і до 50 МПа при  $V_0 = 10$  м/с. Зміна значень  $\sigma_x$  має різноспрямований характер. У зоні контакту при  $V_0 = 5$  і 10 м/с у пластині формуються переважно напруження стиску зі значенням до  $-110$  МПа, а на відстані від неї 4 мм – напруження розтягу. Суперпозиція в пластині напружень стиску ( $-110$  МПа), які формуються в результаті контакту з електродом-індентором, із залишковими зварювальними напруженнями розтягу, величина яких може становити 150 МПа, має забезпечити суттєве зниження останніх із переходом конструкції до майже ненапруженого стану.

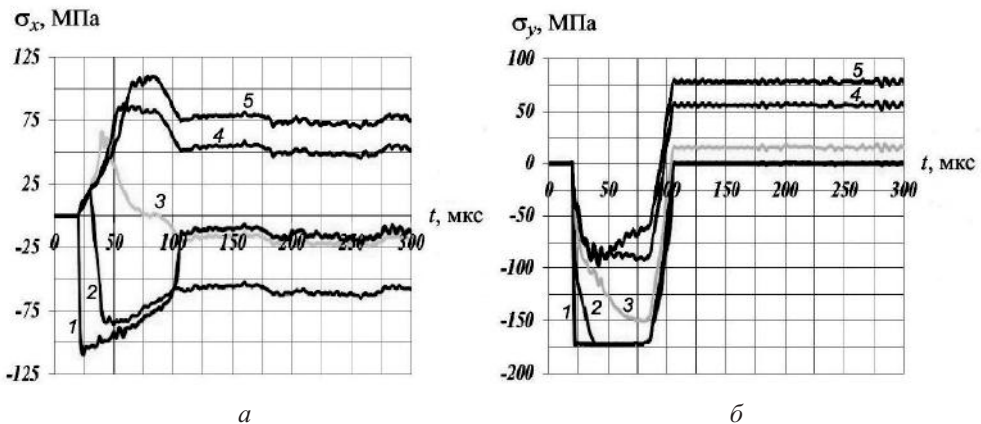


Рис. 9. Зміна з часом значень горизонтальної  $\sigma_x$  (а) і вертикальної  $\sigma_y$  (б) компонент нормального напруження у точках пластини, розташованих на різній відстані (1, 2, 3, 4, 5 – 0, 1, 2, 3, 4 мм відповідно) від точки контакту по лінії удару за значення швидкості руху електрода-індентора  $V_0 = 5$  м/с.

Для повноти оцінки напруженого стану по поперечному перерізу пластини на рис. 10 наведено відповідний залишковий розрахунковий розподіл компонент напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  за різних значень швидкості її контакту з електродом-індентором. При  $V_0 = 1$  м/с область впливу дії індентора досить незначна, а середні значення  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  по товщині пластини сягають відповідно  $-6$  і  $-2,5$  МПа.

При  $V_0 = 5$  м/с по мірі віддалення від лінії контакту в горизонтальному напрямку  $x$  (рис. 2) область напружень  $\sigma_y$  розтягу поступово змінюється на область стискання з подальшим виходом на ненапружений стан. Окрім того, лінія переходу між областями при швидкості контакту тіл  $V_0 = 5$  м/с має практично вертикальне розташування.

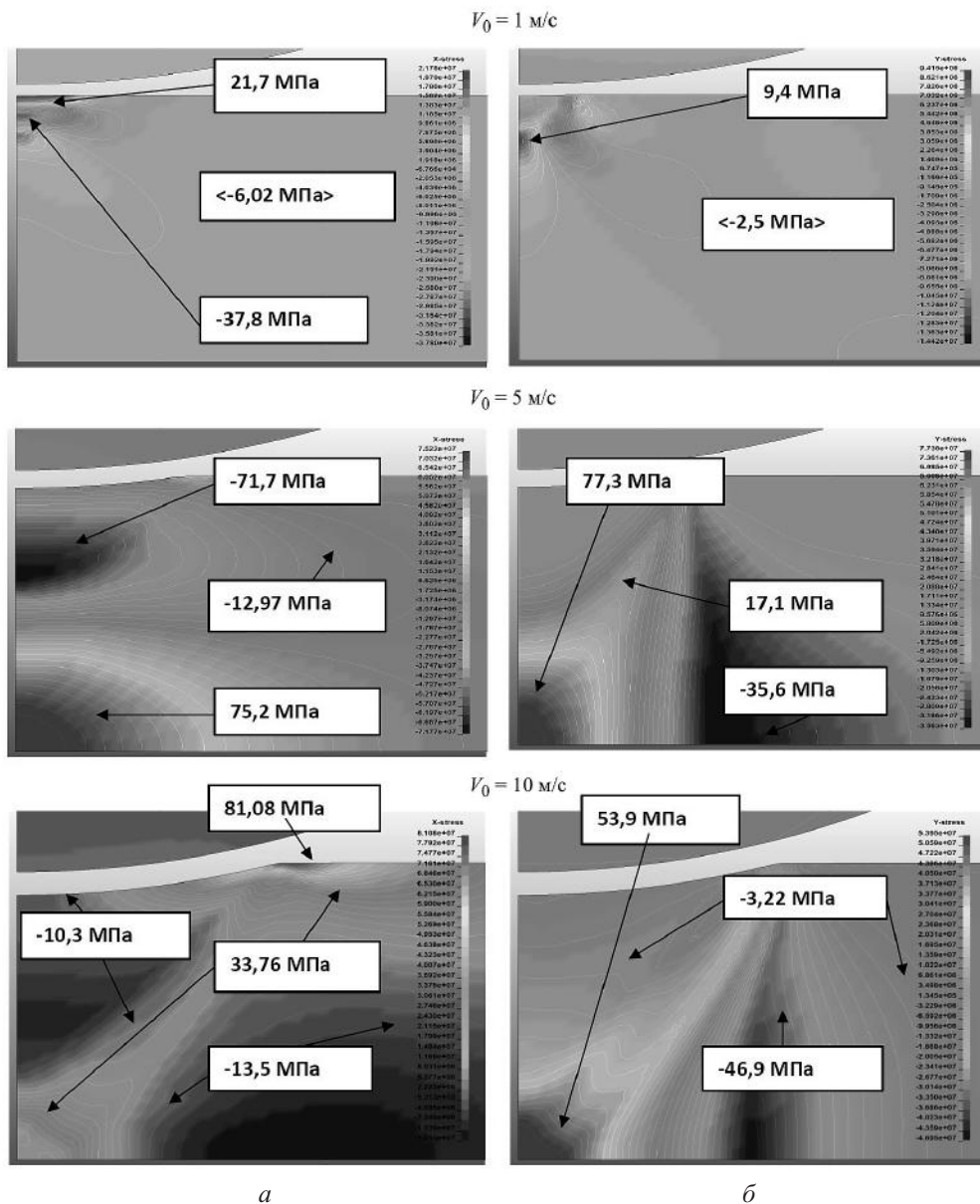


Рис. 10. Розрахунковий розподіл компонент залишкових напружень  $\sigma_x$  (а) і  $\sigma_y$  (б) у середині пластини за різних значень швидкості контакту з електродом-індентором.

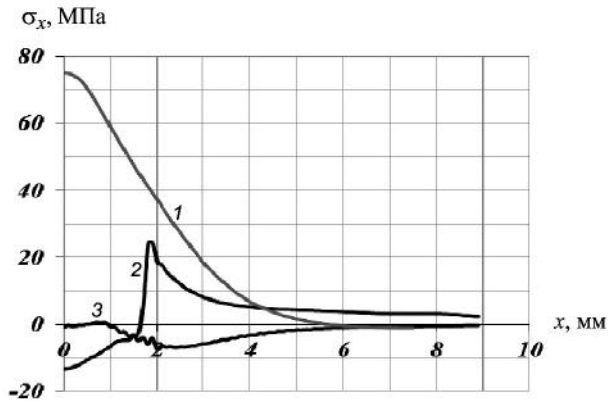


Рис. 11. Розподіл значень компоненти  $\sigma_x$  залишкових напружень по товщині пластини в горизонтальному напрямку від лінії удару при  $V_0 = 5$  м/с: 1 – поверхня контакту; 2 – по середині товщини пластини; 3 – тильна поверхня пластини.

Якщо швидкість руху електрода-індентора зростає до 10 м/с, величина  $\sigma_y$  досягає нульового значення після повторного її переходу в область напружень розтягу. При цьому кут нахилу лінії переходу між областями стиску і розтягу (на відміну від лінії переходу між областями при  $V_0 = 5$  м/с) складає  $75^\circ$ .

Із рис. 10 видно, що використання індентора при швидкості  $V_0 = 1$  м/с не викликає суттєвих змін напруженого стану в попередньо ненапруженій пластині. У той же час швидкість  $V_0 = 5$  м/с забезпечує формування на поверхні пластини напружень стиску  $\sigma_x$  до  $-72$  МПа, на нижній поверхні напружень розтягу – до  $75$  МПа. Значно більшою є область впливу напружень стиску  $\sigma_y$  (до  $-35$  МПа), яка займає майже усю товщину пластини. Інший розподіл  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  має місце при  $V_0 = 10$  м/с, де домінують напруження стиску  $\sigma_x$  (до  $-13,5$  МПа). На відміну від напружень розтягу  $\sigma_x$ , які локалізовані в зоні контакту і сягають  $81$  МПа, напруження стиску  $\sigma_x$  розповсюджені по товщині пластини. Напруження  $\sigma_y$  ( $-46,9$  МПа) локалізовані в зоні контакту і розвинуті по товщині пластини. Вони урівноважені напруженнями розтягу  $\sigma_y$ , які локалізовані по товщині пластини ( $54$  МПа). Із рис. 10 також видно, що ширина області стискування по товщині пластини неоднорідна, що підтверджують дані рис. 11, де наведено розподіл значень компоненти  $\sigma_x$  залишкових напружень по товщині пластини в горизонтальному напрямку від лінії удару при  $V_0 = 5$  м/с. По мірі віддалення від лінії удару напруження на нижній поверхні поступово зменшуються до нуля. Розподіл напруження  $\sigma_x$  на поверхні контакту характеризується формуванням локальної області зі швидким його зростанням. Окрім того, з рис. 11 видно, що область впливу ударної взаємодії двох тіл обмежується відстанню до  $5$  мм від лінії контакту.

## Висновки

1. На основі чисельного аналізу процесу ударної взаємодії електрода-індентора з ненапруженою пластинною з алюмінієвого сплаву АМг6 отримано параметри напружено-деформованого стану, які сприяють зниженню залишкових напружень у зварному шві. Область впливу ударної взаємодії двох тіл обмежується відстанню до  $5$  мм від лінії контакту.

2. Розрахунок значень глибини вдавлювання  $\Delta u$ , ширини  $x$  і глибини  $y$  області та максимальних значень ефективних пластичних деформацій  $\varepsilon_{eff}^p$  в залежності від швидкості руху електрода-індентора  $V_0$  описується лінійними функціональними залежностями.

3. При збільшенні швидкості руху електрода-індентора до 10 м/с на зворотній поверхні пластини величина ефективної пластичної деформації  $\varepsilon_{eff}^p$  починає перевищувати аналогічні значення на контактній поверхні.

4. Суперпозиція в пластині напружень стиску (–110 МПа), які формуються в результаті її зіткнення з електродом-індентором, із залишковими зварювальними напруженнями розтягу, величина яких може становити до 150 МПа, має забезпечити суттєве зниження останніх.

## Резюме

Описана расчетная модель процесса ударного взаимодействия электрода-индентора с пластиной из алюминиевого сплава АМг6 при электродинамической обработке сварных соединений. Задача решалась в двухмерной лагранжевой постановке с использованием программы ANSYS/LS-DYNA. Представлены результаты расчета процесса формирования областей остаточных напряжений и пластических деформаций при ударном упругопластическом воздействии электрода-индентора.

1. *Masubuchi K.* Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences. – Oxford; New York: Pergamon Press, 1980. – 642 p.
2. *Лащенко Г. К., Демченко Ю. В.* Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций. – Киев: Экотехнология, 2008. – 168 с.
3. *Lobanov L. M., Pashchin N. A., Mikhodui O. L., and Khokhlova J. A.* Investigation of residual stress in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment // J. Magnes. Alloys. – 2016. – 4, No. 2. – P. 77–82.
4. *Lobanov L. M., Pashchin N. A., and Mikhodui O. L.* Repair of the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method // Weld Res. Appl. – 2014. – No. 1. – P. 55–62.
5. *Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Тимошенко А. Н. и др.* Влияние электродинамической обработки на долговечность сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 // Пробл. прочности. – 2017. – № 2. – С. 30–35.
6. *Sidorenko Yu. M. and Shlenskii P. S.* On the assessment of stress-strain state of the load-bearing structural elements in the tubular explosion chamber // Strength Mater. – 2013. – 45, No. 2. – P. 210–220.
7. <http://www.ansys.com/>.
8. <http://www.ls-dyna.ru/>.
9. *Муйземнек А. Ю., Богач А. А.* Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. Учеб. пособие. – Пенза: ПГУ, 2005. – 106 с.
10. *Бабкин А. В., Колпаков В. И., Охитин В. Н. и др.* Численные методы в задачах физики взрыва и удара / Под ред. В. В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 516 с.
11. *Рудаков К. М.* Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навчальний посібник. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. – 379 с.
12. *Одинцов В. А., Сидоренко Ю. М.* Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборонная техника. – 2001. – № 1-2. – С. 17–20.
13. *Андреев С. Г., Бабкин Ю. А., Баум Ф. А. и др.* Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – М.: Физматлит, 2004. – Т. 2. – 656 с.

Поступила 13. 06. 2017