

УДК 621.791.052:539.43

## НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПЛАСТИНИ ПІСЛЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ З ЕЛЕКТРОДАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ

Ю.М. Сидоренко<sup>1</sup>,  
д-р техн. наук, професор

П.Р. Устименко<sup>1</sup>,  
аспірант

М.О. Пашин<sup>2</sup>,  
д-р техн. наук, провідний науковий співробітник

О.Л. Міходуй<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук, старший науковий співробітник

<sup>1</sup> *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ*

<sup>2</sup> *Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.150-163

**Анотація.** Методом чисельного моделювання проведено оцінку впливу форми електрода-ударника на напружено-деформований стан пластини виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг6 після їх ударної взаємодії на швидкості 10м/с. Описано особливості створення відповідних математичних моделей. Встановлено розміри зони пластичних деформацій. Визначено розподіл по товщині пластини значень компонент напружено-деформованого стану, а також глибини та ширини вм'ятини в пластині.

**Ключові слова:** електродинамічна обробка, ударна взаємодія, математичне моделювання, залишкові напруження, зварні напруження, пластичні деформації, електрод-індентор, пружно-пластичне середовище, напружено-деформований стан, ANSYS/LS-DYNA.

**Вступ.** Як відомо, використання електродинамічної обробки (ЕДО), дозволяє змінювати напружено-деформований стан (НДС) зварних з'єднань через зниження рівня залишкових зварних напружень за рахунок точкових ударів електрода-індентора в зоні зварного з'єднання з пропусканням електричного струму [1-3].

Окремі питання боротьби з залишковими напруженнями в матеріалах шляхом пропускання через них електричного струму, зокрема імпульсного, який використовується в ЕДО як одна з двох складових технології, розглядалося в роботах [4-9].

В той же час, питання ефективності боротьби з цими напруженнями за допомогою іншої складової ЕДО – ударної обробки зони зварного шва спеціальним індентором, до кінця не вивчено. На сьогодні такі дослідження в основному проводяться із застосуванням експериментальних методів [10-11]. Їх недоліком є те, що вони дозволяють встановлювати величини напружень зварювання лише на поверхні конструкції, що заварюється, та за рахунок її руйнування.

Для більш повної оцінки процесу зміни НДС таких конструкцій на допомогу приходять сучасні методи чисельного моделювання [12, 13]. У роботі [14] описані результати комп'ютерного моделювання процесу ударної взаємодії електрода-індентора зі зварною пластиною з використанням програми «ANSYS/LS-DYNA» в плоскій двовимірній лагранжевій постановці. Слід зазначити, що застосування такої постановки відповідає моделюванню процесу динамічної складової ЕДО пластини плоским електродом-індентором нескінченної довжини.

В той же час, ЕДО проводиться електродами-інденторами вісесиметричної форми, наприклад у формі циліндра із округлою торцевою поверхнею. В цьому випадку, для встановлення відмінностей у напружено-деформованому стані зварних з'єднань, що обробляються такими електродами-інденторами, необхідно створити відповідну математичну модель процесу динамічної обробки.

**Метою роботи** є математична оцінка впливу форми електрода-ударника на напружено-деформований стан зварної пластини після ударної взаємодії з електродом різної форми на швидкості 10 м/с.

**Розрахункова (математична) модель задачі.** Розрахункову схему процесу динамічної обробки пластини електродом-ударником представлено на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

Видно, що в процесі ударної взаємодії пластини (2) товщиною 4 мм та шириною 50 мм, яка виготовлена зі сплаву АМгб і розташована на абсолютно жорсткій поверхні (робочому столі 3) з мідним електродом-ударником (1), який рухається в напрямку пластини зі швидкістю  $V_0 = 10 \text{ м/с}$ .

Форма поперечного перерізу ударника умовно складається з двох фігур: прямокутника шириною 20 мм та висотою 30 мм і півкола радіусом 10 мм.

Оскільки поперечні перерізи пластини та ударника мають геометричну симетрію, то на схемі (рис. 1) представлено лише їх праві, відносно осі  $u$  (лінії удару), половини. У зв'язку з цим, проведення чисельних розрахунків із застосування плоскої двовимірної постановки буде відповідати моделюванню процесу ударної взаємодії пластини з електродом-ударникому формі паралелепіпеда з округленою формою поверхні контакту з поперечним перерізом умовно нескінченної довжини розташованої вздовж умовного зварного шва (рис. 2 (а)).

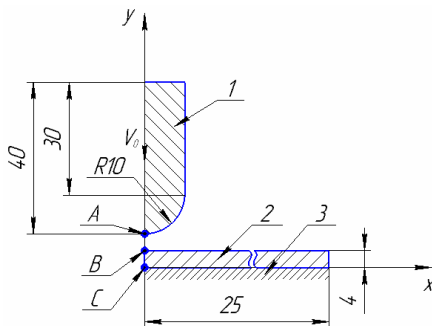


Рис. 1. Розрахункова схема процесу ударної взаємодії пластини з електродом-ударником: 1 – електрод-ударник, 2 – пластина, що оброблюється, 3 – абсолютно жорсткий стіл; точки по лінії удару: А – на поверхні ударника, В – на лицевій поверхні пластини, С – на тильній поверхні пластини,  $u$  – лінія симетрії

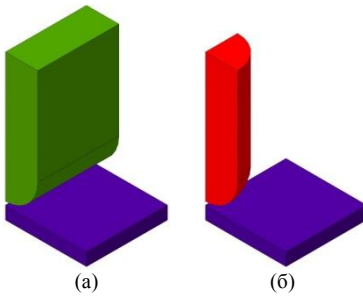


Рис. 2. Зовнішній вигляд електрода-ударника різної форми: (а) плоска видовжена, (б) вісесиметрична циліндрична

Проведення розрахунків із застосування вісесиметричної двовимірної постановки буде відповідати моделюванню процесу ударної взаємодії пластини з електродом-ударником у формі циліндру з округленою голівкою (рис. 2 (б)).

Моделювання процесу ударної взаємодії ударника з пластиною проводилося на основі співвідношень Прандтля-Рейсса [13]. Поведінка матеріалів пластини та електрода-ударника під час їхньої

взаємодії описувалася реологічною ідеально пружно-пластичною моделлю матеріалів, яка в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/LS-DYNA має назву "PLASTIC-KINEMATIC", і значення динамічної границі текучості в ній приймалося рівним границі текучості матеріалу  $\sigma_T$ . Значення параметрів даної моделі були такими:

- сплав АМг6 (пластина): густина  $\rho_0 = 2640 \text{ кг/м}^3$ ; модуль пружності першого роду  $E = 71 \text{ ГПа}$ ; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,34$ ; границя текучості  $\sigma_T = 150 \text{ МПа}$ ;
- мідь марки М1 (електрод-ударник): густина  $\rho_0 = 8940 \text{ кг/м}^3$ ; модуль пружності першого роду  $E = 128 \text{ ГПа}$ ; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,35$ ; границя текучості  $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$ .

Скінченно-елементні моделі задач для обох математичних постановок містили однакову кількість скінченних елементів та вузлів, а саме: кількість скінченних елементів (тип SOLID 162) – 128203 шт.; кількість вузлів – 131042 шт.

**Результати моделювання.** Розрахункові значення основних параметрів взаємодії електрода-ударника різної форми з пластиною представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові параметри взаємодії електрода-індентора з пластиною у місці контакту

| Вид симетрії | Тривалість контакту, мкс | Глибина входження індентора в пластину, мм | Глибина вм'ятини в пластині, мм | Ширина вм'ятини в пластині, мм |
|--------------|--------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|
| Плоска       | 102                      | 0,460                                      | 0,451                           | 3,06                           |
| Осьова       | 120                      | 0,573                                      | 0,547                           | 3,76                           |

З табл. 1 видно, що тривалість контакту між тілами у вісесиметричній постановці на 18 мкс (20%) більша за тривалість у плоскій, а збільшення часу взаємодії відповідно збільшує величину деформації у місці контакту. Це позначається на розмірах вм'ятини у пластині.

Збільшення глибини вм'ятини на 21% і її ширинина 23% у вісесиметричній постановці у порівнянні з плоскою призводить до відповідного збільшення зони пластичного деформування та величини ефективних пластичних деформацій  $\varepsilon_{eff}^p$  по товщині пластини (рис. 3).

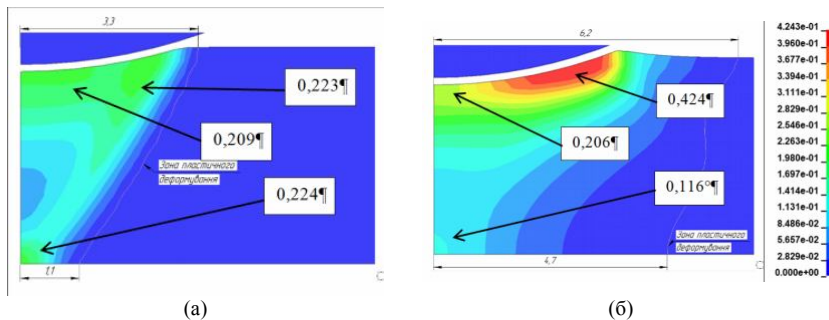


Рис. 3. Розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій  $\varepsilon_{eff}^p$  в середині пластини у плоскій (а) та вісесиметричній (б) постановках

Значення  $\varepsilon_{eff}^p$  визначалися за формулою [15]:

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

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

З рис. 3 видно, що зона пластичних деформацій  $\varepsilon_{eff}^p$  (визначалася за умови  $\varepsilon_{eff}^p \geq 0,01$ ) в обох варіантах розрахунку поширюється на всю товщину пластини (4 мм) та має форму перевернутої трапеції. В той же час, розміри цієї зони у випадку використання ударника плоскої видовженої форми не виходять за межі габаритних розмірів самого ударника, а розміри основ трапеції мають співвідношення як 3:1.

У випадку взаємодії пластини з ударником вісесиметричної форми розміри зони пластичності збільшуються майже у двічі. Верхня основа трапеції має довжину 12,4 мм, а нижня – 9,4 мм, тобто співвідношення основ трапеції зменшується до 1,3:1 і форма цієї зони поступово перетворюється на прямокутну.

Також з рис. 3 видно, що використання ударника плоскої форми формує приблизно однакові значення  $\varepsilon_{eff}^p$  як на контактній поверхні пластини, так і на тильній поверхні, які є найбільшими по всій зоні. У випадку ударної взаємодії з вісесиметричним ударником максимальні

значення  $\varepsilon_{eff}^p$  в пластині формуються в основному на контактній поверхні, які майже у 2 рази вищі ніж у випадку використання ударника плоскої форми. Для зручності порівняння значення максимальних  $\varepsilon_{eff}^p$  та значення  $\varepsilon_{eff}^p$  у точках В та С (рис. 1) розташованих по лінії удару наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Значення ефективних пластичних деформацій  $\varepsilon_{eff}^p$

| Вид симетрії | Максимальні значення $\varepsilon_{eff}^p$ | Значення $\varepsilon_{eff}^p$ на поверхнях пластини |               |
|--------------|--|--|---------------|
|              |  | Лицьова (т. В)                                       | Тильна (т. С) |
| Плоска       | 0,224                                      | 0,205  | 0,224         |
| Осьова       | 0,424                                      | 0,260  | 0,116         |

З табл. 2 видно, що зміна форми електрода-ударника плоскої форми на вісесиметричну призводить до збільшення значення  $\varepsilon_{eff}^p$  в т. В на 25% та зменшення майже вдвічі в т. С.

В той же час, дані табл. 2 та рис. 3 показують, що у випадку застосування плоского ударника максимальні значення  $\varepsilon_{eff}^p$  формуються на лінії удару (вісь симетрії  $y$ ), а у випадку застосування вісесиметричного ударника – зміщуються у радіальному напрямку (вісь  $x$ ) в область опуклості лицьової поверхні пластини.

Виходячи з відмінностей деформаційної картини представленої на рис. 3 представляє інтерес вплив кожної компоненти залишкових деформацій на підсумкове значення  $\varepsilon_{eff}^p$  (рис. 4).

Дані рис. 4 вказують на основні відмінності у формуванні розподілу компонент пластичних деформацій. Так, якщо розглядати розподіл компоненти  $\varepsilon_x^p$  по товщині пластини, то у випадку розв'язку задачі взаємодії ударника з нею у плоскій постановці спостерігається утворення зони розтягу по всій товщині від лінії удару до краю вм'ятини з формуванням максимального значення на тильній поверхні в т. С, що дорівнює  $\varepsilon_x^p = 0,195$ . В той же час, по лінії контакту тіл деформації  $\varepsilon_x^p$  зменшуються практично до нуля та мають значення, що не перевищують  $\varepsilon_x^p = 0,04$ .

У випадку розв'язку задачі взаємодії ударника з пластинною у вісесиметричній постановці ситуація протилежна. Зона деформацій розтягу  $\varepsilon_x^p$  формується на лицьовій поверхні пластини вздовж лінії контакту двох тіл з піковим значенням  $\varepsilon_x^p = 0,149$ . На тильній поверхні в т. С деформації  $\varepsilon_x^p$  зменшуються не до нуля, як у попередньому випадку,

а навіть мають від'ємні значення  $\varepsilon_x^p = -0,054$ . Тобто в цьому місці тепер формується зона стиску. Також, під тиском електрода-ударника відбувається переміщення матеріалу пластини від лінії удару в радіальному напрямку, що призводить до формування на лицевій поверхні пластини явно вираженої зони опуклості, в якій формується друга зона деформації стискуз піковим значенням  $\varepsilon_x^p = -0,215$ .

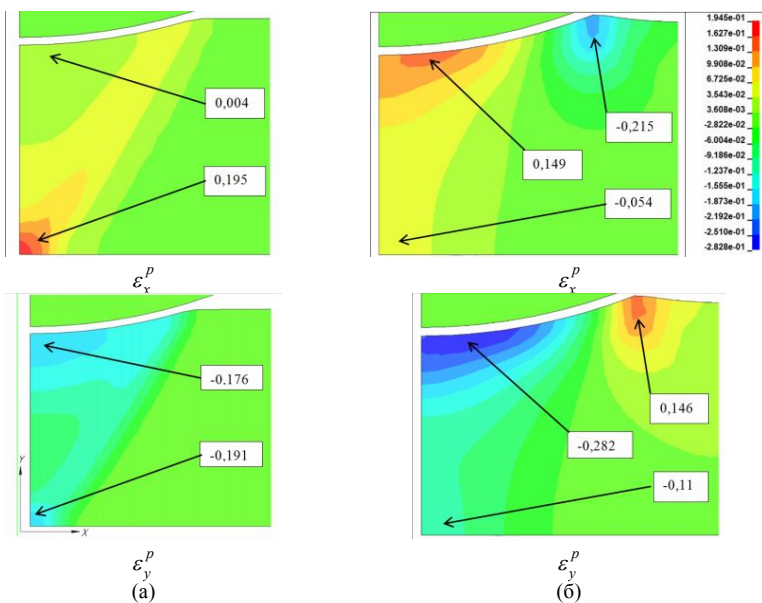


Рис. 4. Розрахунковий розподіл компонент пластичних деформацій  $\varepsilon_x^p, \varepsilon_y^p$  для плоскої (а) та вісесиметричної (б) постановок

Якщо розглядати розподіл значень іншої компоненти деформацій  $\varepsilon_y^p$  (рис. 4), то на відміну від  $\varepsilon_x^p$  і незалежно від форми ударника в т. В пластини спостерігається формування зони деформації стиску. Максимальні значення  $\varepsilon_y^p$  у цьому місці контакту становлять для плоскої та осьової симетрії  $\varepsilon_y^p = -0,176$  та  $\varepsilon_y^p = -0,282$  відповідно. Тобто застосування вісесиметричного ударника збільшує значення  $\varepsilon_y^p$  в т. В на 60%. В той же час, в т. С на відміну від  $\varepsilon_x^p$  використання ударника плоскої видовженої форми призводить до формування зони стиску практично з таким же абсолютним значенням  $\varepsilon_y^p = -0,191$ . Застосування ударника вісесиметричної форми, дозволяє не тільки зберегти в т. С

формування зони стиску, яка формується у деформацій  $\varepsilon_x^p$ , а й збільшити їх значення практично у 2 рази до  $\varepsilon_y^p = -0,11$ , що сприятливо повинно відобразитися на потенційній боротьбі із залишковими (початковими) напруженнями розтягу в пластині. Негативним фактором, що формується в пластині в результаті використання вісесиметричного ударника є те, що в зоні опуклості пластини, описаної вище, тепер замість зони стиску(величини  $\varepsilon_x^p$ ) створюється зона розтягу величини  $\varepsilon_y^p$  зі значенням  $\varepsilon_y^p = -0,146$ , а характер її розподілу практично ідентичний характеру розподілу величини  $\varepsilon_x^p$ .

Формування в середині пластині після взаємодії з ударником зон деформацій стиску свідчить про те, що в цих зонах також виникають напруження стиску. Взаємодія таких напружень з початковими напруженнями розтягу, що сформувалися в пластині ще до ударної обробки, наприклад після зварювання, відкриває можливість боротьби з останніми.

З метою оцінки ефективності такої боротьби було проведено аналіз розподілу значень компонент напруженого стану по товщині пластини, які стали причиною формування вище зазначеної деформаційної картини. Для цього було побудовано відповідні розрахункові картини розподілу компонент напружень –  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  (рис. 5).

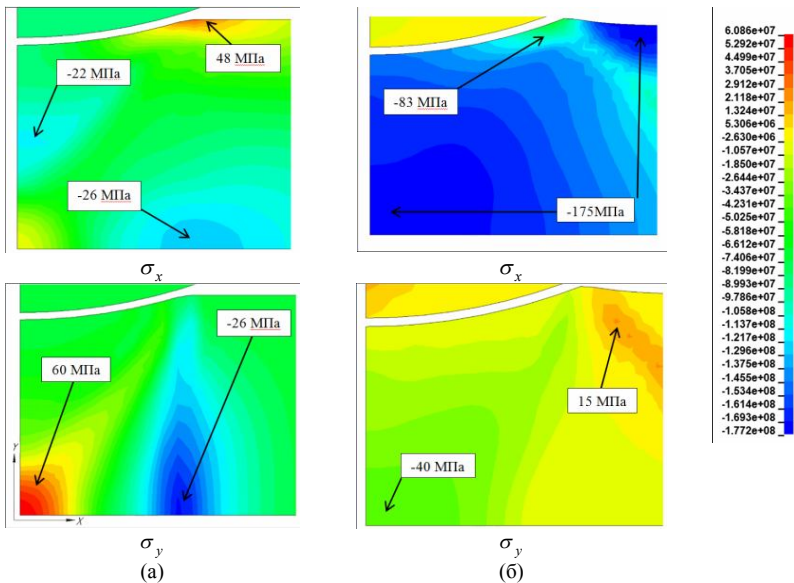


Рис. 5. Розподіл значень компонент залишкових напружень  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  (Па)

для плоскої (а) та вісесиметричної (б) постановок

З рис. 5 видно, щов залежності від форми електрода-ударника (умови симетрії, що використовувалася в математичної моделі) напружений стан, що формується в пластині після ударної взаємодії з ним, має суттєві відмінності. Якщо розглядати обробку пластини ударником плоскої видовженої форми, то розподіл в ній компоненти напружень  $\sigma_x$  (спрямованої перпендикулярно лінії удару) (рис. 5 (а)) формується у вигляді трьох характерних зон. Перші дві – бажані зони стиску по середині товщини пластини по лінії удару та у її тильної поверхні з відносно невеликими значеннями  $\sigma_x = -22$  МПа та  $\sigma_x = -26$  МПа відповідно. Третя – небажана з точки зору боротьби із початковими напруженнями розтягу – зона у лицьовій поверхні пластини з досить високими значеннями напружень розтягу до  $\sigma_x = 48$  МПа (становить майже третину значення границі текучості матеріалу АМг6).

У випадку обробки пластини ударникомвісесиметричної форми (рис. 5 (б)), то в нійформується лише одна характерна зона по всій товщині – зона напружень стиску з достатньо високим значенням  $\sigma_x$  – від -83 МПа до -175 МПа. З точки зору боротьби з компонентою початкового напруження розтягу  $\sigma_x$  обробка пластини ударником такої форми буде найбільш ефективною оскільки взаємодія з початковими напруженнями розтягу може призвести не тільки до суттєвого їх зниження практично до нульових значень, а й сформувати в пластині певну зону з від'ємними значеннями цього напруження, тобто зони стиску [16].

Проаналізувавши картину розподілу значень іншої компоненти напруженого стану  $\sigma_y$  (спрямованої вздовж лінії удару), що формується у випадку використання плоского ударника (рис. 5 (а)), то можна побачити, щояк і для компоненти  $\sigma_x$  тут формується практично прямокутна, аленебажана зона напружень розтягу з градієнтом значень в середині обох напрямках ( $x$  та  $y$ ) від т. С, яка не виходить за межі зовнішнього контуру вм'ятини пластини. По лінії удару значення  $\sigma_y$  зростає від лицьової поверхні  $\sigma_y = 0,1$  МПа (т. В) до максимальногозначення на тильній поверхні пластини:  $\sigma_y = 60$  МПа (в т. С) (табл. 3). По мірі відходу від лінії удару на тильній поверхні пластини значення  $\sigma_y$  не просто зменшуються, азмінюють свій знак і на відстані від 2,75 до 3 мм досягаються свого локального мінімуму  $\sigma_y = -26$  МПа. В той же час, на лицьовій поверхні пластини напруження зменшившись до величини 0,1 Мпа практично не змінюються. Не зважаючи на це, формування високих значень розтягу цієї компоненти напружень робить боротьбу з початковими напруженнями розтягу пластини таким ударником неефективною.

У випадку обробки пластини вісесиметричним ударником (рис. 5 (б)) – все навпаки. В цьому випадку по товщині пластини напруження  $\sigma_y$



формується виключно як напруження стиску. Їх розподіл є практично рівномірним. Максимальне значення формується по лінії удару в т.Снарівні  $\sigma_y = -40$  МПа .

Розрахунковий розподіл значень компонент залишкового напруженого стану  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  по товщині пластини по лінії удару представлено в табл. 3.

Таблиця 1

Розрахункові значення компонент залишкового напруженого стану  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  по товщині пластини (від т. В до т. С)

| Вид симетрії | Компонента напруженого стану, МПа | Координата точки по товщині пластини (по лінії удару), мм |      |      |      |         |
|--------------|-----------------------------------|---|------|------|------|---------|
|              |                                   | 0 (т.В)   | 1    | 2    | 3    | 4 (т.С) |
| Плоска       | $\sigma_x$                        | -6  | -7   | -16  | 13   | 32      |
|              | $\sigma_y$                        | 0,1   | 5    | 12   | 40   | 60      |
| Осьова       | $\sigma_x$                        | -147  | -163 | -166 | -177 | -180    |
|              | $\sigma_y$                        | -3  | -20  | -25  | -36  | -40     |

З представлених даних табл. 3 можна зробити висновок, що боротьба зпочатковою компонентою напруження розтягу ( $\sigma_y$ ) що формується в пластині, наприклад після зварювання, за допомогою ударної обробки ударником вісесиметричної форми теж є доцільною, але все ж таки вона буде менш ефективною (майже у 4 рази) у порівнянні з боротьбою з такими ж початковими значеннями компоненти напруження  $\sigma_x$ .

### Висновки

Таким чином, на основі проведеного аналізу результатів математичного моделювання процесу ударної взаємодії пластини з електродом-ударником різної форми, що рухається зі швидкістю 10 м/с, можна зробити наступні висновки:

1. Найбільш ефективно боротися з початковими напруженнями розтягу, що виникли в пластині, наприклад після зварювання, дозволяє використання мідного електрода-ударника вісесиметричної (циліндричної форми) з округлою формою голівки, але ця боротьба з компонентою напруження  $\sigma_y$  буде менш ефективною (майже у 4 рази) у порівнянні з компонентою  $\sigma_x$ ;

2. Взаємодія вісесиметричного ударника з пластиною у порівнянні з ударником плоскої форми призводить до:

- збільшення тривалості їхнього контакту на 20% і як наслідок цього збільшується розміри вм'ятини в пластині: глибини на 21%, а ширини – на 23%;

- збільшення в пластині розмірів зони пластичного деформування майже у двічі з виходом її за межі габаритних розмірів ударника з

одночасним перетворенням своєї форми з трапецеїдальної на прямокутну;

- виникнення в пластині майже у 2 рази вищих максимальних значень  $\varepsilon_{eff}^p$ , які формуються в основному на контактній поверхні;

- формування по товщині пластини зони з практично рівномірним розподілом обох компонент напруження, як  $\sigma_x$ , так і  $\sigma_y$  і формування їх виключно як напружень стиску значення яких становить від -40 МПа ( $\sigma_y$ ) до -160 МПа ( $\sigma_x$ ) що може призвести не тільки до суттєвого зниження початкових напружень розтягу в пластині практично до нульових значень, а й сформувати в ній певну зону з від'ємними значеннями цього напруження, тобто зони стиску.

3. Не зважаючи на те, що в певних зонах пластини з АМг6, що ударно обробляється мідним електродом-ударником плоскої видовженої форми, значення компоненти напруження  $\sigma_y$  можуть формуватися як напруження стиску, в цілому обробка пластини ударником такої форми призводить до формування в ній зон з напруженнями розтягу обох компонент ( $\sigma_x$  і  $\sigma_y$ ) значення яких може становити 60 МПа, тобто збільшуватися до половини значення границі текучості матеріалу АМг6. Формування таких високих значень напружень розтягу робить боротьбу з початковими напруженнями пластини, які за своєю природою теж є напруженнями розтягу, ударником такої форми неефективною.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Лащенко Г.К.* Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций / Г. К. Лащенко, Ю. В. Демченко. – Киев: Экотехнология, 2008. – 168 с.
2. A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment / [J. X. Zhang, K. Liu, K. Zhao *ma in.*]. // International Journal of Solids and Structures. – 2005. – №42. – С. 3794–3806. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.11.017
3. *Wang L S, Ye X X, Liu T, et al.* Effects of electropulsing assisted ultrasonic impact treatment on residual stress and microhardness of weld // Materials Science and Technology. – 2015. – №6. – P.1743284715Y.000. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000078
4. Controlling the Residual Stress in Metallic Solids by Pulsed Electric Current / X.ZHANG, S. XIANG, K. YI, J. GUO. // Acta Metall Sin. – 2022. – №58(5). – С. 581–598. DOI: 10.11900/0412.1961.2021.00367
5. Influence of Impulsive Electric Current on the Fine Structure of Amg6 Aluminium Alloy Subjected to Electrodynamic Treatment / [L. I. Markashova, N. A. Pashchin, E. N. Berdnikova *ma in.*]. // Material Science. – 2018. – №54(1). – С. 82–87.
6. *Stepanov G.V.* The effect of the pulse electric current treatment on residual stresses arising in grinding / G. V. Stepanov, A. I. Babutskii, I. A. Mameev. // Strength of Materials. – 2009. – №41. – С. 623. DOI: 10.1007/s11223-009-9171-y
7. *Pan Long.* Influence of electropulsing treatment on residual stresses and tensile strength of as-quenched medium carbon steel / Pan Long. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – №1187(3). DOI 10.1088/1742-6596/1187/3/032054
8. Influence of Electropulsing Treatments on Mechanical Properties of UNS S32750 Duplex Stainless Steel / [C. Gennari, L. Pezzato, G. Tarabotti *ma in.*]. // Materials (Basel). – 2020. – №13. – С. 1613. doi: 10.3390/ma13071613

9. Effect of electropulsing on the fatigue resistance of aluminium alloy 2014-T6 / [A. Babutskyi, M. Mohin, A. Chrysanthou *ma in.*]. // Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing. – 2020. – №772. – P. 138679. doi: 10.1016/j.msea.2019.138679
10. Методика определения остаточных напряжений в сварочных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л. М.Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук. // Автоматическая сварка. – 2006. – №1. – С. 10–13.
11. Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry / L. M.Lobanov, V. A. Pivtorak, V. V. Savitsky, G. I. Tkachuk. // The Paton Welding Journal. – 2006. – №1. – С. 24–29.
12. Maksymyuk Yu.V., Pyskunov S.O., Shkril' A.A., Maksymyuk O.V. Basic relations for physically and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies. Strength Materials and Theory of Structures [in Ukrainian], 2020, Issue 104, P. 255–264.
13. Pyskunov S., Trubachev S., Baranyuk O. Investigation of a stress-strained state of a screw-shape tubes of heat exchangers. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles, 2020, Issue 105, P. 13–23.
14. Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamic Treatment / L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. L. Mykhodui, Y. M. Sydorenko. // Strength of Materials. – 2017. – №43(3). – С. 369–380..
15. Sidorenko Y. M. On the Assessment of Stress-strain State of the Load-Bearing Structural Elements in the Tubular Explosion Chamber / Y. M. Sidorenko, P. S. Shlenskii. // Strength of Materials. – 2013. – №45(2). – С. 210–220.
16. Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment / L. M.Lobanov, N. A. Pashchin, O. L. Mikhodui, Y. M. Sidorenko. // Strength of Materials. – 2018. – №50. – С. 246–253.

## REFERENCES

1. Laschenko G.K., Demchenko U.V. Energosberigauschie tehnologii poslesvarochnoy obrabotki metallokonstruktsy (Energy-saving technologies for post-weld processing of metal structures). Kyiv: Ecotehnologiya, 2008, 168 pp.
2. Zhang J. X., Liu K., Zhao K. and etc. A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment. International Journal of Solids and Structures, 2005, No. 42., P. 3794–3806. DOI: 10.1016/j.ijsostr.2004.11.017
3. Wang L S, Ye X X, Liu T, et al. Effects of electropulsing assisted ultrasonic impact treatment on residual stress and microhardness of weld. Materials Science and Technology, 2015, No. 6, P.1743284715Y.000. DOI: 10.1179/1743284715Y.00000000078
4. ZHANG X., XIANG S., YIK., GUO J. Controlling the Residual Stress in Metallic Solids by Pulsed Electric Current. Acta Metall Sin, 2022, Vol.58, No. 5, P. 581–598. DOI: 10.11900/0412.1961.2021.00367
5. Markashova L. I., Pashchin N. A., Berdnikova E. N. and etc. Influence of Impulsive Electric Current on the Fine Structure of Amg6 Aluminium Alloy Subjected to Electrodynamic Treatment. Material Science, 2018, Vol. 54, No. 1, P. 82–87.
6. Stepanov G. V., Babutskii A. I., Mameev I. A. The effect of the pulse electric current treatment on residual stresses arising in grinding. Strength of Materials, 2009, No. 41, P. 623. DOI: 10.1007/s11223-009-9171-y
7. Pan Long. Influence of electropulsing treatment on residual stresses and tensile strength of as-quenched medium carbon steel. Journal of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1187, No.3. DOI 10.1088/1742-6596/1187/3/032054
8. Gennari C., Pezzato L., Tarabotti G. and etc. Influence of Electropulsing Treatments on Mechanical Properties of UNS S32750 Duplex Stainless Steel. Materials (Basel), 2020, No. 13, P. 1613. DOI: 10.3390/ma13071613
9. Babutskyi A., Mohin M., Chrysanthou A. and etc. Effect of electropulsing on the fatigue resistance of aluminium alloy 2014-T6. Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing, 2020, No. 772. – P. 138679. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138679

10. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Savickiy V.V., Tkachuk G.S. Metodika opredelniya ostatochnykh napryazheniyv svarochnykh soedineniyah elementah konstrukciya s ispol'zovaniem elektronnoy spekl-interferometrii (Method for Determination of Residual Stresses in Welding Joints and Structural Elements Using Electronic Speckle Interferometry) Avtomaticheskay svarka (Automatic welding), 2006, No. 1, P. 10–13.
11. Lobanov L. M., Pivtorak V. A., Savitsky V. V., Tkachuk G. I. Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. The Paton Welding Journal, 2006, No. 1, P. 24–29.
12. MaksimyyukYu. V., PyskunovS. O., Shkril'A. A., MaksimyyukO. V. Basic relations for physically and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies. Strength Materials and Theory of Structures [in Ukrainian], 2020, Issue 104, P. 255–264.
13. Pyskunov S., Trubachev S., Baranyuk O. Investigation of a stress-strained state of a screw-shape tubes of heat exchangers. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles, 2020, Issue 105, P. 13-23.
14. Lobanov L. M., Pashchyn M. O., Mykhodui O. L., Sydorenko Y. M. Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamic Treatment. Strength of Materials, 2017, Vol. 43, No. 3, P. 369–380.
15. Sidorenko Y. M., ShlenskiiP. S. On the Assessment of Stress-strain State of the Load-Bearing Structural Elements in the Tubular Explosion Chamber. Strength of Materials, 2013, Vol. 45, No. 2, P. 210–220.
16. LobanovL. M., Pashchin N. A., Mikhodui O. L., Sidorenko Y. M. Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment. Strength of Materials, 2018, No. 50, P. 246–253.

*Стаття надійшла 08.05.2023*

*Сидоренко Ю.М., Устименко П.Р., Пауцин М.О., Міходуй О.Л.*

### **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПЛАСТИНИ ПІСЛЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ З ЕЛЕКТРОДАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ**

Методом чисельного моделювання проведено оцінку впливу форми електрода-ударника (циліндричної та у формі паралелепіпедаз округленою формою поверхні контакту) на напружено-деформований стан пластини виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг6 після їх ударної взаємодії на швидкості 10м/с. Описано особливості створення та використання розроблених математичних моделей. Визначено розподіл по товщині пластини значень основних параметрів та компонент напружено-деформованого стану, а також розміри та форму зони пластичних деформацій, місце розташування зон з напруженнями стиску та розтягу, глибини та ширини вм'ятини в пластині. Зокрема встановлено, що взаємодія віссиметричного ударника з пластиною у порівнянні з взаємодією з ударником плоскої форми призводить до збільшення тривалості їхнього контакту на 20% і, як наслідок цього, збільшується розміри вм'ятини в пластині: глибини на 21%, а ширини – на 23%. Також встановлено, що така взаємодія призводить до збільшення в пластині розмірів зони пластичного деформування майже у двічі з виходом її за межі габаритних розмірів ударника з одночасним перетворенням своєї форми з трапецеїдальної на прямокутну; виникненню в пластині майже у 2 рази вищих максимальних значень ефективних пластичних деформацій, які формуються в основному на контактній поверхні. В результаті моделювання було показано, що динамічна обробка пластини ударником циліндричної (віссиметричної) форми з округлою голівкою у порівнянні з плоскою видовженою формою призводить до формування в ній практично рівномірного розподілу обох компонент напруженого стану (осьової та радіальної) як напружень стиску, які дозволяють боротися із залишковими напруженнями в матеріалі, наприклад, такими що виникають після зварювання, і ця боротьба з осьовою компонентою напруження буде менш ефективною (майже у 4 рази) у порівнянні з боротьбою з радіальною компонентою.

**Ключові слова:** електродинамічна обробка, ударна взаємодія, математичне моделювання, залишкові напруження, залишкові напруження, пластичні деформації, електрод-індентор, пружно-пластичне середовище, напружено-деформований стан, ANSYS/LS-DYNA.

Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L.

### STRESS-STRAIN STATE OF THE PLATE AFTER IMPACT INTERACTION WITH AN ELECTRODE OF DIFFERENT SHAPES

The influence of the shape of the electrode-indenter (cylindrical and parallelepiped with a rounded shape of the contact surface) on the stress-strain state of the plate made of aluminum alloy AMg6 after their impact interaction at a speed of 10m/s was evaluated by the method of numerical modeling. Features of creation and use of developed mathematical models are described. The distribution along the thickness of the plate of the values of the main parameters and components of the stress-strain state, as well as the dimensions and shape of the zone of plastic deformations, the location of zones with compressive and tensile stresses, the depth and width of the dent in the plate, were determined. In particular, it was established that the interaction of an axisymmetric striker with a plate compared to the interaction with a flat striker leads to an increase in the duration of their contact by 20% and, as a result, the dimensions of the dent in the plate increase: the depth by 21%, and the width by 23 %. It was also established that such an interaction leads to an increase in the size of the plastic deformation zone in the plate by almost two times, with its exit beyond the overall dimensions of the striker with a simultaneous transformation of its shape from trapezoidal to rectangular; occurrence in the plate of almost 2 times higher maximum values of effective plastic deformations, which are formed mainly on the contact surface. As a result of the simulation, it was shown that the dynamic processing of a plate with a cylindrical (axisymmetric) indenter with a rounded head, in comparison with a flat elongated shape, leads to the formation of an almost uniform distribution of both components of the stress state (axial and radial) as compressive stresses, which make it possible to combat residual stresses in the material, such as those arising after welding, and this fight against the axial stress component will be less effective (almost 4 times) compared to the fight against the radial component.

**Key words:** electrodynamic treatment, shock interaction, mathematical modeling, residual stresses, welding stresses, plastic deformations, electrode-indenter, elastic-plastic medium, stress-strain state, ANSYS/LS-DYNA.

УДК 621.791.052:539.43

Сидоренко Ю.М., Устименко П.Р., Пащын М.О., Міходуй О.Л. **Напружено-деформований стан пластини після ударної взаємодії з електродами різної форми** // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2023. – Вип. 110. – С. 150 – 163.

Методом чисельного моделювання проведено оцінку впливу форми електрода-ударника на напружено-деформований стан пластини виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг6 після їх ударної взаємодії на швидкості 10м/с. Описано особливості створення відповідних математичних моделей. Встановлено розміри зони пластичних деформацій. Визначено розподіл по товщині пластини значень компонент напружено-деформованого стану, а також глибини та ширини вм'ятини в пластині.

Табл. 3. Іл. 5. Бібліогр. 16 назв.

UDC621.791.052:539.43

Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L. **Stress-strain state of the plate after impact interaction with an electrode of different shapes**// Strength of materials and theory of structures. – 2023. – Issue 110. – P. 150 – 163. – Ukr.

The influence of the shape of the electrode-indenter on the stress-strain state of the plate made of aluminum alloy AMg6 after their impact interaction at a speed of 10 m/s was evaluated using numerical modeling. Features of creating appropriate mathematical models are described. The dimensions of the zone of plastic deformations have been established. The distribution of the values of the components of the stress-strain state, as well as the depth and width of the dent in the plate, along the thickness of the plate was determined.

Tabl. 3. Fig. 5. Ref. 16.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів СИДОРЕНКО Юрій Михайлович.

**Адреса робоча:** 03056 Україна, м. Київ, проспект Перемоги 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра Динаміки і міцності машин та опору матеріалів, СИДОРЕНКУ Юрію Михайловичу.

**Роб. тел.:** +38(044) 204-82-74

**Мобільний тел.:** +38(050) 363-52-80

**E-mail:** yura\_michael@ukr.net

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-8780-9459>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** аспірант кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів УСТИМЕНКО Павло Романович.

**Адреса робоча:** 03056 Україна, м. Київ, проспект Перемоги 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра Динаміки і міцності машин та опору матеріалів, УСТИМЕНКО Павло Романович

**Мобільний тел.:** +38(066) 522-48-90

**E-mail:** pavloustymenko96@gmail.com, upasha1996@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-5318-2675>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник, ПАЦІН Микола Олександрович.

**Адреса робоча:** вул. Казимира Малевича, 11 (корпус б), м. Київ, 03150, Україна, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

**Роб. тел.:** +38044 205-25-38

**Мобільний тел.:** +38(067) 500-33-54

**E-mail:** svarka2000@ukr.net

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник МІХОДУЙ Ольга Леонідівна.

**Адреса робоча:** вул. Казимира Малевича, 11 (корпус б), м. Київ, 03150, Україна, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

**Роб. тел.:** +38 044 205-20-35

**Мобільний тел.:** +38(096)445-26-05

**E-mail:** omikiev@ukr.net; olga.mikhodui@gmail.com

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>