

## ВПЛИВ ФОРМИ ЕЛЕКТРОДА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СПЛАВУ АМГ6 ПРИ ЙОГО ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, М.О. Пашин<sup>1</sup>, О.Л. Миходуй<sup>1</sup>, А.А. Гринюк<sup>1</sup>, П.В. Гончаров<sup>1</sup>, А.О. Альошин<sup>1</sup>,  
Т.Г. Соломійчук<sup>1</sup>, Ю.М. Сидоренко<sup>2</sup>, П.Р. Устименко<sup>2</sup>, Yuhui Yao<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: mail@kpi.ua

<sup>3</sup>Shenzhen Hanzhizi Science and Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Rd., Longgang District, Shenzhen, Guangdong, PRC. E-mail: 514929948@qq.com

Обґрунтовано переваги застосування електродинамічної обробки (ЕДО) металу в процесі зварювання у порівнянні з ЕДО при кімнатній температурі. Розглянуто переваги і недоліки застосування в процесі зварювання електрода для ЕДО у формі циліндричного стрижня та ролика. Методом математичного моделювання у плоскій та вісесиметричній постановках проведено оцінку впливу форми електрода-ударника на напружено-деформований стан зварної пластини із алюмінієвого сплаву АМГ6 після застосування динамічної складової ЕДО. Описано особливості та відмінності створення та використання розроблених математичних моделей. Визначено розподіл значень по товщині пластини напружено-деформованого стану, зокрема, величини зони пластичних деформацій та напружень при взаємодії пластини з електродом-ударником, що рухається зі швидкістю 5 м/с. Встановлено, що використання ударника циліндричної форми з напівсферичним робочим торцем (вісесиметричної форми) у порівнянні з роликом (плоскої видовженої форми) є більш ефективним з позицій оптимізації залишкового напруженого стану в пластині. Використання циліндричного ударника призводить до формування в пластині напружень стиску зі значеннями до  $-120$  МПа. Це має позитивно впливати на розподіл залишкових зварних напружень при дії динамічної складової ЕДО. Бібліогр. 4, табл. 3, рис. 7.

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

**Вступ.** Проблема регулювання залишкових зварювальних напружень та деформацій в конструкціях із алюмінієвих сплавів є актуальною, що зумовлено їх застосуванням у різних галузях промисловості і транспорту, де напружено-деформовані стани суттєво впливають на службові характеристики виробів.

Перспективним методом регулювання напружено-деформованих станів конструкцій є електродинамічна обробка (ЕДО) зварних з'єднань, яка базується на ініціюванні у металі виробів електродинамічних сил, що виникають при проходженні в останніх імпульсу електричного струму (ІЕС) [1, 2]. Використання ЕДО дозволяє змінювати напружено-деформований стан (НДС) зварних з'єднань за рахунок точкових ударів електрода-індентора в зоні зварного з'єднання з одночасним пропусканням ІЕС. При ЕДО метал зварного з'єднання піддається електродинамічному впливу, що ініціює електропластичний ефект в зоні обробки і як наслідок – релаксацію залишкових зварювальних напружень [3].

Виконання ЕДО протяжних зварних з'єднань, в тому числі і в процесі зварювання, потребує розширення можливостей методу за рахунок опти-

мізації умов контактної взаємодії електрода для ЕДО з поверхнею металу, що підлягає обробці. Реалізація методу ЕДО в процесі зварювання забезпечує зменшення часу виготовлення зварної конструкції внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення зварювання і обробки. Це також створює можливості для автоматизації даної технології.

Апаратне забезпечення методу зводиться до організації синхронного переміщення зварювального пальника та електродного пристрою для ЕДО – системи «Пальник + Електрод ЕДО». Тобто система «Пальник + Електрод ЕДО» безупинно рухається вздовж зварного шва. Це вимагає конструктивно-технологічних рішень, які направлені на якісне забезпечення дискретної динамічної взаємодії контактної поверхні електрода ЕДО, який безупинно рухається вздовж зварного шва. При тому взаємодія відбувається в момент проходження ІЕС по електроду в метал зварного з'єднання.

Розглядали два варіанти взаємодії. При реалізації першого варіанту здійснювали динамічний контакт напівсферичного торця електрода циліндричної форми з плоскою поверхнею зварного

Лобанов Л.М. – Scopus Author ID 6603876807, Пашин М.О. – Scopus Author ID 7801572218,

Миходуй О.Л. – Scopus Author ID 36189953300, Гринюк А.А. – Scopus Author ID 57306038400,

Гончаров П.В. – Scopus Author ID 57194696938, Альошин А.О. – <http://orcid.org/000-001-9696-6800>,

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>, Сидоренко Ю.М. – Scopus Author ID 55676011800,

Устименко П.Р. – Scopus Author ID 57225143676, Yuhui Yao – <https://orcid.org/0000-0001-7196-1317>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Миходуй, А.А. Гринюк, П.В. Гончаров, А.О. Альошин, Т.Г. Соломійчук, Ю.М. Сидоренко, П.Р. Устименко, Yuhui Yao, 2022

з'єднання, що підлягає ЕДО [1–3]. При другому реалізовували динамічний контакт поверхні циліндричного ролика, який котиться по поверхні зварного шва, яка піддається ЕДО.

На рис. 1 представлено схему контакту циліндричного електрода 4 з металом зварного шва 5. Контактна взаємодія напівсферичного торця електрода з плоскою поверхнею металу, що обробляється, здійснювалася з використанням індуктора лінійного вертикального переміщення 2. Індуктор було розташовано вздовж загальної вертикальної вісі з електродною системою 3 кріплення електрода 4. До недоліків схеми рис.1 слід віднести необхідність дискретного позиціонування електрода відносно поздовжньої центральної вісі шва та протидії заклинювання електрода в процесі безперервного поздовжнього переміщення системи «Пальник + Електрод ЕДО» в процесі зварювання.

На рис. 2 представлено конструктивну схему контакту електрода 4 у вигляді ролика з металом звар-

ного з'єднання 5, яке встановлено на збиральній плиті 6. Рोलик має форму циліндру, що котиться по поверхні зварного з'єднання. Контактну взаємодію поверхні ролика здійснювали вздовж утворюючої лінії циліндра з використанням індуктора лінійного переміщення 1. Індуктор було розташовано сумісно з системою фіксації 3 ролика, яку було закріплено в корпусі 2. Дана конструкція є більш простою у реалізації у порівнянні з представленою на рис. 1, де має місце серія дискретних динамічних контактів електрода з поверхнею шва в процесі виконання зварного шва. У конструкції електрода у вигляді ролика дискретність виключено за рахунок безперервного кочення останнього вздовж зварного шва, яке супроводжується періодичними пропусканнями ІЕС у зварний шов (через ролик).

При порівнянні схем рис. 1 і 2 слід зазначити, що остання є більш простою для реалізації внаслідок виключення дискретності контактної взаємодії за рахунок кочення електрода по поверхні шва. До теперішнього часу не проводили досліджень впливу форми електрода на НДС металу в зоні контактної взаємодії після ЕДО. Тому актуальною є оцінка залишкового НДС металу, що є наслідком його динамічної контактної взаємодії з електродом у формі циліндру або ролик.

Деякі питання експериментального визначення напружень після зварювання розглядалися в роботі [1], але такі методи дозволяють встановлювати величини напружень зварювання лише на поверхні тіла та за рахунок його часткового руйнування. З метою більш повної оцінки НДС таких конструкцій застосовують сучасні засоби математичного моделювання. У роботі [2] описані результати комп'ютерного моделювання процесу ударної взаємодії електрода-індентора зі зварною пластиною (розглядалася лише динамічна складова ЕДО), яке проводилося на основі співвідношень Прандтля-Рейса [3], що описують рух середовища в плоскій двовимірній лагранжевій постановці з використанням програми «ANSYS/LS-DYNA». Слід зазначити, що

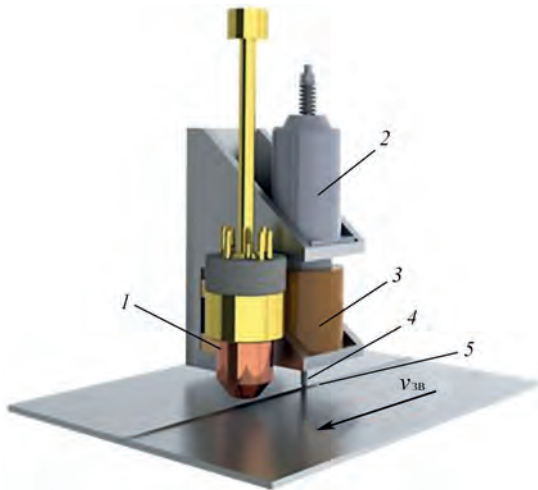


Рис. 1. Варіант конструктивної схеми контакту електрода ЕДО у формі циліндру з металом зварного шва: 1 – пальник для зварювання; 2 – індуктор лінійного вертикального переміщення; 3 – електродна система; 4 – електрод ЕДО; 5 – зварний шов;  $v_{zw}$  – напрямок зварювання

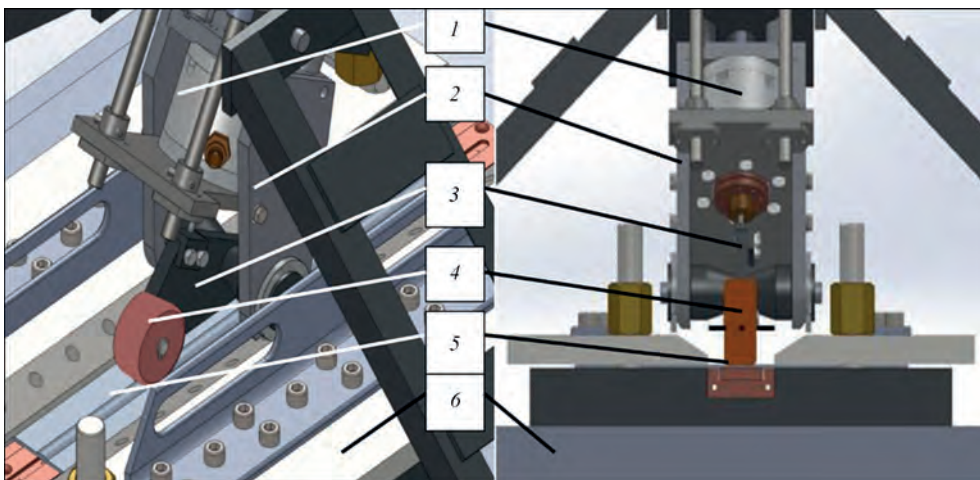


Рис. 2. Варіант конструктивної схеми контакту електрода ЕДО у формі ролика з металом зварного шва: 1 – індуктор лінійного переміщення; 2 – корпус кріплення ролика; 3 – система фіксації ролика; 4 – електрод ЕДО; 5 – зварне з'єднання; 6 – збиральна плита

застосування такої постановки відповідає моделюванню процесу ЕДО пластини плоским електродом-індентором нескінченної довжини.

В той же час ЕДО проводиться електродами-інденторами вісесиметричної форми, наприклад, у формі циліндра. Тоді моделювання процесу ЕДО таким індентором слід проводити із застосуванням іншої – вісесиметричної постановки.

Таким чином, метою роботи є математична оцінка впливу форми електрода-ударника на напружено-деформований стан пластини після застосування динамічної складової електродинамічної обробки.

**Розрахункова (математична) модель задачі.** Розрахункова схема процесу обробки зварної пластини динамічною складовою ЕДО представлена на рис. 3.

На рис. 3 видно, що в процесі ударної взаємодії приймають участь два тіла. Перше – пластина (2) завтовшки 4 мм та шириною 50 мм, яка виготовлена зі сплаву АМг6 та розташована на абсолютно жорсткій поверхні (робочому столі 3). Друге тіло – мідний електрод-ударник (1), який рухається в напрямку пластини зі швидкістю  $v_0 = 5$  м/с.

Форма поперечного перерізу ударника умовно складається з двох елементарних 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 рис. 3 представлено лише їх праві, відносно осі  $Y$  (лінії удару), половини.

Таким чином, проведення математичних розрахунків із застосуванням плоскої постановки буде відповідати моделюванню процесу ЕДО пластини із застосуванням ролика. Рोलик моделювали у вигляді плоского електрода з поперечним перерізом, розташованим поперек умовного зварного шва (рис. 4, а). Це в загальному випадку відповідає конструктивній схемі, що наведена на рис. 2.

В той же час проведення розрахунків із застосуванням вісесиметричної двовимірної постановки буде відповідати моделюванню процесу ЕДО пластини циліндричним електродом з напівсфе-

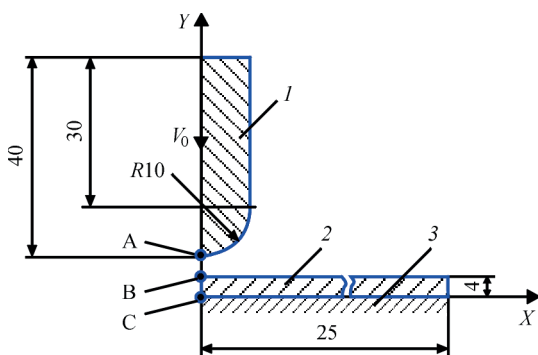


Рис. 3. Розрахункова схема процесу обробки пластини динамічною складовою ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – пластина, що оброблюється; 3 – абсолютно жорсткий стіл. Точки по лінії удару: А – на поверхні індентора; В – на лицевій поверхні пластини; С – на тильній поверхні пластини

ричним торцем. Електрод розташовано вздовж лінії удару (по осі  $Y$  на рис. 3), як показано на рис. 4, б. Це в загальному випадку відповідає конструктивній схемі, що наведена на рис. 1.

Основною відмінністю між двома зазначеними вище математичними моделями є те, що у плоскій постановці контакт електрода-індентора із пластинною відбувається по лінії, а у вісесиметричній – у точці.

Скінченно-елементна модель задачі в обох постановках мала однакову кількість скінченних елементів та вузлів, а саме: кількість скінченних елементів (тип SOLID 162) – 128203 шт.; кількість вузлів – 131042 шт. Поведінка матеріалів пластини та електрода-ударника описувалися за допомогою реологічної пружнопластичної моделі матеріалів, у якій значення динамічної межі плинності приймається рівним межі плинності  $\sigma_T$ . Значення параметрів даних моделей були наступними:

сплав АМг6 (пластина): густина  $\rho = 2640$  кг/м<sup>3</sup>; модуль пружності першого роду  $E = 71$  ГПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,34$ ; межа плинності  $\sigma_T = 150$  МПа;

мідь марки М1 (електрод-ударник): густина  $\rho = 8940$  кг/м<sup>3</sup>; модуль пружності першого роду  $E = 128$  ГПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,35$ ; межа плинності  $\sigma_T = 300$  МПа.

Таким чином, для оцінки впливу форми електрода-ударника (плоский або вісесиметричний постановках) на ефективність динамічної складової ЕДО було проведено математичне моделювання процесу його взаємодії з металом пластини на швидкості контакту  $V_k = 5$  м/с. Значення  $V_k$  задавали зарядною напругою конденсаторів  $U_3 = 500$  В при ємності  $C = 6600$  мкФ. Це забезпечувало енергію однократної електродинамічної дії  $E_{\text{ЕДО}} = 825$  Дж.

Моделювання проводили з використанням програми «ANSYS/LS-DYNA» на основі співвідношень Прандтля-Рейса, які описують рух пружнопластичного середовища.

**Результати моделювання та їх порівняння.** Проведені чисельні розрахунки показали основні відмінності в процесі взаємодії електрода-ін-

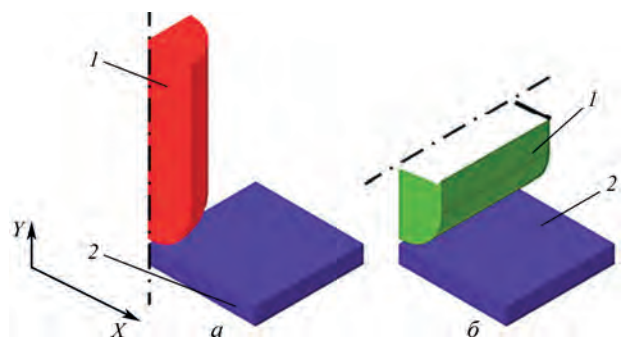


Рис. 4. Зовнішній вигляд електрода-ударника різної форми, де  $X$  та  $Y$  – напрямки дії компонентів напружено-деформованого стану (де 1 – електрод; 2 – пластина): а – циліндр з напівсферичним робочим торцем; б – ролик

Таблиця 1. Розрахункові параметри взаємодії електрода з пластиною у місці контакту

Вид симетрії	Тривалість контакту, мкс	Глибина входження індентора в пластину, мм	Глибина зони контакту в пластині, мм	Ширина зони контакту в пластині, мм
Плоска	86	0,176	0,168	1,89
Осьова	128	0,285	0,266	2,56

дентора різної форми з пластиною, що зведені до табл. 1.

Із даних табл. 1 видно, що тривалість контакту між тілами у вісесиметричній постановці на 42 мкс (50 %) більша за тривалість у плоскій. Це пояснюється особливостями в процесах обміну енергією між електродом-індентором та пластиною. Відповідно зі збільшенням часу взаємодії збільшуються і деформації у зоні контакту, що позначається на її розмірах у пластині. Глибина входження індентора визначалася як максимальне переміщення т. А (див. рис. 3) в середину пластини від її поверхні, а відповідно глибина зони контакту визначалася як переміщення т. В (див. рис. 3) від початкового положення до положення, що відповідає завершенню контакту.

Збільшення глибини зони контакту на 55 % і її ширини на 35 % у вісесиметричній постановці у порівнянні з плоскою призводить до відповідного збільшення зони пластичного деформування та величини ефективних пластичних деформацій  $\epsilon_{eff}^p$  по товщині пластини (рис. 5).

Розподіл  $\epsilon_{eff}^p$  у плоскій постановці поширюється на половину товщини пластини (2 мм) та має форму сегмента кола радіусом 2 мм (рис. 5, а). У вісесиметричній постановці зона пластичного деформування доходить до тильної поверхні пластини та має форму близьку до трапеції, у якій верхня основа має довжину 8 мм, а нижня – 4 мм (рис. 5, б). Аналізуючи дані рис. 5 слід зазначити, що точкова контактна взаємодія напівсферичного торця (вісесиметрична постановка) сприяє більшій інтенсивності пластичного деформування у

порівнянні з лінійною (плоска постановка). При порівнянні даних рис. 5, а, б можна бачити, що розповсюдження зони пластичного деформування по перерізу пластини при вісесиметричній постановці є більшим, ніж при плоскій.

Також з рис. 5, видно, що у плоскій постановці максимальні значення  $\epsilon_{eff}^p$  формуються на поверхні контакту пластини з електродом-індентором на ділянці перерізу біля площини симетрії. У випадку вісесиметричної задачі навпаки. Як видно із рис. 5, б, пікові значення  $\epsilon_{eff}^p$  зміщуються на 1,8...2,0 мм від лінії удару (вісі симетрії).

Для порівняння значення максимальних  $\epsilon_{eff}^p$  та значення  $\epsilon_{eff}^p$  у точках В та С (рис. 3), що розташовані вздовж лінії удару, наведені у табл. 2. З даних табл. 2 видно, що використання електрода-ударника вісесиметричної форми у порівнянні з плоским призводить до збільшення максимальних  $\epsilon_{eff}^p$  більш ніж у 1,4 рази. При порівнянні значень  $\epsilon_{eff}^p$  у т. В та т. С (див. табл. 2) видно, що зміна форми електрода-ударника практично не впливає на  $\epsilon_{eff}^p$  в т. В (різниця значень не перевищує 10 %), але  $\epsilon_{eff}^p$  в т. С відрізняються на порядок. В той же час значення  $\epsilon_{eff}^p$  в т. С для обох видів симетрії (варіантів форми індентора) майже у 4 рази менші ніж у т. В, що пояснюється поступовим розсіюванням кінетичної енергії ударника по товщині пластини.

Виходячи з відмінностей деформаційної картини, представленій на рис. 5, актуальним є оцінювання впливу кожної компоненти залишкових деформацій на підсумкове значення  $\epsilon_{eff}^p$  (рис. 6). Дані рис.6, а вказують на майже рівномірний роз-

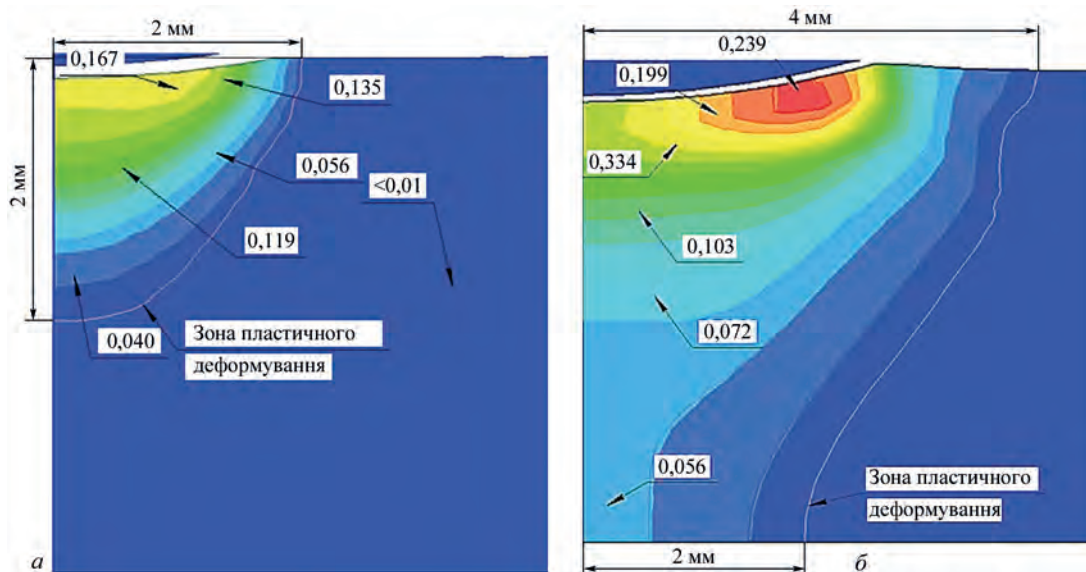


Рис. 5. Розрахунковий розподіл ефективних пластичних деформацій  $\epsilon_{eff}^p$  в середині пластини у плоскій (а) та вісесиметричній (б) постановках.

Таблиця 2. Значення ефективних пластичних деформацій  $\epsilon_{eff}^p$  при різних видах симетрії

Вид симетрії	Максимальні значення $\epsilon_{eff}^p$	Значення $\epsilon_{eff}^p$ на поверхнях пластини	
		Лицьова (т. В, рис. 3)	Тильна (т. С, рис. 3)
Плоска	0,171	0,165	0,004
Осьова	0,239	0,151	0,038

поділ  $\epsilon_x^p$  по товщині пластини у плоскій постановці, де значення цієї компоненти змінюються в діапазоні від  $-0,01$  до  $0,01$ . У випадку вісесиметричної задачі в місці контакту створюється зона деформацій розтягу з піковими значеннями близько  $\epsilon_x^p = 0,08$ . При цьому під тиском електрода-ударника відбувається перетікання матеріалу з центральної зони розтягу в радіальному напрямку від лінії удару. Це призводить до формування на лицькій поверхні пластини досить локалізованої зони деформацій стиску  $\epsilon_{eff}^p = -0,1$ , що в цілому не впливає на загальний деформований стан дослідного перерізу пластини. При порівнянні деформаційних картин рис. 6 можна бачити, що вісесиметрична постановка (рис. 4, б) забезпечує

більш оптимальний розподіл пластичних деформацій (у порівнянні із плоскою – рис. 4, а), де  $\epsilon_{eff}^p$  розтягування мають більші значення. Наслідком цього має бути формування більших за значеннями залишкових напружень стиску.

Якщо розглядати розподіл значень іншої компоненти деформацій  $\epsilon_y^p$ , то незалежно від форми ударника в т. В (рис. 3) спостерігається формування майже однакових зон деформацій стиску. В цьому місці максимальні значення для задачі у плоскій постановці  $\epsilon_y^p = -0,14$  (рис. 6, а), а у вісесиметричній  $\epsilon_y^p = -0,16$  (рис. 6, б).

Як відомо, деформований стан є наслідком дії в конструкції відповідних напружень. З метою аналізу розподілу значень компонент напруженого стану по товщині пластини було побудовано відповідні розрахункові картини розподілу  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  (рис. 7).

З рис. 7 видно, що в залежності від форми електрода-ударника (умов симетрії математичної моделі) залишковий напружений стан, що формується в пластині, має суттєві відмінності. Для задачі у плоскій постановці розподіл залишкових напружень  $\sigma_x$  (спрямовані перпендикулярно

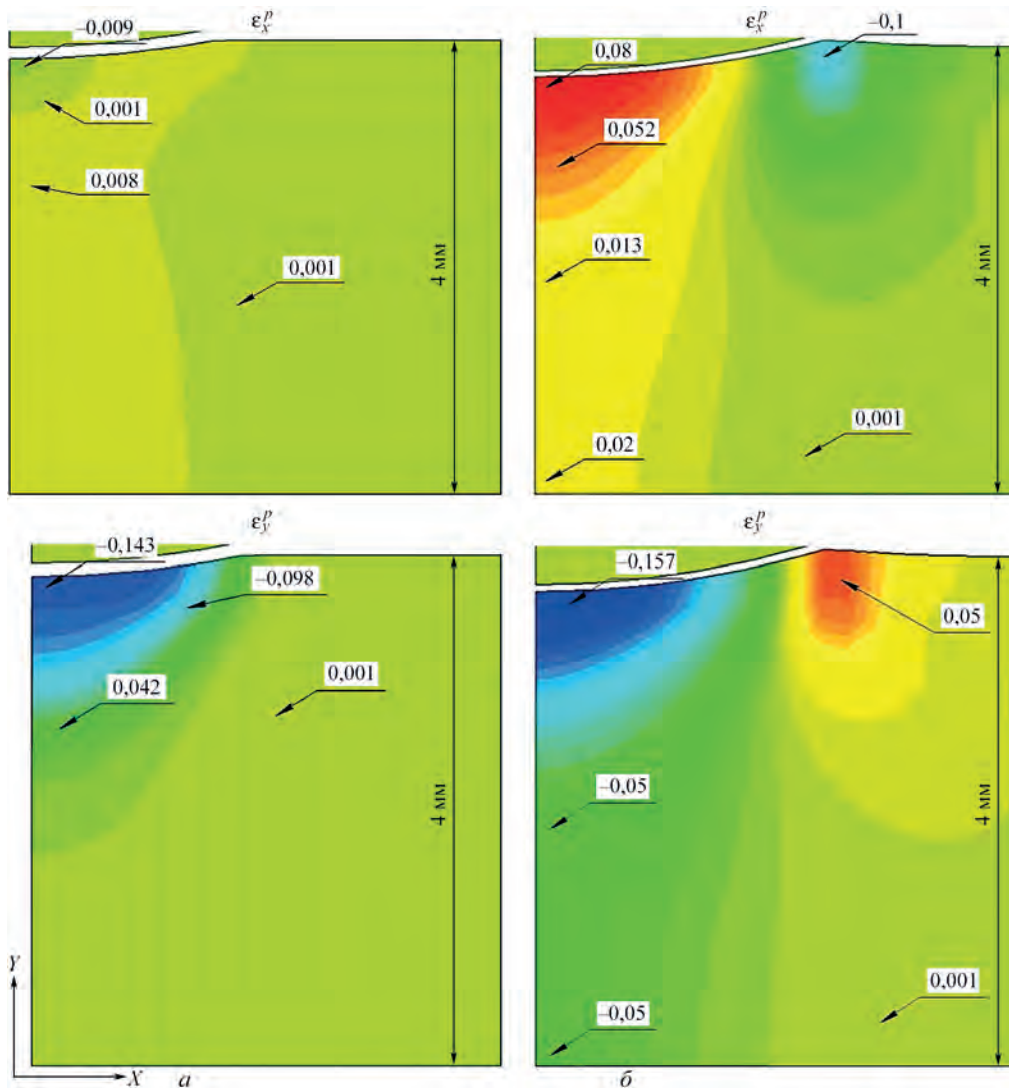


Рис. 6. Розрахунковий розподіл компонент пластичних деформацій  $\epsilon_x^p$ ,  $\epsilon_y^p$  для плоскої (а) та вісесиметричної (б) постановок

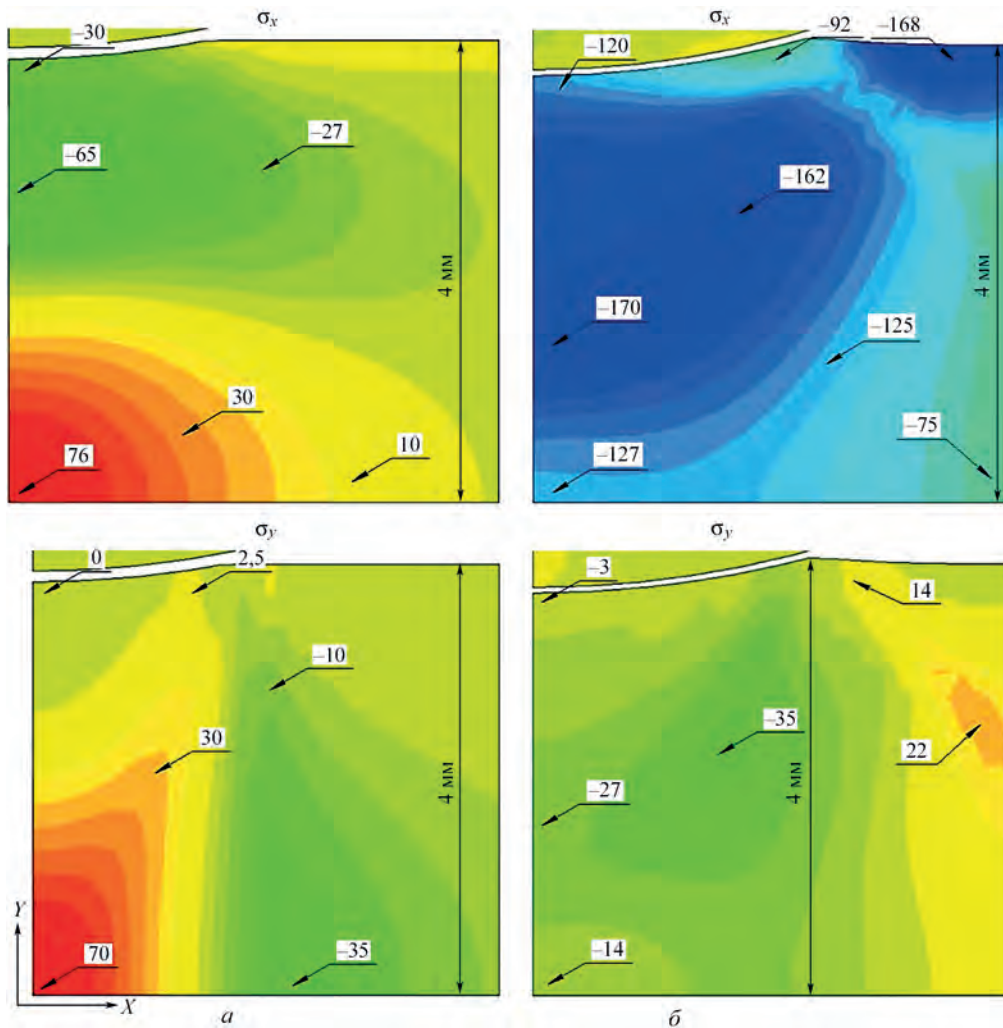


Рис. 7. Розподіл значень компонент залишкових напружень  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  (МПа) для плоскої (а) та вісесиметричної (б) постановок

лінії удару – рис. 3) формується у вигляді двох характерних зон (рис. 7, а). Перша – зона стиску біля лицьової поверхні пластини зі значеннями  $\sigma_x = -22$  МПа. Друга – зона розтягу біля тильної поверхні пластини зі значеннями напруження до  $\sigma_x = 76$  МПа. У вісесиметричній постановці (рис. 7, б) формується лише одна зона по всій товщині пластини – зона напружень стиску з максимальним значенням до  $\sigma_x = -120$  МПа.

По результатах аналізу картини розподілу значень компоненти напруженого стану  $\sigma_y$  (спрямованої вздовж лінії удару – рис. 3), що формується у випадку використання плоского ударника, можна побачити практично прямокутну зону напружень розтягу (рис. 7, а). Максимальних значень напруження розтягу досягають на тильній поверхні пластини (т. С на рис. 3)  $\sigma_y = 76$  МПа. Також на тильній поверхні на відстані 2,5 мм від лінії удару формується ділянка напружень стиску  $\sigma_y = -36$  МПа. Мінімальних значень напруження розтягу досягають на лицьовій поверхні (т. В)  $\sigma_y = 0,01$  МПа.

У вісесиметричній постановці (рис. 7, б) картина напружень дещо інша. По товщині пластини формується практично рівномірний розподіл

значень компоненти  $\sigma_y$  напружень стиску. Різниця між максимальним та мінімальним значенням цієї компоненти напружень по лінії удару не перевищує 20 МПа.

Розрахункові значення компонент залишкового напруженого стану  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  по товщині пластини (від т. В до т. С) наведено у табл. 3. Порівняння значень компонент напруженого стану по лінії удару (табл. 3) показує, що на відміну від плоскої форми електрода-ударника використання вісесиметричного ударника призводить до формування практично рівномірного розподілу обох компонент напруження – як  $\sigma_x$ , так і  $\sigma_y$ .

Крім того, використання електрода-ударника плоскої форми (ролика) призводить до формування як напружень стиску, так і небажаних напружень розтягу зі значеннями, що можуть сягати половини значення межі плинності матеріалу. Але використання електрода-ударника вісесиметричної форми призводить до формування обох компонент напружень як напружень стиску і значення яких може досягати величини у  $-120$  МПа. Це може позитивно вплинути на залишкові напружені стани зварних конструкцій навіть через застосування тільки динамічної складової ЕДО [4].

Таблиця 3. 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	Координата точки по товщині пластини (по лінії удару), мм				
		0 (т. В)	1	2	3	4 (т. С)
Плоска	$\sigma_x$ , МПа	-25	-56	-23	46	76
	$\sigma_y$ , МПа	0,1	0,01	17	53	80
Осьова	$\sigma_x$ , МПа	-131	-155	-161	-164	-128
	$\sigma_y$ , МПа	-0,08	-9	-15	-20	-5

Але, як показано вище, практичне застосування електрода у формі ролика має переваги перед циліндром з позицій простоти і зручності використання. Враховуючи наведене, в перспективі слід передбачити дослідження напружених станів зварних конструкцій після ЕДО із застосуванням ролика при більших енергетичних характеристиках електродинамічних дій, зокрема, при зростанні частоти ІЕС.

**Висновки**

1. Використання для ЕДО циліндричного електрода-індентора з напівсферичним робочим торцем у порівнянні із плоским видовженим електродом у формі ролика, при однаковій швидкості їх руху у 5м/с, призводить до:

поширення на всю товщину пластини зони ефективних пластичних деформацій  $\epsilon_{eff}^p$ , яка має форму близьку до трапеції (у випадку плоского ударника зона  $\epsilon_{eff}^p$  поширюється лише на половину товщини пластини та має форму сегмента кола), а значення максимальних деформацій у 1,4 рази є більшими за аналогічні значення, що формуються від дії індентора плоскої форми.

формування по товщині пластини практично рівномірного розподілу обох компонент напруженого стану – як  $\sigma_x$ , так і  $\sigma_y$ , які на відміну від іншої (плоскої) постановки задачі є напруженнями

стиску, значення яких може досягати величини у –120 МПа.

2. Використання електрода-ударника вісесиметричної форми дозволяє за інших рівних умов більш ефективно регулювати динамічною складовою ЕДО, напруженим станом пластини по всій її товщині, що сприяє зниженню рівня залишкових зварювальних напружень розтягу.

3. Доведено, що практичне застосування електрода у формі ролика має переваги перед циліндром з позицій простоти і зручності використання. Враховуючи наведене, дослідження напружених станів зварних з'єднань після ЕДО із застосуванням ролика при більших енергетичних характеристиках електродинамічних дій є перспективним для оптимізації службових характеристик зварних конструкцій.

**Список літератури/References**

1. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 24–29.
2. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment. *Ibid*, 6, 2–11.
3. 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. *Strength of Materials*, 45, 2, 210–220.
4. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Mikhodui O.L., Sidorenko Y.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.

**INFLUENCE OF ELECTRODE SHAPE ON STRESSED-STRAINED STATE OF AMg6 ALLOY DURING ITS ELECTRODYNAMIC TREATMENT**

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, M.O. Pashchyn<sup>1</sup>, O.L. Mykhoduj<sup>1</sup>, A.A. Hryniuk<sup>1</sup>, P.V. Honcharov<sup>1</sup>, A.O. Alyoshyn<sup>1</sup>, T.G. Solomiychuk<sup>1</sup>, Yu.M. Sydorenko<sup>2</sup>, P.R. Ustyemenko<sup>2</sup>, Yuhui Yao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv. E-mail: mail@kpi.ua

<sup>3</sup>Shenzhen Hanzhizi Science and Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Rd., Longgang District, Shenzhen, Guangdong, PRC. E-mail: 514929948@qq.com

The advantages of using electrodynamic treatment (EDT) of metal in the welding process as compared to EDT at room temperature were substantiated. The advantages and disadvantages of using electrode for EDT in the form of a cylindrical rod and a roller in the welding process were considered. Using the method of mathematical modeling in planar and axisymmetric statements, the effect of the shape of the electrode-indenter on stress-strain state of the welded plate from aluminum AMg6 alloy after applying the dynamic EDT component was evaluated. The features and differences of creation and use of developed mathematical models were described. The distribution of the values of the stress-strain state throughout the thickness of the plate was determined, in particular, the values of the zone of plastic deformations and stresses during interaction of the plate with the electrode-indenter moving at a speed of 5 m/s. It was found that the use of a cylindrical indenter with a hemispherical working end (axisymmetric shape) as compared to the roller (plane elongated shape) is more effective from the standpoint of optimizing the residual stress state in the plate. The use of a cylindrical indenter leads to the formation of compressive stresses in the plate with the values of up to -120 MPa. This should have a positive effect on the distribution of residual welding stresses under the action of the dynamic EDT component. 4 Ref., 3 Tabl., 7 Fig.

*Key words: electrodynamic treatment, aluminum alloy, impact interaction, mathematical modeling, residual stresses, plastic deformations, electrode-indenter, movement, elastoplastic environment*

Надійшла до редакції 19.07.2022