

УДК 621.791.052:539.43

Напружено-деформований стан пластини товщиною 4 мм зі сплаву АМгб від ударного впливу електрода-індентора в умовах підвищених температур

Устименко¹ П.Р.; Сидоренко¹ Ю.М.; Пашин² М.О.

1 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

2 – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У математичній постановці розглянуто процес ударної взаємодії мідного електрода-індентора з пластиною товщиною 4 мм, виготовленою із алюмінієвого сплаву АМгб, під час електродинамічної обробки з супутнім підігрівом пластини від 20°C до 300°C. Вплив температури на процес взаємодії тіл моделювався через зміну величини модуля пружності матеріалів. Розв'язок поставленої задачі проводився методом скінченних елементів у тривимірній лагранжевій постановці. За результатами проведених розрахунків отримано значення залишкових напружень, пластичних деформацій, глибини входження на швидкості 5 м/с електрода-індентора у пластину та часу їхньої взаємодії.

Ключові слова: алюмінієвий сплав АМгб; зварне з'єднання; залишкові напруження; електродинамічна обробка; ударна взаємодія; електрод-індентор; метод скінченних елементів; пластичні деформації.

Електродинамічна обробка (ЕДО), заснована на сумісній імпульсній взаємодії електричного струму і динамічного навантаження на струмопровідні матеріали та вважається перспективним методом регулювання напруженого стану металевих конструкцій [1]. До теперішнього часу деякі дослідження механізмів впливу ЕДО на напружений стан алюмінієвих сплавів та зварних з'єднань з цих матеріалів були опубліковані в [1-3]. Але питання розподілу залишкових напружень та пластичних деформацій, які утворюються в зварних пластинах від динамічної складової ЕДО при супутньому підігріві, досі не досліджене.

Для проведення такого дослідження в комп'ютерній програмі ANSYS було створено лагранжеву скінченно-елементну (СЕ) модель четвертих частин пластини товщиною 4 мм та електрода-індентора (Рис. 1). Наявність зварного шва в пластині було представлено як рівномірний її розтяг по вісі Х до межі текучості сплаву АМгб при температурах 20, 150 та 300°C. Ударна взаємодія пластини з мідним індентором відбувалася в результаті надання йому швидкості руху – 5 м/с.

Подальший математичний аналіз проходив в два етапи. Перший етап – прикладання до пластини статичного навантаження розтягу для моделювання певного рівня залишкових напружень, які будуть еквівалентні залишковим зварним напруженням. Другий етап – моделювання ударної взаємодії електрода-індентора з попередньо розтягнутою пластиною. Для чисельного аналізу цього динамічного процесу була застосована континуальна модель

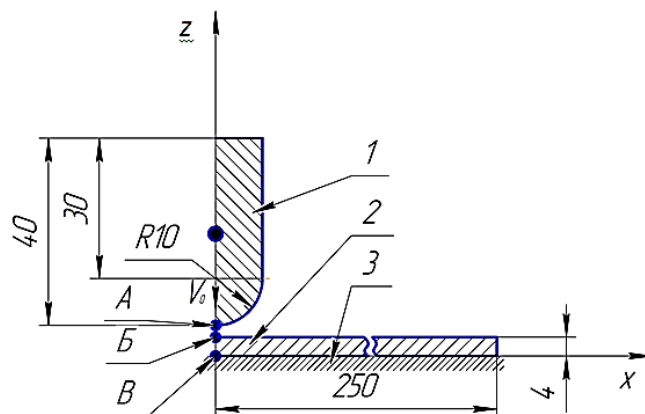


Рис. 1. Розрахункова схема динамічного навантаження пластини, що обробляється ЕДО:

1 – електрод-індентор; 2 – пластина, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа, А – точка на зовнішній поверхні електрода, В – точка на зовнішній поверхні пластини, В – точка на зворотній поверхні пластини

середовищ [4] поведінка яких описувалася законами збереження маси, кількості руху та енергії у диференціальних рівняннях в частинних похідних. Скінченно-елементна модель задачі була побудована на основі тривимірного СЕ у формі паралелепіпеда з характерним розміром: для пластини – 0,25 мм, а для електрода-індентора – 1 мм.

Поведінка матеріалу індентора (мідь) та пластини (сплав АМг6) під час динамічної взаємодії описувалася ідеально пружно-пластичною реологічною моделлю матеріалу. Значення основних характеристик міді були наступними: густина $\rho=8940$ кг/м³, модуль пружності $E=128$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\mu=0,34$, границя текучості $\sigma_T=300$ МПа; Зміна механічних характеристик матеріалу пластини (АМг6 – густиною $\rho=2640$ кг/м³) в залежності від впливу зовнішньої температури представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Вплив температури на механічні характеристики пластини та навантаження

T, °C	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_x , МПа
20	71	150	150
150	60	120	120
300	55	50	50

Попередній розподіл в пластині залишкових напружень розтягу в залежності від величини її попереднього нагріву задавався компонентною нормальних напружень σ_x зі значеннями відповідно до табл. 1.

Отримані результати математичного аналізу наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати математичного моделювання

T, °C	Тривалість контакту індентора та пластини, мкс	Глибина входження індентора в пластину, мм	Ефективні деформації, %	
			в точці контакту пластини та індентора (т. Б)	на тильній поверхні пластини по лінії удару (т. В)
20	145	0,334	9	8,8
150	155	0,369	10	10,1
300	195	0,51	24	10,6

Проведені розрахунки показують, що підігрів пластини сприяє збільшенню тривалості контакту індентора з пластиною і, як наслідок, зростанню глибини входження індентора у пластину та значень ефективних пластичних деформацій. Це можна пояснити підвищенням пластичності металу від термічного впливу. Але зростання глибини входження не є рівномірним.

Збільшення температури супутнього підігріву до 150°C має не суттєвий вплив на процес взаємодії індентора та пластини. Значення як глибини входження індентора в пластину, так і ефективних пластичних деформацій, у точці контакту, збільшується не більше ніж на 10%.

Більш суттєвий вплив на описані процеси відбувається при зростанні температури супутнього підігріву до 300°C. У порівнянні з кімнатною температурою, глибина входження індентора збільшується на понад 50%, а значення ефективних деформацій у точці контакту – у понад 2,5 рази.

Якщо розглянути вплив підігріву пластини на поведінку значень ефективних деформацій на тильній поверхні пластини, то можна констатувати, що він стає ще меншим. Значення цих

деформацій тут практично не змінні. Різниця між найбільшим та найменшим значеннями становить менше 20%.

Враховуючі рівень точності математичного методу, що застосовувався для проведення досліджень, то можна стверджувати, що збільшення температури пластини до 150°C практично не впливає на процес її деформування від динамічної складової ЕДО.

Для більш повного аналізу отриманих результатів було досліджено розподіл значень компоненти залишкових напружень σ_x в пластині після взаємодії з індентором (рис. 2).

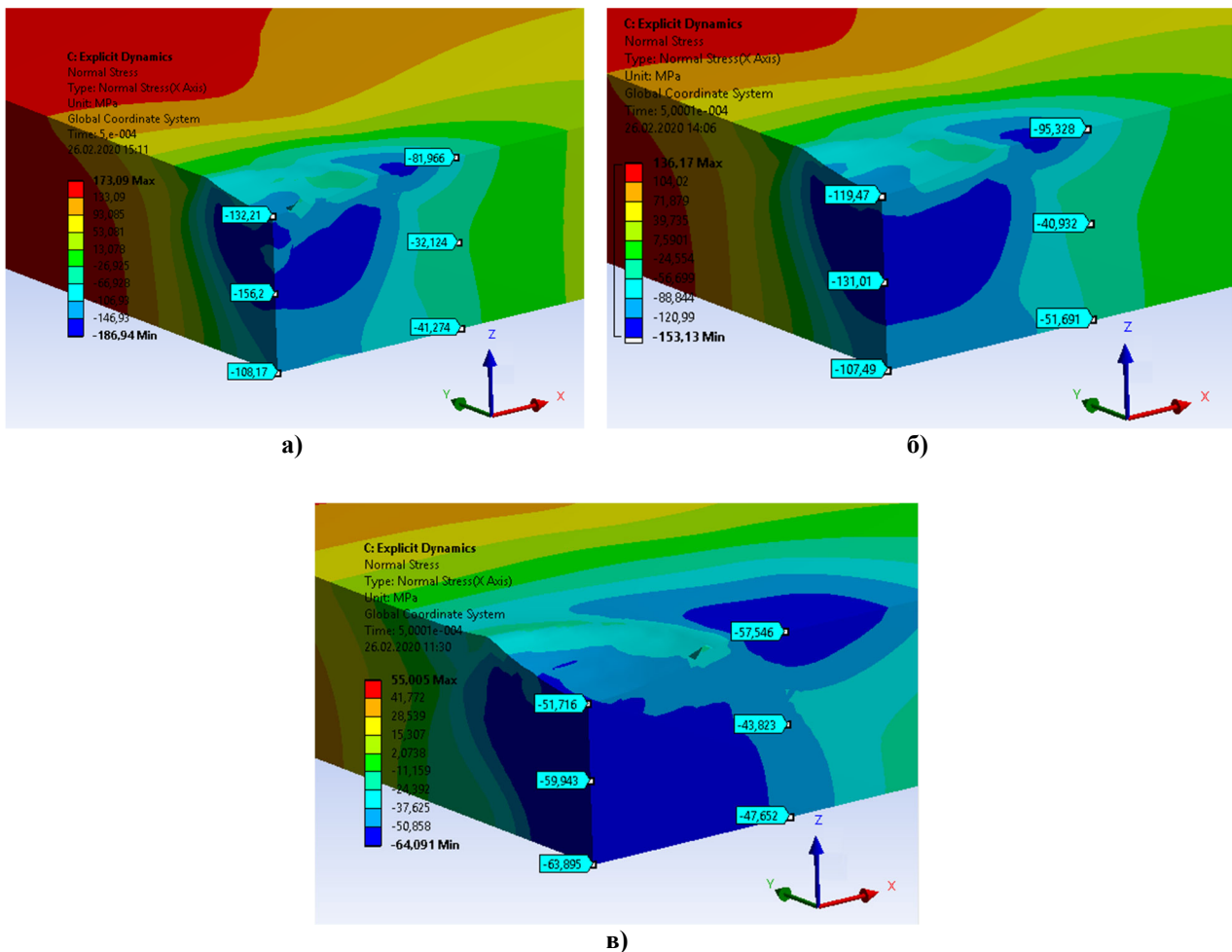


Рис. 2. Розподіл компоненти залишкових напружень σ_x в пластині після впливу динамічної складової ЕДО з супутнім підігрівом до температури: а) $T=20^\circ\text{C}$, б) $T=150^\circ\text{C}$, в) $T=300^\circ\text{C}$

Представлений на рис. 2 розподіл напружень показує, що в зоні взаємодії електрода-індентора з пластинною компонента σ_x суттєво змінює своє значення – з початкового напруження розтягу (табл. 1) на напруження стиску. Це позитивно вплине на подальшу роботу майбутнього зварного з'єднання. Причому по лінії удару величина напружень σ_x після ЕДО наближається до значень границі текучості матеріалу при відповідній температурі. Також можна побачити підтвердження раніше зробленого висновку, що попередній нагрів пластини до 150°C має не суттєвий вплив на процес деформування. І тільки зростання температури до 300°C зменшує значення залишкових напружень після ЕДО практично в двічі.

Схожий результат можна спостерігати в пластині і на відстані 5 мм від лінії удару. На рис. 2 додатково зображено значення напружень σ_x у місцях найчастішого руйнування

пластини (майбутнього зварного з'єднання) при циклічному навантаженні під час експлуатації реальної конструкції, а саме: у центрі зварного шва та на відстані 5 мм від нього. Як і на лінії удару тут найбільший вплив динамічної складової ЕДО теж відбувається на лицьовій (контактній) поверхні пластини. Зростання температури попереднього нагріву до 150°C теж практично не впливає на зміну σ_x , а подальше збільшення до 300°C призводить до зменшення σ_x з -80...-90МПа на понад 60% до -55...-60МПа.

Висновки

Застосування динамічної складової ЕДО з одночасним супутнім підігрівом зварних пластин дозволяє знизити значення залишкових зварних напружень σ_x як по лінії удару, так і на відстані 5 мм від неї до від'ємних значень. Це позитивно впливає на працездатність зварного шва, зокрема дає можливість збільшити ресурс при циклічних навантаженнях.

Збільшення температури нагріву пластини до 150°C практично не змінює вплив ЕДО на розподіл в пластині залишкових напружень та деформацій, але подальший її нагрів до 300°C дозволяє зменшити значення залишкових напружень майже у двічі.

Список літератури

1. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Черкашин А.В., Миходуй О.Л., Кондратенко И.П. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений // Автоматическая сварка. – 2012. - № 1. – С.3-7.
2. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Смиленко В.Н. Изменение напряженно-деформированного состояния после электродинамической обработки сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 // Автоматическая сварка. – 2007. - № 6. – С.11-19.
3. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mykholdui O.L., Sydorenko Y.M. Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamical Treatment // Strength of Materials. – 2017. – Vol.49. Issue 3. – PP.369-380.
4. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 379 с.

Stress-strain state of a 4 mm thick plate made of AMg6 alloy from the impact of the indenter electrode at elevated temperatures

P. Ustymenko; Yu. Sydorenko; M. Pashchyn

Abstract. The process of shock interaction of a copper electrode-indenter with a plate 4 mm thick, made of aluminum alloy AMg6, during electrodynamic processing with concomitant heating of the plate from 20 °C to 300 °C is considered in the mathematical formulation. The influence of temperature on the process of interaction of bodies was modeled due to the change in the modulus of elasticity of materials. The solution of this problem was carried out by the finite element method in a three-dimensional Lagrangian formulation. According to the results of the calculations, the values of residual stresses, plastic deformations, depth of entry at a speed of 5 m / s of the indenter electrode into the plate and the time of their interaction were obtained.

Keywords: aluminum alloy; welded joint; residual stresses; electrodynamic treatment; shock interaction, electrode-indenter; finite element method; plastic deformation.