

ЗАЛИШКОВІ ЗВАРЮВАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ В СПЛАВІ АМГ6 ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ В УМОВАХ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРУЖНОГО РОЗТЯГУ

Л.М. Лобанов¹, В.В. Лисак¹, О.Л. Міходуй¹, О.М. Тимошенко¹, М.О. Пашин¹, І.П. Кондратенко²,
В.В. Чопик², О.М. Карлов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, Берестейський пр., 56.

Запропоновано концепцію регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань, яка базується на сумісному застосуванні електродинамічної обробки (ЕДО) металу шва, який є попередньо навантаженим пружним розтягом (ППР). Показано, що застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР. Доведено, що сумісне застосування методів ППР і ЕДО може сприяти синергії механізмів зменшення залишкових зварювальних напружень, яка базується на ефекті електропластичності, що реалізується в умовах попереднього пружного деформування зварного з'єднання. Встановлено, що використання ЕДО зварних з'єднань зі сплаву АМГ6, які знаходяться в умовах ППР, дозволяє застосовувати на 50 % менший рівень навантаження $\sigma_{\text{ппр}}$, для зниження залишкових зварювальних напружень розтягу, ніж за відсутності ЕДО. Доведено, що ППР зварного з'єднання при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа та сумісне застосування ЕДО і ППР (при аналогічному значенні $\sigma_{\text{ппр}}$) відповідно сприяють зниженню залишкових зварювальних напружень розтягу в сплаві АМГ6 на 20 і 85 % відповідно. Застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР і сприятиме розвитку методів регулювання залишкових напружених станів зварних з'єднань на базі їхнього попереднього навантаження. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: імпульс струму, зварні конструкції, залишкові напруження, зварне з'єднання, електропластичний ефект, попередній пружний розтяг, пластична деформація, алюмінієвий сплав, електродинамічна обробка, зменшення напружень

Вступ. Актуальність і мета роботи. Необхідність регулювання залишкових напружень зварних з'єднань, які негативно впливають на їхню довговічність, точність і корозійну стійкість, є однією з актуальних проблем інженерної практики. При виготовленні нових типів зварних конструкцій традиційні методи забезпечення їхніх оптимальних напружено-деформованих станів (НДС) не завжди можливо застосувати.

Традиційні методи регулювання НДС можна розділити на термічні та механічні, які використовуються як у процесі, так і після зварювання конструкцій [1]. У сучасних умовах виробництва застосування термічних методів регулювання НДС, з урахуванням витрат на енергоносії, істотно підвищує собівартість виготовлення металоконструкцій. Особливо це стосується великогабаритних металовмісних [2] конструкцій, а також виробів із легких сплавів з високою теплопровідністю.

Силові методи засновані на прикладанні до конструкції на різних етапах її виготовлення механічних навантажень, що компенсують її залишковий НДС від зварювання. Зворотний вигин є ефективним способом мінімізації зварювальних

деформацій у виробах з відносно невеликою згинальною жорсткістю, наприклад під час вварювання фланців у тонкостінні оболонкові конструкції [3]. Це вимагає ускладнення технології зварювання, але в низці випадків є раціональнішим рішенням, ніж корегування НДС конструкції після її зварювання. При цьому застосування вигину доцільне лише при багатосерійному виробництві через високу вартість збирального оснащення.

Зварювання з попереднім пружним розтягом (ППР) деталей – метод оптимізації НДС тонколистових конструкцій, який був застосований під час виробництва великогабаритних стрингерних панелей із легких сплавів [4]. Застосування ППР забезпечує зменшення залишкових зварювальних пластичних деформацій стиску. Недоліком методу є значна металоємність оснащення для навантаження елементів конструкцій, що зварюються.

Перспективним підходом, що вирізняється простотою застосування, малим енергоспоживанням і не вимагає металомісткого устаткування, є вдосконалення та розробка імпульсних методів, що базуються на ударно-хвильових впливах на конструкцію в процесі (або після) її зварювання. Так,

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Лисак В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6565-2793>,
Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Тимошенко О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9163-1067>,
Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,
Чопик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>, Карлов О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>

© Л.М. Лобанов, В.В. Лисак, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, М.О. Пашин, І.П. Кондратенко, В.В. Чопик, О.М. Карлов, 2025

традиційний метод проковування зварних швів знайшов свій розвиток у застосуванні ультразвукового ударного інструменту [5, 6], що вирізняється широкими можливостями для керування, але здійснює тільки поверхневий вплив на метал, який обробляється.

Результати попередніх досліджень дали змогу встановити явище підвищення пластичності та зниження спротиву металу деформуванню завдяки одночасній дії активного механічного навантаження та імпульсного електричного струму (ІЕС) густиною $j \geq 1$ кА/мм². Явище було названо електропластичним ефектом (ЕПЕ) [7], а його практичне використання було реалізовано в методі електродинамічної обробки (ЕДО) зварних з'єднань. Застосування ЕДО відкрило нові можливості оптимізації НДС і підвищення точності виготовлення зварних конструкцій [8]. Особливість дії ЕПЕ відрізняється від відомого теплового ефекту при дії ІЕС (джоулевого розігріву) тим, що проявляється лише в деформованому металі, який перебуває під впливом механічних навантажень [9]. При цьому синергія сумісної дії ІЕС і динамічного (ударного) навантаження ініціює в металевих конструкціях перерозподіл залишкових напружень [8, 10].

У [11] досліджено механізм формування НДС за ЕДО в умовах одноісного розтягу плоских зразків сплаву АМгб системи Al–Mg. Доведено, що ЕДО зразків, які розтягнуті попереднім навантаженням $\sigma_{\text{поп}} \approx \sigma_{0,2}$ сплаву АМгб, забезпечує більшу релаксацію напружень розтягу $\Delta\sigma_{\text{поп}}$ у порівнянні з варіантами $\sigma_{\text{поп}} < \sigma_{0,2}$ або $\sigma_{\text{поп}} > \sigma_{0,2}$. Результати [12] показали, що за ЕДО в умовах ППР зразків зварних з'єднань сталі Ст3 їхнє локальне пластичне деформування починалася в пружній області навантаження металу, що візуально було підтверджено формуванням картин смуг Чернова-Людерса. Досліджували вплив ІЕС на пластичність титанових сплавів при випробуванні плоских зразків на розтяг за різного ступеня відносної деформації. Показано, що дія ІЕС у процесі навантаження сприяє підвищенню пластичності сплавів за рахунок синергії ЕПЕ та джоулевого розігріву [13].

З урахуванням результатів [11–13] слід зазначити доцільність застосування ЕДО до зварних з'єднань, що виконані в умовах ППР. Переваги поєднання методів (у порівнянні з їхнім окремих застосуванням) базуються на тому, що за силової схеми ППР до деталей перед зварюванням прикладають зовнішні зусилля, які викликають пружні напруження розтягу. Це, згідно з [11], забезпечує більшу величину зниження напружень за ЕДО у порівнянні з обробкою металу без навантаження.

Але застосування ППР не виключає утворення залишкових пластичних деформацій стиску $\epsilon_{\text{зв}}^{\text{пл}}$ при охолодженні металу зварного шва, хоча й зменшує їхній рівень. Це знижує можливості ППР забезпечити повне усунення залишкових зварювальних НДС розтягу.

Застосування ЕДО металу шва сприяє утворенню залишкових пластичних деформацій розтягу $\epsilon_{\text{ЕДО}}^{\text{пл}}$, наслідком взаємодії яких із $\epsilon_{\text{зв}}^{\text{пл}}$ стиску є зменшення останніх. Позитивним наслідком використання ЕДО є зниження зусилля ППР за рахунок формування $\epsilon_{\text{ЕДО}}^{\text{пл}}$, що дозволяє оптимізувати металоємність силового збирального оснащення. Таким чином, ЕДО зварних з'єднань, виконаних в умовах ППР, має забезпечити більшу ефективність впливу на залишкові НДС зварних конструкцій у порівнянні з використанням кожного з методів окремо.

Метою даної роботи є дослідження впливу ЕДО в умовах супутнього ППР зварних з'єднань зі сплавом АМгб на їх залишкові НДС.

Методика, матеріали та обладнання для досліджень. У якості предмету досліджень використовували зразки зварних з'єднань у вигляді пластин розміром 1100×400×2 мм зі сплаву АМгб, які були піддані ППР за різних значень пружного навантаження $\sigma_{\text{ппр}}$ у спеціалізованому збирально-силовому оснащенні. Схему ППР і геометричні характеристики зварного шва наведено на рис. 1, а. Після навантаження кожного зразка ППР, а також у подальших дослідженнях проводили реєстрацію зміни значення поздовжньої (вздовж шва) компоненти напружень σ_x розтягу на його зовнішній поверхні двома методами – із застосуванням механічного тензометра (на базі 100 мм) та електронної спекл-інтерферометрії із використанням лазерного інтерферометра (рис. 1, б) [14]. Похибка реєстрації значень напружень не перевищувала 10 %. Враховуючи малу товщину дослідних пластин і виключення їхніх вертикальних переміщень (за рахунок умов закріплення зразків в оснащенні), приймали допущення про рівність напружень σ_x на зворотній і зовнішній поверхнях пластин. На підготовлену під зварювання поверхню кожного пружно розтягнутого зразка до значення $\sigma_{\text{ппр}}$ методом TIG наплавляли (з повним проплавленням) валик із розмірами 200×8×2 мм із застосуванням присадного дроту. Наплавлений валик задавали близьким за геометричними характеристиками до зварних з'єднань зі сплавів на основі Al.

Зварювання TIG виконували із застосуванням джерела живлення TIR-315 на режимі при значеннях напруги, струму та швидкості процесу відпо-

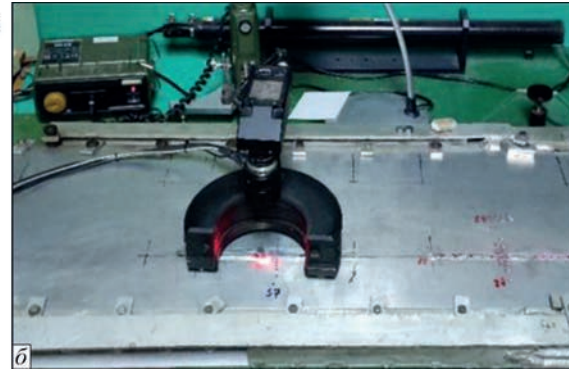
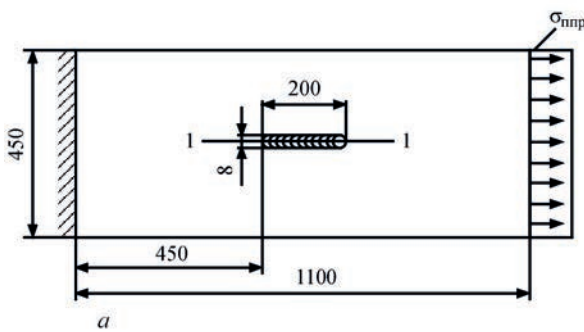


Рис. 1. Технологія поздовжнього пружного розтягу (ППР) зразків зварних з'єднань зі сплаву АМгб: а – схема ППР пластин, де 1-1 – лінія, вздовж якої проводили реєстрацію НДС пластини на етапах зварювання, навантаження, ЕДО та розвантаження, $\sigma_{\text{ппр}}$ – навантаження пружним розтягом; б – пластина зі зварним швом і встановленим інтерферометром, яка зафіксована в оснащенні в стані ППР

відно: $U_{\text{зв}} = 18 \text{ В}$, $I_{\text{зв}} = 110 \text{ А}$, $V_{\text{зв}} = 1,4 \text{ мм/с}$, матеріал присадки – дріт СВАМгб $\varnothing 1,6 \text{ мм}$. Після охолодження та контролю значень напружень σ_{TIG} після зварювання виконували ЕДО зафіксованого в оснащенні зразка. Обробку проводили за ручного тримання електродного пристрою із застосуванням джерела живлення «Іскра-1» у напрямку лінії вздовж центра шва та обох ліній сплавлення. Режим ЕДО: $U_i = 370 \text{ В}$, $U_p = 250 \text{ В}$, $I_i = 4240 \text{ А}$, $I_p = 1170 \text{ А}$, $V_{\text{ЕДО}} = 4 \text{ мм/с}$, де U_i , I_i та U_p , I_p – значення напруги, струму відповідно електроімпульсної (I) та ударної (P) складових електродинамічної дії, а $V_{\text{ЕДО}}$ – швидкість обробки. Після ЕДО проводили реєстрацію значень напружень $\sigma_{\text{ЕДО}}$ у розтягнутому зразку (рис. 1, а) та напружень $\sigma_{\text{розв}}$ – після його розвантаження. Також виконували ППР пластини з наступним наплавленням валика без застосування ЕДО.

Значення ППР пластин і характеристики поздовжньої компоненти НДС на різних етапах навантаження та ЕДО представлені у таблиці.

На першому етапі досліджень проводили ППР зразка до значення $\sigma_{\text{ппр}} = 45 \text{ МПа}$ ($0,3\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб) з наступним наплавленням валика та його ЕДО (рядок 1 таблиці). На другому та третьому етапах виконували наплавлення після ППР зразків до значення $\sigma_{\text{ппр}} = 90 \text{ МПа}$ ($0,6\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб) відповідно з наступною ЕДО (рядок 2 таблиці) та без обробки (рядок 3 таблиці).

Із результатів попередніх досліджень відомо, що пікове значення компоненти σ_x залишкових зварювальних напружень розтягу для сплаву АМгб становить 120 МПа. При цьому максимальна ефективність ППР досягається за значень $\sigma_{\text{ппр}} \approx 0,9\sigma_{0,2}$

Зміни НДС зразків зі сплаву АМгб $\delta = 2 \text{ мм}$ після ППР та ЕДО

№	$\sigma_{\text{ппр}}$, МПа	ЕДО, Так «+», Ні «-»	σ_{TIG} , МПа	$\sigma_{\text{ЕДО}}$, МПа	$\sigma_{\text{розв}}$, МПа	$\Delta\sigma_{\text{ЕДО}}^*$, МПа/%	$\Delta\sigma_{\text{ппр}}^*$, МПа/%	$\Delta\sigma_{\Sigma}^*$, МПа/%
1	45	+	110	90	75	-20*/18	-15/16	-35/32
2	90	+	155	75	25	-80/52	-50/65	-130/ 85
3	90	-	150	-	120	-	-30/20	-30/20

*Примітки: 1. $\Delta\sigma_{\text{ЕДО}} = \sigma_{\text{ЕДО}} - \sigma_{\text{TIG}}$, $\Delta\sigma_{\text{ппр}} = \sigma_{\text{розв}} - \sigma_{\text{ЕДО}}$, $\Delta\sigma_{\Sigma} = \Delta\sigma_{\text{ЕДО}} + \Delta\sigma_{\text{ппр}}$. 2. Знак «-» свідчить про зниження напружень відносно попередніх значень.

сплаву АМгб [1, 2, 4]. Але в даній роботі не застосували ППР зразків за значень $\sigma_{\text{ппр}} > 0,6\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб, оскільки це вимагало б суттєвого збільшення жорсткості, а, відповідно, й металоємності оснащення для розтягу. Це протирічить меті даної роботи, яка полягає у доведенні можливості зменшення металоємності оснащення для ППР за рахунок застосування ЕДО.

Обговорення результатів експериментів.

Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження-розвантаження та ЕДО дослідних зразків представлені на рис. 2-4. Із даних таблиці при порівнянні стовпців 2 і 4 для всіх варіантів навантаження зразків (рядки 1-3) можна бачити, що в загальному випадку наплавлення валика сприяє підвищенню напружень розтягу в шві на 60...65 МПа за рахунок усадкового скорочення металу шва при охолодженні.

ЕДО зразка в стані розтягу за значення $\sigma_{\text{ппр}} = 45 \text{ МПа}$ (рядок 1 таблиці) сприяє зниженню напружень на 18 % – із $\sigma_{\text{TIG}} = 110 \text{ МПа}$ до $\sigma_{\text{ЕДО}} = 90 \text{ МПа}$ (рис. 2). Це підтверджує отримані раніше результати [11] стосовно регулювання напружень зразків сплаву АМгб при ЕДО. Подальше повне розвантаження зразка внаслідок зняття ППР знижує напруження ще на 16 % – з $\sigma_{\text{ЕДО}} = 90 \text{ МПа}$ до $\sigma_{\text{розв}} = 75 \text{ МПа}$. Таким чином, ефективність застосування ППР при $\sigma_{\text{ппр}} = 0,3\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб близька до впливу ЕДО на релаксацію залишкових зварювальних напружень σ_{TIG} розтягу. Сумісний вплив ППР і ЕДО знижує σ_{TIG} на 32 %, тобто $\Delta\sigma_{\Sigma} = 35 \text{ МПа}$ (рядок 1 таблиці).

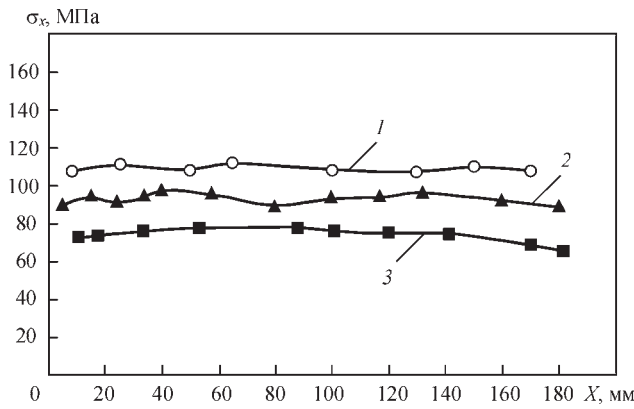


Рис. 2. Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження–розвантаження та ЕДО зразка при дії ППР із $\sigma_{\text{ппр}} = 45$ МПа (рядок 1 таблиці), де: крива 1 – σ_{TIG} після ППР і наплавлення ТІГ, 2 – $\sigma_{\text{ЕДО}}$ після ЕДО, 3 – $\sigma_{\text{розв}}$ після розвантаження

Напружений стан зразка при зростанні $\sigma_{\text{ппр}}$ до 90 МПа (рядок 2) наведено на рис. 3. ЕДО зразка в стані розтягу сприяє зниженню напружень на 52 % – з $\sigma_{\text{TIG}} = 155$ МПа до $\sigma_{\text{ЕДО}} = 75$ МПа, що підтверджує результати [11]. Подальше повне розвантаження зразка (зняття ППР) знижує напруження ще на 65 % – з $\sigma_{\text{ЕДО}} = 75$ МПа до $\sigma_{\text{розв}} = 25$ МПа. Слід зазначити, що значення відносної (γ %) ефективності ЕДО і ППР (стовпці 7 і 8 у рядку 2 таблиці) є близькими та складають 52 і 65 % відповідно. Але їхні абсолютні значення відрізняються й мають значення 80 МПа (ЕДО) і 50 МПа (ППР). Таким чином, ЕДО має більший вплив на зниження зварювальних напружень, ніж ППР. Сумісний вплив ППР і ЕДО – $\Delta\sigma_x$ при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа знижує σ_{TIG} на 85 % – на 130 МПа (рядок 2 таблиці).

Напружений стан зразка при ППР до значення $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа без застосування ЕДО (рядок 3) наведено на рис. 4. Повне розвантаження пластини (зняття ППР) знижує напруження σ_{TIG} на 20 % – з 150 МПа до $\sigma_{\text{розв}} = 120$ МПа. У цьому випадку (виключення ЕДО) значення $\Delta\sigma_{\text{ппр}} = \Delta\sigma_x$ і воно є сут-

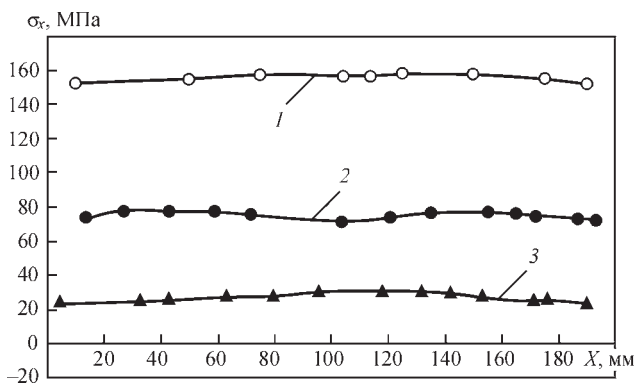


Рис. 3. Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження–розвантаження та ЕДО зразка при дії ППР із $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа (рядок 2 таблиці), де: крива 1 – σ_{TIG} після ППР і наплавлення ТІГ, 2 – $\sigma_{\text{ЕДО}}$ після ЕДО, 3 – $\sigma_{\text{розв}}$ після розвантаження

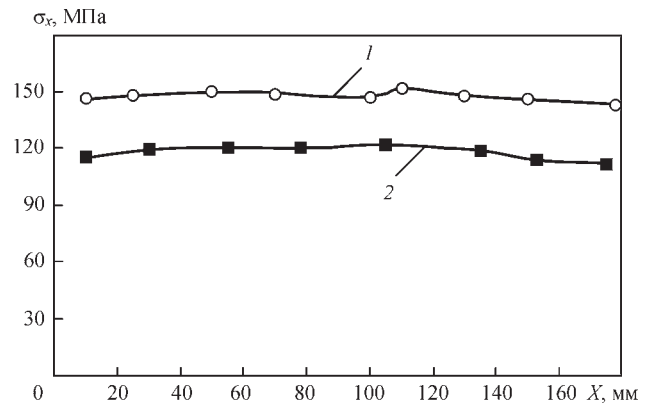


Рис. 4. Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження–розвантаження зразка при дії ППР без застосування ЕДО з $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа (рядок 3 таблиці), де: крива 1 – σ_{TIG} після ППР і наплавлення ТІГ, 2 – $\sigma_{\text{розв}}$ після розвантаження

тєво меншим у порівнянні з отриманими за аналогічних умов ППР зразка з використанням ЕДО (рядок 2 таблиці). Так, застосування ЕДО та його виключення у $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа за близьких значеннях σ_{TIG} , наведених у рядках 2 і 3 (стовпчик 4 таблиці), забезпечує зниження залишкових зварювальних напружень σ_{TIG} на 85 і 20 % від початкового рівня відповідно. Отримані результати можна пояснити тим фактом, що ЕДО (при реалізації ефекту електропластичності) трансформує частку пружної складової напружено-деформованого стану металу зварного шва у пластичні деформації розтягу, наслідком чого є додаткове зниження напружень σ_{TIG} .

Як було показано вище з посиланням на результати попередніх досліджень, напрямком зростання $\Delta\sigma_{\text{ппр}}$ може бути застосування ППР при значеннях $\sigma_{\text{ппр}}$, що є близькими до $\sigma_{0,2}$ сплаву АМг6 [4]. Але даний підхід потребує суттєвого зростання металоемності оснащення ППР і виходить за рамки даної роботи.

При порівнянні даних таблиці можна бачити, що ППР зразка з наступною ЕДО (рядок 1) при $\sigma_{\text{ппр}} = 45$ МПа і ППР при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа без ЕДО (рядок 3) забезпечують близькі абсолютні значення ефективності $\Delta\sigma_x$, які знаходяться в діапазоні 30...35 МПа (стовпчик 9).

Із наведених вище результатів можна зробити висновок, що використання ЕДО зварних з'єднань, що знаходяться в умовах ППР, дозволяє застосовувати менші значення $\sigma_{\text{ппр}}$ для зниження залишкових зварювальних напружень розтягу, ніж при ППР за відсутності ЕДО. Таким чином, застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоемності та жорсткості оснащення для ППР і сприятиме розвитку методів регулювання залишкових напружених станів зварних

з'єднань із використанням їхнього попереднього навантаження.

Висновки

1. За результатами попередніх досліджень запропоновано концепцію регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань, яка базується на сумісному застосуванні електродинамічної обробки металу шва, що є попередньо навантажений пружним розтягом. Показано, що застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР.

2. Доведено, що сумісне застосування методів ППР і ЕДО може сприяти синергії механізмів зниження залишкових зварювальних напружень, що базується на ефекті електропластичності, який реалізується в умовах попереднього пружного деформування зварного з'єднання.

3. Встановлено, що застосування ЕДО зварних з'єднань зі сплаву АМг6, що знаходяться в умовах ППР, дозволяє застосовувати на 50 % менші значення навантаження розтягу $\sigma_{\text{ппр}}$ для зниження залишкових зварювальних напружень розтягу, ніж за відсутності ЕДО.

4. Доведено, що ППР зварного з'єднання при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа та сумісне застосування ЕДО і ППР (при аналогічному значенні $\sigma_{\text{ппр}}$) сприяють зниженню залишкових зварювальних напружень у сплаві АМг6 на 20 і 85 % відповідно.

Список літератури

1. Недосека А.Я. (2001) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Киев, Издательство «ИНДПРОМ».
2. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. (1984) *Теория сварочных деформаций и напряжений*. Москва, Машиностроение.
3. Лобанов Л.М., Махненко В.И., Великоиваненко Е.А. и др. (1988) О параметрах предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам. *Автоматическая сварка*, **9**, 1–4.
4. Патон Б.Е., Уткин В.Ф., Лобанов Л.М. и др. (1989) Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **10**, 10–18.
5. Кравцов Т.Г., Рызжков И.Ф., Статников Е.Ш. (1981) Повышение сопротивления усталости наплавленных валов ультразвуковой обработкой. *Автоматическая сварка*, **10**, 35–38.
6. Махненко В.И., Кравцов Т.Г. (1986) Толщина пластически деформированного слоя при ультразвуковой ударной обработке наплавленных изделий. *Автоматическая сварка*, **8**, 98–110.
7. Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids, Ed. by F.R.N. Nabarro, 500–529.
8. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Poklyatsky, A.G. (2010) Effect of electric pulse treatment on residual change in shape of thin-sheet welded structures (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 10–13.
9. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах*

с учетом воздействия электромагнитных полей. Киев, ИПП.

10. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. (2004) Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, **4**, 60–67.
11. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44**, 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
12. Lobanov, L.M., Makhnenko, V.I., Pashchin, N.A., Loginov, V.P. (2007) Features of formation of plastic deformations at electrodynamic treatment of welded joints of St3 steel. *The Paton Welding J.*, **10**, 7–11.
13. Семашко Н.А., Крупский Р.Ф., Купов А.В. и др. (2004) Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов. *Материаловедение*, **7**, 29–33.
14. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. (1987) *Напряжения и деформации при сварке*. Киев, Вища школа. Головное изд-во.

References

1. Nedoseka, A.Ya. (2001) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Kyiv, INDPROM [in Russian].
2. Vinokurov, V.A., Grigoryants, A.G. (1984) *Theory of welding stresses and strains*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, E.A. et al. (1988) About parameters of preliminary out-of-plane bending for spherical shells. *Avtomaticheskaya Svarka*, **9**, 1–4 [in Russian].
4. Paton, B.E., Utkin, V.F., Lobanov, L.M. et al. (1989) Manufacturing of large-sized thin-walled panels from aluminium alloys. *Avtomaticheskaya Svarka*, **10**, 10–18 [in Russian].
5. Kravtsov, T.G., Ryzhkov, I.F., Statnikov, E.Sh. (1981) Increase in fatigue resistance of surfaced shafts by ultrasonic treatment. *Avtomaticheskaya Svarka*, **10**, 35–38 [in Russian].
6. Makhnenko, V.I., Kravtsov, T.G. (1986) Thickness of plastically deformed layer in ultrasonic peening of surfaced products. *Avtomaticheskaya Svarka*, **8**, 98–110 [in Russian].
7. Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids, Ed. by F.R.N. Nabarro, 500–529.
8. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Poklyatsky, A.G. (2010) Effect of electric pulse treatment on residual change in shape of thin-sheet welded structures (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 10–13.
9. Strizhalo, V.A., Novogrudskiy, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account electromagnetic field action*. Kyiv, IPS [in Russian].
10. Stepanov, G.V., Babutskiy, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in a long rod caused by a high-density pulse of electric current. *Problemy Prochnosti*, **4**, 60–67 [in Russian].
11. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44**, 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
12. Lobanov, L.M., Makhnenko, V.I., Pashchin, N.A., Loginov, V.P. (2007) Features of formation of plastic deformations at electrodynamic treatment of welded joints of St3 steel. *The Paton Welding J.*, **10**, 7–11.
13. Semashko, N.A., Krupskiy, R.F., Kupov, A.V. et al. (2004) Acoustic emission at electric pulse deformation of titanium alloys. *Materialovedenie*, **7**, 29–33 [in Russian].
14. Kasatkin, B.S., Prokhorenko, V.M., Chertov, I.M. (1987) *Stresses and strains during welding*. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Russian].

RESIDUAL WELDING STRESSES IN AMG6 ALLOY AFTER ELECTRODYNAMIC TREATMENT UNDER CONDITIONS OF PRELIMINARY ELASTIC TENSION

L.M. Lobanov¹, V.V. Lysak¹, O.L. Mikhoduj¹, O.M. Timoshenko¹, M.O. Pashchyn¹, I.P. Kondratenko², V.V. Chopyk², O.M. Karlov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: svarka2000@ukr.net

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 56 Beresteysky Ave., 03057, Kyiv, Ukraine.

A concept for regulating the residual stress-strain states of welded joints based on the combined use of electrodynamic treatment (EDT) of weld metal that is preloaded with elastic tension (PET) is proposed. It is shown that the use of EDT creates prerequisites for reducing the metal consumption and stiffness of tooling for PET. It is proved that the combined use of PET and EDT methods can contribute to the synergy of mechanisms for reducing residual welding stresses, which is based on the effect of electroplasticity, which is realized under conditions of preliminary elastic deformation of a welded joint. It has been established that the use of EDT of AMg6 alloy welded joints under PET conditions allows applying a 50 % lower load level σ_{PET} to reduce residual tensile welding stresses unlike in the absence of EDT. It has been proven that PET of a welded joint at $\sigma_{PET} = 90$ MPa and the combined use of EDT and PET (at a similar value of σ_{PET}), respectively, contribute to a reduction in residual tensile welding stresses in AMg6 alloy by 20 % and 85 %, respectively. The use of EDT creates the prerequisites for reducing the metal consumption and stiffness of the tooling for PET and will contribute to the development of methods for regulating the residual stress states of welded joints based on their preload. Ref. 14, Table 1, Fig. 4.

Keywords: current pulse, welded structures, residual stresses, welded joint, electroplastic effect, preliminary elastic tension, plastic deformation, aluminium alloy, electrodynamic treatment, stress reduction

Отримано 08.07.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2025

Прийнято 14.01.2026

IX Міжнародна спеціалізована виставка технологій, обладнання та матеріалів для аддитивного виробництва та 3D друку



Addit EXPO 3D



Актуально для 3D стоматології

26-28 травня 2026



Місце проведення:
МВЦ, м. Київ,
Броварський пр-т, 15,
станція метро «Лівобережна»

+38 (095) 268-05-87
helen@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua

