

ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КЕРОВАНОЮ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ДІЙ

Л. М. ЛОБАНОВ¹, М. О. ПАЩИН¹, О. Л. МІХОДУЙ¹,
П. С. ШЛЬОНСЬКИЙ¹, В. В. ЧОПИК², О. М. КАРЛОВ²

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Інститут електродинаміки НАН України, Київ

Щоб використовувати сучасні зварні транспортні конструкції зі сплавів на основі алюмінію, слід розробити перспективні методи подовження їх ресурсу, одним з яких є електродинамічна обробка (ЕДО), яка підвищує їх довговічність, оптимізуючи напружено-деформований стан у зоні передбачуваного втомного руйнування. Мікропроцесорним керуванням у двоканальній ЕДО можна збільшити ефективність оброблення через керовану синхронізацію складників електродинамічних дій порівняно із одноканальною. Під час втомних випробувань дослідних зварних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 за амплітуди циклу $2\sigma_a = 80...160$ МПа обидві ЕДО поліпшують їх довговічність N відповідно у 2,0–2,4 і 2,2–2,7 рази, попри той факт, що двоканальна реалізована за втричі менших енергетичних витрат проти одноканальної. Наслідком унеможливлення проходження імпульсного струму крізь дослідний зразок за двоканальної ЕДО є зниження параметра N у 1,5 рази проти ЕДО із його проходженням, яке пов'язано із відсутністю впливу електроімпульсного складника, що інтенсифікує релаксацію залишкових зварювальних напружень внаслідок електропластичності. Двоканальна ЕДО шва і лінії сплавлення удвічі підвищує значення N порівняно з обробленням лише шва, що пояснюють розповсюдженням зони напружень стиску на лінію сплавлення, яке забезпечує менший розмах циклічних напружень, ніж після ЕДО шва.

Ключові слова: електродинамічна обробка, електродний пристрій, одно- і двоканальна схеми, залишкові зварювальні напруження, алюмінієвий сплав, довговічність, імпульс електричного струму, амплітуда циклу, вихрові струми, електропластичний ефект, пластичні деформації, імпульсне електромагнетне поле.

The use of modern welded transport structures made of aluminum – based alloys requires the development of promising methods for extending their life, one of which is electrodynamic treatment (EDT). EDT helps to increase the durability of welded joints by optimizing the stress-strain state in the area of the expected fatigue failure. The use of microprocessor control in two-channel EDT allows us to increase the processing efficiency due to the controlled synchronization of the components of electrodynamic actions in comparison with a single-channel EDT. During fatigue tests of experimental welded samples of AMg6 aluminum alloy for the amplitude values of the cycle $2\sigma_a = 80...160$ MPa single-channel and two-channel EDT provide an increase in their durability N , respectively, in 2.0...2.4 and 2.2...2.7 times despite the fact that two-channel EDT was realized at three times lower energy costs in comparison with a single-channel one. The consequence of the exclusion of the pulsed current passage through the prototype in the two-channel EDT is a decrease of the parameter in N 1.5 times compared to EDT with the passage of current, which is associated with the exclusion of the electropulse component, which intensifies the relaxation of residual welding stresses due to electroplasticity. The two-channel EDT of the weld and fusion line doubles the value of N compared to the treatment of the weld alone, which is due

to the propagation of the compression stress zone on the fusion line, which provides a smaller range cyclic stresses compared to the resulting EDT weld.

Keywords: *electrodynamic treatment, electrode device, one- and two-channel circuit, residual welding stresses, aluminum alloy, durability, electric current pulse, cycle amplitude, eddy currents, electroplastic effect, plastic deformations, pulsed electromagnetic field.*

Вступ. Уповільнити втомне руйнування зварних з'єднань (ЗЗ) – актуальне завдання для продовження ресурсу нової та експлуатованої техніки [1–2]. Для використання сучасних зварних транспортних конструкцій зі сплавів на основі алюмінію потрібно підвищити їх довговічність. Зокрема, електродинамічною обробкою (ЕДО), яка знижує рівень залишкових зварювальних напружень розтягу, що супроводжується формуванням у зоні оброблення шару металу з подрібненою структурою. Виявлено [3–5], що ЕДО підвищує довговічність ЗЗ, оптимізуючи напружено-деформований стан у зоні передбачуваного втомного руйнування.

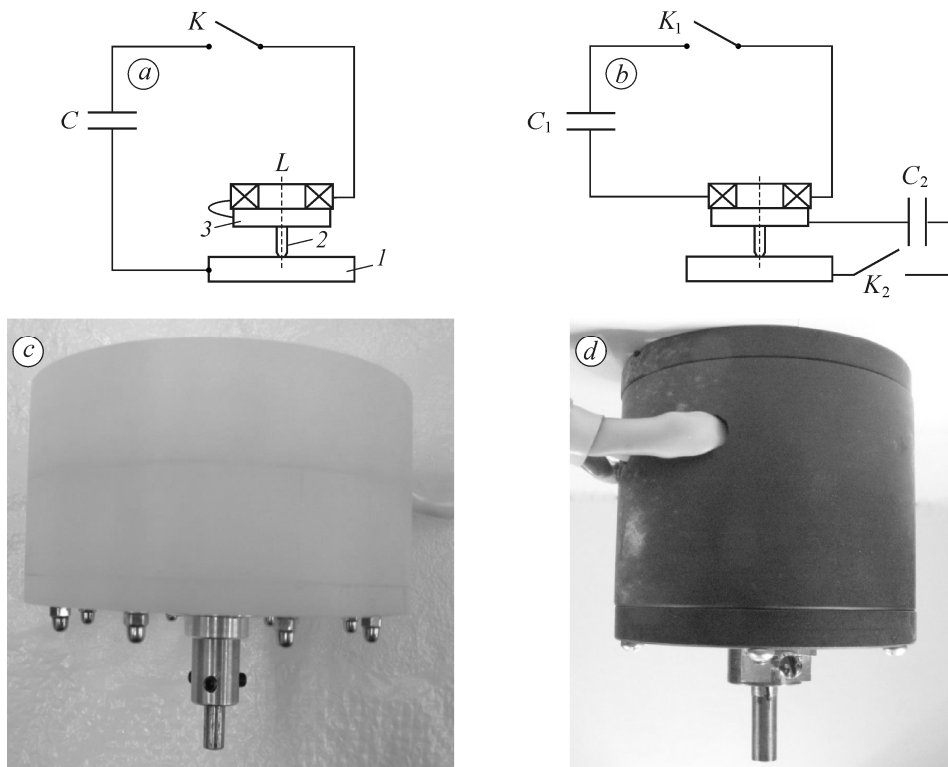


Рис. 1. Схеми пристроїв для електродинамічного оброблення: *a* – одноканальний, де *1* – оброблюваний метал; *2* – електрод; *3* – диск; *L* – індуктор; *C* – конденсатор; *K* – силовий ключ; *b* – двоканальний, де *C*₁ і *K*₁ – відповідно конденсатор і силовий ключ розрядного кола для реалізації сили *P*, а *C*₂ і *K*₂ – для реалізації дії імпульсу електричного струму; *c-d* – зовнішній вигляд одно- і двоканального пристроїв.

Fig. 1. Schemes of devices for electrodynamic treatment (EDT): *a* – single-channel, where *1* – treated metal; *2* – electrode; *3* – disk; *L* – inductor; *C* – capacitor; *K* – power switch; *b* – two-channel, where *C*₁ and *K*₁ – the capacitor and the power key of the discharge circuit to implement the force *P*, respectively; *C*₂ and *K*₂ – to implement the action of the pulse of electric current (PEC), respectively; *c-d* – the external view of a single-channel and the two-channel device.

Сучасні системи електроживлення із мікропроцесорним керуванням і числові методи розрахунку підвищують ефективність ЕДО [6] внаслідок оптимізації перехідних процесів в електричних колах імпульсних систем ЕДО за керованої синхронізації складників електродинамічних дій. Дослідимо вплив такої синхронізації на ефективність ЕДО.

ЕДО здійснюють за допомогою лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу [7, 8], в якому імпульс електричного струму (ІЕС) тривалістю близько двох мілісекунд формується під час перехідного процесу і є наслідком розряду ємнісного накопичувача енергії конденсаторного типу.

На рис. 1а зображено типову схему такого пристрою, де замкнення силового ключа K ініціює розрядний цикл конденсатора C , внаслідок чого ІЕС проходить через плоский індуктор L , диск 3 із неферомагнетного матеріалу та оброблюваний електрод 2 у метал 1 , що електрично навантажує розрядне коло. В індукторі і диску виникають імпульсне електромагнетне поле (ІЕМП) і вихрові струми, які взаємодіючи, призводять до взаємного їх відштовхування. В результаті (за жорсткого закріплення індикатора L) відбувається ударна взаємодія електрода 2 з металом 1 зі силою P , що супроводжується проходженням ІЕС крізь електрод у метал. Сумісна дія ІЕС і сили P ініціює електропластичне деформування металу за механізмом, описаним раніше [9], наслідком якого є релаксація залишкових зварювальних напружень. Такий пристрій (рис. 1с) називають одноканальним. У ньому період дії ІЕС триваліший, ніж імпульсу сили P , а амплітудні їх значення не збігаються в часі (рис. 2с).

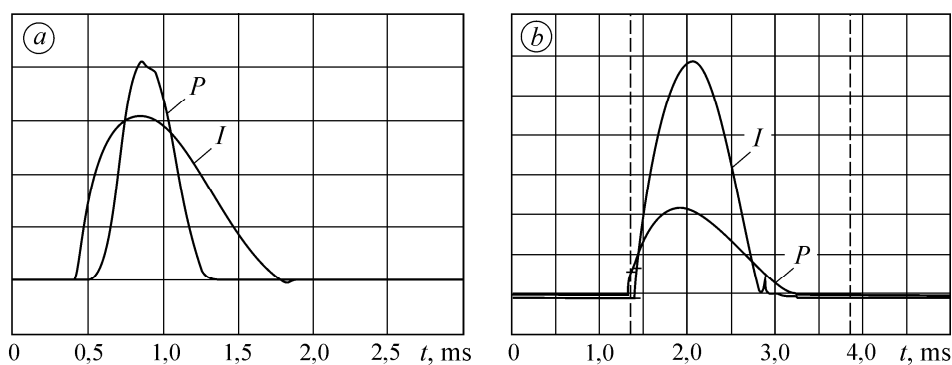


Рис. 2. Осцилограми дії динамічного тиску P та ІЕС (I), який проходить крізь оброблюваний метал за одно- (а) та двоканальної (б) схем пристрою для ЕДО.

Fig. 2. Oscillograms of the action of dynamic pressure P and PEC (I), which passes through the treated metal, in single-channel (a) and two-channel (b) circuits of the device for EDT.

Канали для формування ІЕС і сили P у двоканальному пристрої відокремлені (рис. 1b і d). Замкнення силових ключів $K1$ і $K2$ спричиняють розрядні цикли конденсаторів $C1$ і $C2$, які ініціюють незалежні дії ІЕС і P . Тут періоди дії ІЕС і P можна задавати апаратно, тобто керовано синхронізувати силові і струмові імпульсного впливу.

Дія силового імпульсу P може бути тривалішою, ніж ІЕС, що передається через електрод I , і зсунутою в часі до силового імпульсу P (рис. 2b). Апаратну реалізацію двоканального пристрою описано в праці [6]. Він підвищує надійність електричного контакту електрода з поверхнею металу, оскільки період дії ІЕС закінчується раніше, ніж дії P , що позитивно впливає на довговічність зразків ЗЗ після ЕДО.

Ефективність керованої синхронізації впливів сили P і ІЕС досліджували, порівнюючи довговічність зразків ЗЗ після ЕДО зі застосуванням одно- і двоканальної схем електродного пристрою. Передумови використання двоканальної схеми для підвищення опору руйнуванню зразків ЗЗ і описані раніше [8].

Методика експериментів. Вплив ЕДО на довговічність досліджували на зразках стикових ЗЗ із алюмінієвого сплаву АМг6 завтовшки $\delta = 2$ mm (рис. 3), виконаних автоматичним дуговим зварюванням неплавким електродом за напруги дуги $U_w = 20$ V, струму зварювання $I_w = 170$ A і швидкості $V_w = 5,5$ mm/s. Такий

режим забезпечував повне проплавлення і задовільне формування шва завширшки 8 mm. Ширина зони термічного впливу, згідно з результатами вимірювання твердості за Вікерсом, становила 14 mm.

Методом електронної спекл-інтерферометрії [10, 11] до і після ЕДО визначали розподіл поздовжньої (вздовж лінії шва) компоненти σ_y залишкових зварювальних напружень у перетині А-А зразка.

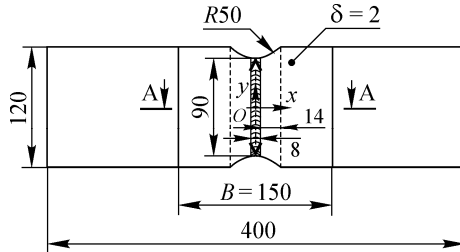


Рис. 3. Схема зразка 33 зі сплаву АМг6 для втомних випробувань. Стрілка вказує напрямок ЕДО; x і y – осі координат, вздовж яких визначали компоненти напружень; А-А – переріз, в якому знаходили напруження σ_y ; B – розмір робочої частини, mm зразка.

Fig. 3. A scheme of sample of AMr6 alloy welded joints (WJ) for fatigue tests. The arrow indicates the direction of EDT; x and y – coordinate axis, along which the stress components were determined; А-А – cross-section in which stresses σ_y , were determined; B – the size of the working part of the sample, mm.

Враховуючи, що коефіцієнт корисної дії конденсаторних систем складає до 99% [12], енергію одиничного електродинамічного впливу E_{EDT} вважали рівною запасній енергії E_w одиничного заряду конденсатора. ЕДО виконували два типи електродних пристроїв (див. рис. 1) за близьких значень E_w , щоб порівняти їх ефективність. Значення

$$E_w = CU^2 / 2, \quad (1)$$

де C і U – відповідно ємність і зарядна напруга конденсатора. Значення одиничного заряду E_w^{1k} для одноканальної схеми пристрою (рис. 1a) визначали за виразом

$$E_w^{1k} = C(U_{I+P})^2 / 2, \quad (2)$$

а E_w^{2k} для двоканальної (рис. 1b) – за формулою

$$\sum E_w^{2k} = C_2(U_I)^2 / 2 + C_1(U_P)^2 / 2. \quad (3)$$

Параметри режимів ЕДО задавали, керуючись технічними характеристиками джерел живлення двох типів електродних пристроїв, для яких з допомогою п'єзоелектричного давача ЛХ-604 визначали тиск P [13].

Для одноканальної схеми режим ЕДО одиничного ІЕС задавали значеннями $U_{I+P} = 500$ V і $C = 5140$ μ F, а величини E_w^{1k} і P становили відповідно 642 J і 20 kN. Для двоканальної $U_P = 200$ V, $C_1 = 2570$ μ F і $U_I = 370$ V, $C_2 = 2570$ μ F, а $\sum E_w^{2k}$ і P становили відповідно 227 J і 1,6 kN. При цьому значення електроімпульсної (ІЕС) E_{Iw}^{2k} і механічної E_{Pw}^{2k} (тиску P) енергій складників E_w^{2k} становили відповідно 176 і 51 J.

За співвідношенням $E_w^{1k} / \sum E_w^{2k}$ для двох схем електродних пристроїв встановили, що загальні енергетичні витрати під час застосування двоканального пристрою втричі менші, ніж за одноканального. Значення тиску P під час ЕДО двоканальним пристроєм на порядок менші, ніж під час одноканальними.

Перед ЕДО зварні пластини жорстко закріплювали на складальній плиті, унеможливаючи їх кутові переміщення. Для реалізації ЕДО одно- або двоканальні електродні пристрої встановлювали на поверхню зварного шва і забезпе-

чували їх гарантований електричний контакт з поверхнею металу під час замикавання розрядного контуру. Вмиканням силового ключа ініціювали розрядний цикл конденсатора, наслідком якого була дія складників ЕДО на метал зразка. Під час ЕДО серією ІЕС електродний пристрій пересували по зовнішній і зворотній поверхнях зразків уздовж лінії шва в напрямку “від центру – до крайків” (рис. 3) з проміжком 3...5 mm між зонами контакту, забезпечуючи так рівномірне електропластичне деформування оброблювальної ділянки зварного шва.

На машині УПМ-02 виконували втомні випробування на симетричний вигин зразків у вихідному стані та після ЕДО. Частота випробувань 14 Hz, а амплітуда напружень циклу $2\sigma_a = 80...160$ МПа, тобто від 0,5 до $\sigma_{0,2}$ для сплаву АМгб. Циклічно навантажували до реєстрації кількості циклів N , що відповідають початку руйнування зразків [14]. Вивчили вплив різних варіантів одно- та двоканальної схем ЕДО на довговічність N зварних зразків.

Обговорення результатів досліджень. Побудували діаграми (рис. 4) розподілів пікових значень напружень σ_y у центрі шва та вздовж лінії сплавлення (в зонах вірогідного руйнування) до і після ЕДО зовнішньої і зворотної поверхонь шва із застосуванням одно- та двоканальної схем електродного пристрою (рис. 4). Встановили, що до ЕДО в центрі шва (рис. 4a) і на лінії сплавлення (рис. 4b) напруження розтягу σ_y близькі до границі плинності $\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб (стовпчики 1). Після одноканальної ЕДО на ділянках шва вони трансформувались у напруження стиску, значення яких досягали -8...-10 МПа (стовпчики 2). Після двоканального оброблення досягали в шві і на лінії сплавлення, відповідно, 10 і 50 МПа (стовпчики 3).



Fig. 4. The value of residual welding stresses σ_y of AMg6 alloy samples along the line A–A (see Fig. 3) in the initial state (1) and after EDT by single- and two-channel schemes 2 and 3; a – the center of the weld; b – fusion line.

Встановили, що одноканальна ЕДО сприяє більшій релаксації залишкових зварювальних напружень зразків проти двоканальної, що особливо помітно під час оцінки значень σ_y уздовж лінії сплавлення (стовпчики 2 і 3 на рис. 4b). Це пояснюють більшою запасеною енергією E_w^{1k} за однократної електродинамічної дії порівняно із $\sum E_w^{2k}$. Результати випробувань на втому зразків у вихідному стані та після оброблення (рис. 5) свідчать, що попри оптимальніший напружений стан, одноканальна ЕДО менш ефективна, ніж двоканальна, зразки руйнувалися уздовж лінії сплавлення. За значень $2\sigma_a$ відповідно 80; 120 і 160 МПа одноканальна (рис. 5, крива 2) забезпечує підвищення значень N відповідно у 2,0; 2,7 і 2,4 рази. Двоканальна (рис. 5, крива 3) за значень, відповідно, 80 і 160 МПа ефективніша проти одноканальної, тому що забезпечує зростання параметра N відповідно у 2,2 і 2,7 рази. Двоканальну ЕДО реалізовували за втричі менших енергетичних витрат порівняно з одноканальною, наслідком чого є слабший вплив двоканальної ЕДО на залишкові зварювальні напруження (рис. 4).

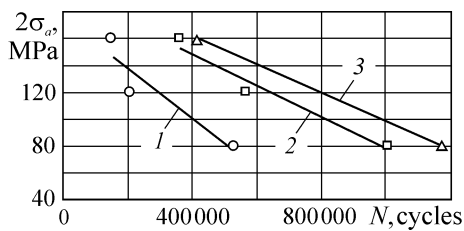


Рис. 5. Криві втоми зразків 33 зі сплаву АМг6 (див. рис. 3) у вихідному стані (крива 1), а також після ЕДО одно- (крива 2) та двоканальним (крива 3) пристроями.

Fig. 5. Fatigue curves of WJ AMg6 alloy samples (see Fig. 3) in the initial state (curve 1), after EDT with a single-channel (curve 2) and with a two-channel (curve 3) circuits.

Ефективність двоканальної ЕДО обумовлена сприятливішою контактною взаємодією внаслідок часової синхронізації складників електродинамічної дії (див. таблицю).

Довговічність N зразків 33 сплаву АМг6 після двоканальної ЕДО

№ зразка	Варіант виконання	$2\sigma_a$, МПа	N , cycle
1	Електродинамічний вплив тільки сили P (ІЕС P)	80	752400
2	ІЕС $I + ІЕС P$ (шов + лінія сплавлення)	160	718000

Виконували ЕДО зразка за вимкнення розрядного кола $C2K2$, що унеможливило проходження ІЕС крізь оброблюваний метал, внаслідок чого довговічність N знизилась у 1,5 рази порівняно із ЕДО із проходженням струму (рис. 5, крива 3). Це можна пояснити відсутністю дії електроімпульсного складника, який інтенсифікує релаксацію залишкових зварювальних напружень, та механізму електропластичності.

Додаткова ЕДО лінії сплавлення практично удвічі підвищує значення N порівняно з обробленням тільки шва. Це можна пояснити вірогідним розповсюдженням зони напружень стиску на лінію сплавлення у поперечному перерізі зразка. Таким чином, у цьому випадку результуючі напруження, які є наслідком суперпозиції напружень $2\sigma_a$ і σ_y , мають менший розмах, ніж після ЕДО тільки шва, що і сприяє зростанню параметр N . Під час використання двоканальної схеми це можна пояснити перевагами синхронізації складників електродинамічного впливу. Порівняння вихідного значення N з отриманими після одно- та двоканальної ЕДО, свідчить про ефективність останньої для підвищення втомної міцності зразків.

Порівнюючи вплив двоканальної ЕДО на довговічність за варіантів, що реалізують вплив ІЕС P та ІЕС $I + ІЕС P$ (див. таблицю і рис. 5), встановили, що струм збільшує значення N . Через зростання внеску струмового складника в електродинамічний вплив за схемою ІЕС $I + ІЕС P$ інтенсифікує прояв електропластичного ефекту [4]. Встановили ефективність ЕДО зразків 33 сплаву АМг6 для підвищення опору руйнуванню під циклічними навантаженнями в умовах симетричного вигину.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що зростання довговічності 33 сплаву АМг6 за використання двоканальної схеми ЕДО визначає синхронізація електроімпульсного і силового складників електродинамічного впливу. Двоканальна ЕДО шва і лінії сплавлення удвічі підвищує значення N порівняно з обробленням лише шва, що пов'язано із розповсюдженням зони напружень стиску на лінію сплавлення, яке забезпечує менший розмах циклічних напружень порівняно із отриманими після ЕДО шва. Наслідком унеможливлення проходження імпульсного струму крізь дослідний зразок за двоканальної ЕДО є зниження довговічності N у 1,5 рази, порівняно із ЕДО із його проходженням. Це пов'язано із відсутністю впливу електроімпульсного

складника, що інтенсифікує релаксацію залишкових зварювальних напружень внаслідок механізму електропластичності. За значень амплітуди циклу $2\sigma_a = 80...160$ МПа одно- і двоканальна ЕДО дослідних ЗЗ підвищують довговічність відповідно у 2,0–2,4 і 2,2–2,7 рази, попри те, що двоканальну реалізовували за втричі менших енергетичних витрат, ніж одноканальну.

Робота виконана в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та в ІЕД НАН України.

1. *Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminum alloys using high-frequency peening* / V. V. Knysh, I. N. Klochkov, M. P. Pashulya, and S. I. Motrunich // *The Paton Weld. J.* – 2014. – 5. – P. 21–27 <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.05.04>
2. *Influence of the accelerated corrosion exposure on the fatigue behaviour of welded joints treated by high frequency mechanical impact* / V. Knysh, S. Solovei, S. Motrunich, L. Nyrkova, and H. C. Yildirim // *Int. J. of Fatig.* – 2021. – 149. – Article number: 106272. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106272.
3. *Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures* / L. Lobanov, I. Kondratenko, A. Zhiltsov, N. Pashchin, and O. Mikhodui // *Materials Performance and Characterization.* – 2018. – 7, № 4. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>.
4. *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, and Yu. M. Sidorenko // *Strength of Mat.* – 2018. – 50, № 2. – P. 246–253. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9965-x>.
5. *Effect of the electrodynamic treatment on the life of AMg6 aluminum alloy weld joints* / L. M. Lobanov, N. A. Pashchin, A. N. Timoshenko, P. V. Goncharov, O. L. Mikhodui, and Yu. M. Sidorenko // *Strength of Mat.* – 2017. – 49, № 2. – P. 234–238. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
6. *Electrotechnical complex for electrodynamic processing of welded joints* / L. M. Lobanov, I. P. Kondratenko, V. M. Mikhalskyi, M. J. Pashchin, O. M. Karlov, V. V. Chopyk, and O. L. Mykhodui // *Technical Electrodynamics.* – 2020. – № 6. – P. 1–3. DOI: 10.15407/techned2020.06.061.
7. *Increase in the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy* / L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. M. Tymoshenko, P. V. Goncharov, O. L. Mikhodui, and K.V. Shiyan // *The Paton Weld. J.* – 2020. – № 4. – P. 2–8. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.01>
8. *Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds* / I. P. Kondratenko, A. V. Zhyltsov, N. A. Pashchyn, and V. V. Vasyuk // *Technical Electrodynamics.* – 2017. – № 5. – P. 83–88. (Ukr) <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083>
9. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – К.: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 502 с.
10. *Redistribution of residual welding stress in pulsed electromagnetic treatment* / G. V. Stepanov, A. I. Babutskii, I. A. Mameev, M. O. Pashchyn, V. V. Savitskii, and G. I. Tkachuk // *Strength of Mat.* – 2011. – 43, № 3. – P. 326–331. DOI:10.1007/s11223-011-9300-2
11. *Investigation of residual stresses in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment* / L. M. Lobanov, N. A. Pashchin, O. L. Mikhodui, and J. A. Khokhova // *J. of Magnesium and Alloys.* – 2016. – № 4. – P. 77–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2016.04.005>
12. *Гуля Н. В.* Накопители энергии. – М.: Наука, 1980. – 150 с.
13. *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, and Yu. M. Sydoenko // *Strength of Mat.* – 2017. – 49, № 3. – P. 369–380. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9877-1>
14. *Yakovleva T. Yu.* Local Plastic Deformation and Fatigue of Metals. – К.: Наук. думка, 2003. – 236 с.

Одержано 23.07.2021