

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ І ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ (Огляд)

Л.М. Лобанов¹, Л.І. Ниркова¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, О.М. Тимошенко¹, Н.Л. Тодорович¹, О.М. Сизоненко³, 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, просп. Берестейський, 56. E-mail: dep7ied@ukr.net

³Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. 54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43а.

E-mail: dioo@iippt.com.ua

Проведено аналіз перспективних технологій покращення механічних характеристик і напруженого стану металевих сплавів і зварних з'єднань, які базуються на застосуванні електромагнітних полів та їх похідних, таких як електродинамічна сила тиску, вихрові струми та ударні хвилі. Розглянуто процес електрогідроімпульсного оброблення високовольним електричним розрядом із використанням вуглеводневої рідини для виробництва полідисперсних сумішей, що застосовуються для легування металу шва зварних з'єднань у складі порошкових дротів. Зазначено позитивний вплив отриманих таким обробленням мікродобавок модифікатора системи Ti–TiC на експлуатаційні властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС. Показано, що оброблення імпульсним електромагнітним полем сприяє покращенню залишкових напружених станів зварних з'єднань. Розглянуто нові технологічні схеми застосування електродинамічного оброблення зварних з'єднань. Доведено переваги цих двох обробок металу шва в процесі зварювання у порівнянні з обробками за кімнатної температури. Досліджено механізм поверхневого зміцнення сталі 25XГНМТ внаслідок її оброблення імпульсним бар'єрним розрядом. Доведено, що він сприяє підвищенню щільності дислокацій та диспергуванню мікроструктури, тобто позитивно впливає на механічні характеристики сталі. Розглянуто перспективи його застосування для неруйнівного контролю залишкових напружених станів зварних з'єднань. Бібліогр. 46, рис. 6.

Ключові слова: зварне з'єднання, оброблення електромагнітним полем, електродинамічне оброблення, залишкові напруження, зварювання плавленням, поверхнєве зміцнення, карбід титану, полідисперсні суміші, залишкові деформації, алюмінієві сплави, конструкційні сталі, щільність дислокацій

Вступ. Розвиток високотехнологічних галузей машинобудування стимулює розробку нових технологій продовження експлуатаційного ресурсу зварних конструкцій на базі використання прогресивних електрофізичних явищ, до яких відносяться електромагнітні поля, електричні струми різної конфігурації та електродинамічні сили. Результати досліджень дають підставу вважати, що на засадах керування механічними властивостями металевих сплавів і зварних з'єднань із застосуванням електрофізичних явищ можуть базуватися нові технології оброблення зварних конструкцій [1, 2].

Метою роботи є аналіз перспективних технологій покращення механічних характеристик і напруженого стану металевих сплавів і зварних з'єднань, які базуються на застосуванні електромагнітних полів та їх похідних (електродинамічна сила тиску, вихрові струми, ударні хвилі тощо).

Високовольтний імпульсний розряд у рідині, що проводить струм, використовується в промис-

ловій технології електрогідроімпульсного оброблення як джерело динамічного тиску, під дією якого матеріали, що обробляються, можуть змінювати розміри, структуру та механічні характеристики. Таке оброблення є впливом на об'єкт динамічного навантаження, яке ініціюється високовольним електричним розрядом імпульсного електричного струму у водному середовищі. Це – циклічний процес, який характеризується виділенням енергії в каналі розряду впродовж мікросекунд та супроводжується дією хвиль стиснення (які за певних умов трансформуються в ударні), потужних гідропотоків, кавітації, електромагнітних і термічних полів. Дослідження впливу зазначеного оброблення на напружено-деформований стан зварних з'єднань показали, що воно зменшує напруження розтягу в зварних конструкціях до 90 % [3]. Але технології такого оброблення високовольним електричним розрядом не знайшли широкого застосування у металообробленні, що

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Тодорович Н.Л. – <http://orcid.org/0000-0002-3872-5790>, Сизоненко О.М. – <http://orcid.org/0000-0002-8449-2481>, 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, Л.І. Ниркова, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, Н.Л. Тодорович, О.М. Сизоненко, І.П. Кондратенко, В.В. Чопик, О.М. Карлов, 2025

пов'язано з низькою продуктивністю процесу та значною метало- і енергоємністю обладнання.

Перспективним є застосування електрогідроімпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом із використанням вуглеводневої рідини (замість води) для виробництва полідисперсних сумішей, що містять наночастинки з особливими властивостями, які застосовуються для легування металу шва зварних з'єднань. Такий варіант оброблення дозволяє здійснювати енергоєфективний спосіб подрібнення металевих сплавів – розрядноімпульсну підготовку порошків шляхом використання у дисперсній системі «рідина–порошок» високовольтного електричного розряду. Його циклічна дія створює можливість тонкого подрібнення хвилями тиску внаслідок формування великої кількості дефектів у порошок, що сприяє зниженню енергії руйнування кристалів, утворенню великої кількості активних центрів і полегшує хімічну взаємодію між елементами системи в умовах динамічного навантаження. Використання вуглеводневої рідини в якості робочого середовища в умовах такого оброблення сумішей порошків дозволяє не тільки виключити їх окислення, але й створити термодинамічні умови для піролізу газу з утворенням твердофазного вуглецю, який здатен вступати в реакції карбідизації з частинками порошків, утворюючи наноструктурні зміцнюючі фази [4, 5].

Для електрогідроімпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом [4, 5] використовують спеціалізоване обладнання, до складу якого, окрім джерела живлення, входить камера – ємність, де відбувається процес подрібнення порошків і яка має витримувати значні динамічні та термічні навантаження (рис. 1).

Для дослідження ефективності застосування полідисперсних сумішей, отриманих зазначеним обробленням, виконували легування металу зварного шва сплавами на основі Al та Ni, у розплави яких вводили порошки.

Введення 0,01 мас. % модифікатора Ti–TiC, синтезованого цим обробленням порошку Ti у газі та брикетованого за допомогою іскрового плазмового спікання, дозволило зменшити розмір зерна з 1...2 до 0,2...0,6 мкм в усіх модифікованих зразках жароміцного сплаву CM88Y на основі Ni [6]. За таких умов границя міцності на розрив при температурі 900 °C та довготривала міцність зросли на 20 %. Це свідчить про перспективність використання металевих порошків після оброблення високовольтним електричним розрядом для модифікації литої структури зварних швів конструкцій із нікелевих сплавів, які працюють в умовах підви-

щених температур, а також про вплив модифікатора системи Ti–Al–C після відповідного синтезу на подрібнення структури та покращення властивостей зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АК7_{пч} (А357) для корпусних деталей судових двигунів [7].

Полідисперсні суміші, отримані із застосуванням високовольтного електричного розряду, застосовуються в складі шихти порошкових дротів для дугового наплавлення. Це спрощує процес введення порошку в зварювальну ванну в фазі переносу рідкого металу присадки. Визначено позитивний вплив мікродобавок модифікатора системи Ti–TiC на експлуатаційні властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС. Модифікуючи порошки системи Ti–TiC отримували шляхом зазначеного оброблення в газі порошок Ti. Модифікування наплавленого металу карбідами Ti в кількості $\approx 0,01$ % не погіршує якості формування наплавлених валиків і відшарування шлакової кірки. Введення мікродобавок карбідів Ti у кількості 0,01 % до наплавленого металу призводить до збільшення його жаро- та зносостійкості в умовах підвищених температур на 15...50 % залежно від типу використаної модифікуючої добавки [8]. Проведено порівняння впливу модифікуючих добавок бору та карбідів титану, введених в однаковій кількості в шихту порошкового електродного дроту ПП-Нп-25X5ФМС, на структуру та властивості наплавленого металу. Показано, що введення добавок обох типів модифікаторів у кількості 0,01 % суттєво впливає на структуру наплавленого металу, а їх вплив на структуру – різний. Встановлено, що модифікування бором призводить до суттєвого зменшення розмірів кристалітів, перерозподілу неметалевих включень і підвищення мікротвердості металу. Введення мікродобавок

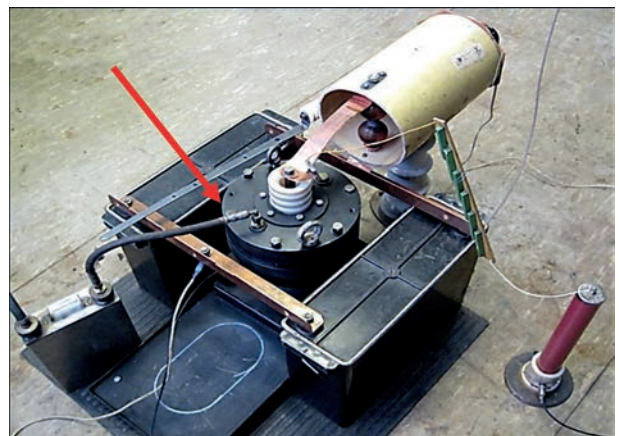


Рис. 1. Зовнішній вигляд обладнання для електрогідроімпульсного оброблення високовольтним електричним розрядом, де стрілкою вказано камеру, в якій відбувається подрібнення порошків [6]

карбідів титану в зварювальну ванну впливає на кінетику протікання кристалізації металу, завдяки чому відбувається усунення стовпчастої структури кристалітів і перетворення її на коміркову. Показано, що завдяки зазначеним змінам структури підвищуються зносостійкість і термостійкість металу, наплавленого із застосуванням обох типів модифікаторів [9].

Отримані результати сприяють покращенню характеристик матеріалів для наплавлення деталей спеціальної техніки, яка працює в умовах абразивного зношування та циклічних термомеханічних навантажень. Таким чином, застосування полідисперсних сумішей, отриманих високовольтним електричним розрядом у вуглеводневій рідині, створює новий напрямок оптимізації механічних властивостей наплавлених елементів конструкцій.

На базі результатів досліджень у галузі матеріалознавства встановлене явище підвищення пластичності металу за рахунок його активного навантаження в момент проходження (по металу) імпульсу електричного струму високої щільності j ($j \geq 1$ кА/мм²). Явище названо електропластичним ефектом, а ініційована ним деформація – електропластичною [10]. Практичне використання цього ефекту відкрило нові можливості для технологій металооброблення та зварювання [11–13]. Супутній нагрів одночасно з обробленням імпульсним електричним струмом ($j \geq 1$ кА/мм²) зразків конструкційної сталі, які попередньо були піддані одночасному пружному розтягу, призводить до релаксації напружень розтягу [12]. Проте в умовах нагрівання без застосування такого струму напруження розтягу в зразку після охолодження до кімнатної температури поверталися до початкового рівня. Ефект від дії імпульсів зменшувався зі зростанням їх кількості. З позицій електронно-дислокаційної взаємодії це пояснюється тим, що при одиничному імпульсі струму він діє на матеріал зі значним дислокаційним потенціалом. В умовах багаторазового впливу імпульсів електричного струму попередні імпульси виводять із релаксаційних процесів частину дислокацій, і електропластична деформація як результат електропластичного ефекту – знижується [13].

Зміна полярності імпульсів струму також впливає на прояв зазначеного ефекту, а за однакової їх амплітуди (при дослідженні навантаженого зразка) біполярні імпульси викликають меншу релаксацію (стрибок) напружень, ніж монополярні [14], оскільки імпульси електричного струму різної полярності, ініціюючи рух дислокацій у протилежних напрямках, протидіють один одному й резуль-

туюча їх дії менша, ніж в умовах монополярних імпульсів електричного струму. Їх вплив на метал відбувається в області пластичної деформації, що супроводжується скиданням деформуючого зусилля, а в області пружної деформації електропластичний ефект не спостерігається. У [15] розглянуто механізм, за якого релаксація напружень можлива в пружній області навантажень і обумовлена дією імпульсів струму. У [16] було розроблено методику визначення частини енергії імпульсів струму ІЕС, яка витрачається на роботу електропластичної деформації.

На основі результатів досліджень електромагнітної дії імпульсного струму на механічні характеристики металів і сплавів розроблено технологічні процеси металооброблення. Зміна тривалості й енергії такого струму та імпульсного електромагнітного поля призводить до активації спектру дислокаційних, фазових та інших фізичних процесів, тобто з'являється можливість керувати механічними характеристиками металів і сплавів. Обидві електромагнітні дії, що реалізовані в різних технологіях металооброблення, викликають структурні зміни в металах і сплавах [17–19], які впливають на їх механічні характеристики. Зазначається підвищення зносостійкості інструменту [20], корозійної стійкості [21–23], зниження концентрації напружень [24], ліквідація тріщин втоми, продовження ресурсу деталей із легких і спеціальних сплавів [25]. Встановлено, що за оптимальних значень параметрів імпульсного електричного струму підвищується часовий опір відриву матеріалу, границя витривалості та довговічності без зниження пластичних властивостей матеріалу [26].

Аналізуючи вищенаведене, слід зазначити, що дії імпульсного електричного струму та імпульсного електромагнітного поля можуть застосовуватись для покращення механічних характеристик і продовження ресурсу зварних з'єднань, на які також поширюються результати [17–26], отримані для металів і сплавів.

Дослідження особливостей релаксації напружень у металах і сплавах, спричинених обробленням імпульсами електричного струму та імпульсним електромагнітним полем, є перспективним напрямком інженерної практики керування залишковими напруженими станами зварних конструкцій. Досліджували вплив імпульсного поля на зниження залишкових напружень стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6. Використовували систему із двох плоских індукторів, жорстко закріплених на одній вертикальній осі на зовнішній і зворотній поверхнях зварного

шва. Зварне з'єднання, що обробляється, система індукторів і генератор імпульсного поля (ємнісний накопичувач енергії) входять до складу розрядного контура [27]. Проведені дослідження показали можливість зниження зварювальних напружень до 30 % за умов впливу імпульсного електромагнітного поля. Незначна ефективність даної схеми оброблення пов'язана з нераціональним розташуванням індукторів, за якого вектори сили електромагнітного тиску (які ініційовано дією цього поля) на метал шва з обох боків пластини діють у напрямку назустріч один одному. Це призводить до взаємної анігіляції тиску на метал шва, а релаксація напружень відбувається виключно за рахунок електропластичної деформації за умови $j \geq 1$ кА/мм², яку дотримано у [27]. Рациональнішу схему з одним плоским індуктором і екраном із ферромагнітного матеріалу (диск зі сплаву АМг6), що розташовані на одній осі відповідно з обох боків зразка зі стиковим швом, описано в [28]. Екранування металу шва в процесі оброблення імпульсним електромагнітним полем забезпечує (за рахунок зростання скін-шару в металі зразка за певної частоти імпульсного струму) збільшення об'єму середовища, яке проводить струм. Оскільки сила тиску прямо залежить від об'єму середовища, то його збільшення (із застосуванням екрану) сприяє трикратному зростанню сили (у порівнянні з обробленням імпульсним електромагнітним полем без екрану) за сталих значень параметрів режиму оброблення. Це забезпечує зниження залишкових зварювальних напружень розтягу до 90 % при восьмикратному зменшенні переміщень точок поверхні зразка після оброблення.

Вплив імпульсного електромагнітного поля на рівень залишкових напружень у зварних і наплавлених зразках із низьковуглецевих сталей, що базується на інтенсифікації динамічного ефекту магнітострикції [29], забезпечив зниження напружень до 40 %.

Результати досліджень впливу цього поля на зміну залишкових зварювальних напружень показані в [30]: залишкові напруження розтягу в зразках зварних з'єднань зі сталі Ст2пс знижуються на 3...25 %, і відбувається рівномірніший розподіл α -фази за об'ємом обробленого металу.

Порівняння ефективності дії оброблення імпульсним електромагнітним полем на залишкові напруження у зварних з'єднаннях із феро- і ферромагнітних матеріалів показало, що його дія на перші менш впливова. Отримані результати можна пояснити тим, що в умовах оброблення імпульсним електромагнітним полем ферромагнітних ма-

теріалів електромагнітна сила тиску витрачається не тільки на релаксацію напружень, а й на магнітопружну взаємодію міждоменних границь (стінок Блоха) з дислокаціями [13, 31]. За такого оброблення зварних з'єднань із ферромагнітних матеріалів доменна структура відсутня, електромагнітна сила тиску витрачається виключно на релаксацію напружень.

Спільне використання електроімпульсних і механічних впливів для оброблення зварних конструкцій з метою продовження їх ресурсу слугує базою для створення такого методу оброблення зварних з'єднань як електродинамічне [32]. Воно базується на ініціюванні електродинамічних сил, що виникають при проходженні в матеріалі імпульсного електричного струму за умови $j \geq 1$ кА/мм². За електродинамічного оброблення зварне з'єднання піддається об'ємному електродинамічному впливу, який характеризується спільним протіканням електроімпульсного і динамічного процесів, їх синергія в зоні оброблення ініціює релаксацію зварювальних напружень (згідно з механізмом електропластичної деформації) та диспергування структури металу.

Метод електродинамічного оброблення знайшов широке визнання в інженерній практиці для усунення місцевих зварювальних деформацій типу «бухтина» [33]. Досліджували вплив схем оброблення зовнішньої поверхні бухтин, таких як «точкова», «концентричних кіл», «спіральна». Доведено, що найменш ефективною є «точкова», а найбільш ефективною – «концентричних кіл» або «спіральна», які дозволяють повністю усувати даний дефект. Порівняльний аналіз показав, що енергетичні витрати на усунення бухтин таким методом суттєво нижчі, ніж за термічного правлення.

Розвиток зазначеного вище методу для корегування місцевих деформацій типу «бухтина» при застосуванні схеми «концентричних кіл» розглянуто також у [34]. Обладнання для його реалізації має електромеханічний електродний пристрій та джерело живлення імпульсним електричним струмом. Пристрій для електродинамічного оброблення виконаний у вигляді принаймні однієї пари ідентичних механізмів, кожен з яких містить електромеханічний електрод-індентор (рис. 2). Пристрої жорстко пов'язані між собою через притискний механізм фіксації інденторів, кожен з яких обладнаний ультразвуковим вібратором, що з'єднаний зі спільним джерелом живлення.

Удосконалений метод електродинамічного оброблення може бути застосований, наприклад, для технологічного забезпечення поточного ви-

робництва полотниць обшивки зварних конструкцій корпусів суден. У процесі правлення оброблення виконують синхронно принаймні на одній парі ділянок поверхні бухтини, а також – сумісно з ультразвуковим випромінюванням, що сконцентроване в обох зонах оброблення. Схему елементів показано на рис. 2, де наведено конструкцію електромеханічної частини пристрою з орієнтацією на усунення місцевих деформацій типу «бухтина» тонкостінних елементів зварних конструкцій. Поєднання електродинамічних і механічних (ультра звукових) впливів дозволяє досягнути максимальної ефективності процесу електродинамічного оброблення зварних з'єднань.

Враховуючи результати [14], де показано, що супутній підігрів стимулює релаксацію напружень за електроімпульсного оброблення тонких стрижнів зі сталі, перспективними є дослідження ефективності електродинамічного оброблення остигаючого зварного шва, яке виконують впродовж термодформаційного зварювального циклу.

На засадах [12–16] розроблено гібридну технологію «автоматичне зварювання + електродинамічне оброблення», яка дозволяє знизити енергоємність процесу оброблення, зменшити робочий час виготовлення металевої конструкції і одночасно підвищити її якість [35]. Спосіб модернізації процесу електродинамічного оброблення металу зварного з'єднання відрізняється тим, що шов з боку кореня оснащують ковзним рухомих контактом зворотної клеми розрядного кола від джерела живлення імпульсного електричного струму. У процесі виконання зварного з'єднання переміщення рухомого контакту є співвісним із розташуванням контактної зони електрода-індентора. Пристрій для здійснення модернізованого способу має

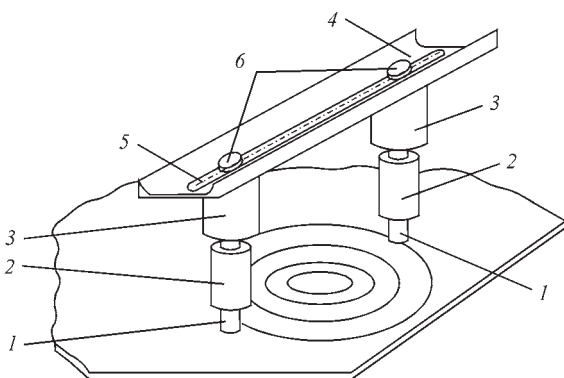


Рис. 2. Конструкція пристрою для усунення місцевих деформацій типу «бухтина» площинних елементів зварних конструкцій (гілки розрядного контура не вказано): 1 – рухомий електрод-індентор для електродинамічного оброблення; 2 – ультразвуковий збуджувач механічних коливань (магнітострикційного або п'єзоелектричного типу); 3 – електромагнітний привод; 4 – траверса взаємного позиціонування електродів; 5 – лінійний паз; 6 – гвинтовий притискач [34]

блок електродинамічного оброблення з електромеханічним електродом-індентором і джерелом живлення імпульсного електричного струму (рис. 3). Розрядне коло для реалізації цього оброблення сумісно з процесом зварювання пальником 8 послідовно включає в себе рухомий індентор 2 і деталь 14, яка зварюється швом 1 з віддаленим розташуванням зворотної контактної клеми 9. Електромагнітна частина індентора 4 і його рухомий ударний механізм під'єднані до автономних джерел живлення імпульсного струму 5 і 6 відповідно, який вмикається на електроді синхронно з сигналами від рухомого ударного механізму. Пристрій містить стіл 15 з вибіркою матеріалу в зоні розміщення зварного шва 1 та закріпленою нижче поверхні стола вздовж лінії шва опорною траверсою з підпружиненим контактом повздовжнього повзуна 11, що має електричне з'єднання зі зворотною клемою джерела імпульсного живлення відповідного електричного струму ударного механізму індентора (клеми I–II). Зазначений механізм і пружний контакт повзуна мають жорсткі механічні з'єднання з механізмами синхронізації взаємного положення їх осей. Наведена модернізація методу електродинамічного оброблення забезпечує повне виключення ефекту іскрової ерозії поверхні матеріалу, що обробляється, а також можливість суттєвого підвищення ефективності оброблення на основі узгодження фазових характеристик імпульсних впливів в умовах застосування диференціатора (пристрій синхронізації) у джерелі живлення імпульсного електричного струму – тобто у джерелі імпульсного живлення (клеми III–IV).

Необхідною умовою реалізації даного способу є синхронізація періоду дії імпульсного електричного струму з часовим інтервалом реалізації імпульсів динамічного тиску на базі раціональної конфігурації розрядного контура, де імпульс струму рухливої частини електрода-індентора є керованим і надходить лише за сигналом про готовність його розповсюдження в металі зварного шва. Синхронізація сигналів здійснюється елементною базою за допомогою диференціатора 7. Випереджаюча дія імпульсу динамічного тиску забезпечує необхідний контактний тиск для проходження імпульсного електричного струму та виключає проявлення іскро-дугових ефектів. Таким чином, реалізація способу електродинамічного оброблення забезпечується конструкцією та складом обладнання відповідного пристрою. Механічне оснащення відповідає одному з можливих варіантів силової компоновки обладнання для даного оброблення з підтримкою функції стабілізації вза-

емного позиціонування контактних елементів розрядного кола.

Метод «електродинамічне оброблення + зварювання ТІГ» реалізовано в автоматизованому зварювальному комплексі (рис. 4, а), принципи побудови якого базуються на результатах [35]. Апробація методу підтвердила його ефективність для усунення залишкових напружень розтягу стикових з'єднань зі сплаву АМг6. Вихідні значення σ_x (вздовж шва) мембранних напружень (без електродинамічного оброблення) сягали до 100 МПа в центрі шва. Доведено, що якщо зазначене оброблення після зварювання (при $T = 20^\circ\text{C}$) забезпечувало в центрі шва утворення мембранних напружень стиску σ_x (вздовж шва) до -50 МПа, то після нього в процесі зварювання (при $T = 150^\circ\text{C}$) $\sigma_x = -100$ МПа [36].

Серед новітніх способів зовнішнього впливу на якість металовиробів активно розвивається дослідження дії імпульсного електромагнітного поля та постійних магнітних полів, що накладаються на розплав у процесі його тверднення під час отримання литих заготовок і деталей із неферромагнітних матеріалів, наприклад сплавів алюмінію. Визначено, що дія постійних магнітних полів сприяє еволюції їх структури, підвищенню спротиву корозійному ураженню. Механізм структуроутворення ґрунтується на проявах дії зазначених полів – відбувається зменшення структурних складових, зміна морфології інтерметалідних фаз, підвищен-

ня їх мікротвердості, зміна їх розмірів і конфігурації, які подібні до процесів затвердіння при високих швидкостях охолодження [37].

Рідкий метал, що є вмістом зварювальної ванни, при зварюванні плавленням за певних допущень подібний за властивостями (при значно меншому об'ємі) до металу при литті, тобто придатним для оброблення імпульсним електромагнітним полем і постійним магнітним полем. З урахуванням результатів [37] слід зазначити, що наведено вище оброблення остигаючого металу заднього фронту зварювальної ванни є доцільною для покращення залишкового напружено-деформованого стану та структури металу зварного з'єднання. Це призвело до створення відповідного методу оброблення зварних з'єднань упродовж термомодеформаційного зварювального циклу та гібридної технології «автоматичне зварювання + оброблення постійним магнітним полем» [38]. Даний метод доцільно застосовувати для зварних з'єднань із неферромагнітних металевих сплавів на основі Al, Mg, Ti, в яких відсутні доменні структури. Наслідком цього є більша за величиною сила електромагнітного тиску (у порівнянні з вуглецевими сталями), яку генерує постійне магнітне поле.

В якості інструменту керування структурою металу шва й напруженим станом зварного з'єднання перспективним з енергетичних міркувань є застосування імпульсного електромагнітного поля замість постійного із заданою частотою впливу на задній фронт зварювальної ванни. Використання імпульсного поля дозволяє суттєво підвищити енергію, і, як наслідок, – силу електромагнітного тиску на метал шва у порівнянні із застосуванням постійного поля. Генератори ІЕС, що побудовані на сучасній елементній базі силової електроніки, забезпечують частоту реалізації імпульсного електромагнітного поля $\leq 1/\text{с}$ [39, 40]. Частота його дії за стандартних швидкостей зварювання ТІГ $V_{\text{зв}} = 4$ мм/с за ефективністю співставна із впливом постійного магнітного поля. Розроблено математичну модель електрофізичних процесів в умовах дії імпульсного поля на неферромагнітні матеріали на основі Al та доведено його позитивний вплив на структуру й залишкові напруження зварних з'єднань зі сплаву АМг6 [41, 46]. На базі результатів [39–41, 46] створено автоматизований зварювальний комплекс (рис. 4, б), що реалізує гібридну технологію «оброблення імпульсним електромагнітним полем + зварювання ТІГ».

Перспективним напрямком для оброблення металевих сплавів і зварних з'єднань стало використання електроімпульсних технологій АОТs, що

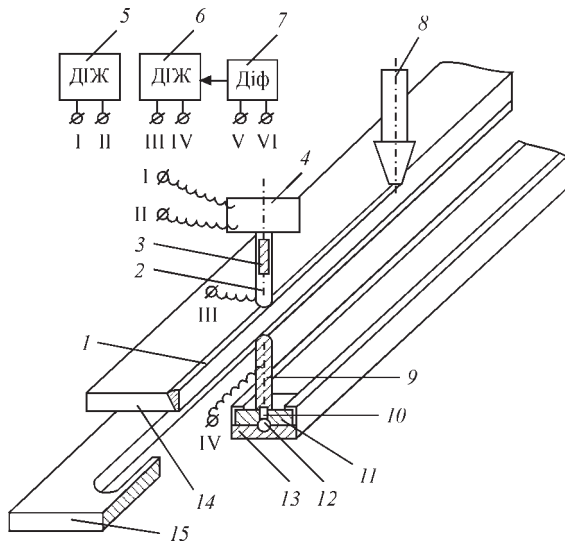


Рис. 3. Схема способу електродинамічного оброблення [35]: 1 – зварний шов; 2 – рухома частина індентора; 3 – датчик переміщення; 4 – електромагнітна частина індентора; 5 – джерело імпульсного живлення ДіЖ (клемми I і II) електромагнітної частини індентора; 6 – джерело імпульсного живлення ДіЖ (клемми III і IV) ударної частини індентора; 7 – диференціатор ДіФ (клемми V і VI); 8 – пальник зварювальний; 9 – контакт повзуна; 10 – пружина упорна; 11 – повзун; 12 – упор повзуна роликаний; 13 – траверса упорна; 14 – деталь, що зварюється; 15 – робочий стіл

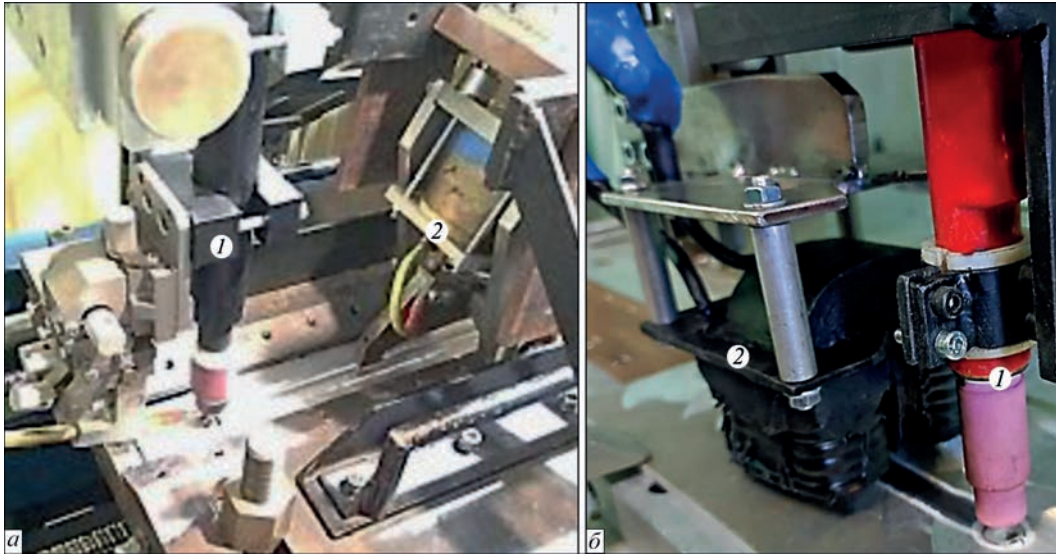


Рис. 4. Зовнішній вигляд обладнання для гібридних технологій зварювання: *a* – «зварювання TIG + електродинамічне оброблення» [36]; 1 – пальник TIG, 2 – електродна система для даного оброблення [36]; *б* – «зварювання TIG + оброблення імпульсним електромагнітним полем» [41]; 1 – пальник TIG, 2 – індуктор для даного оброблення» [41]

первинно розроблялися для технічного очищення водних розчинів [42]. Генерування імпульсів електричного струму в АОТs відбувається поблизу поверхні середовища, що обробляється, та використовується імпульсним бар'єрним розрядом, який діє на поверхню через діелектричний бар'єр.

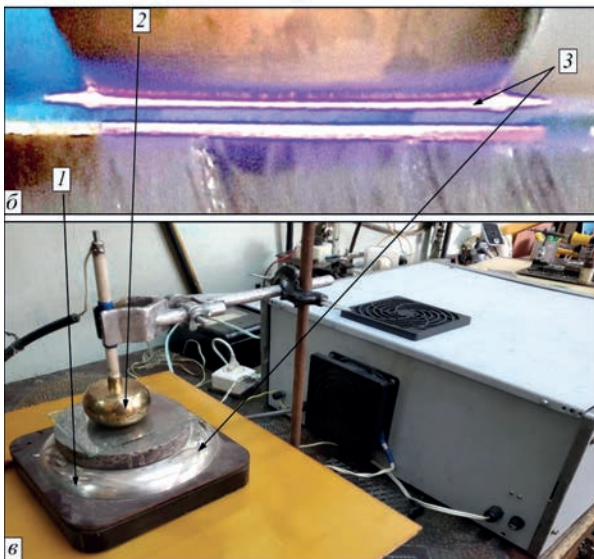
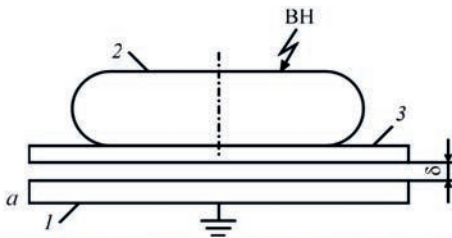


Рис. 5. Оброблення металевих сплавів імпульсним бар'єрним розрядом (ОІБР) [44]: *a* – схема оброблення; ВН – висока напруга від генератора імпульсів струму; 1 – метал, що обробляється; 2 – електрод; 3 – діелектричний бар'єр (кварцове скло); *б* – повітряний проміжок; *в* – процес оброблення конструкційної сталі; 1–3 відповідають рис. 5, *a*; *в* – апаратний комплекс для оброблення металів і зварних з'єднань

Генерування імпульсів електричного струму на поверхні металевих сплавів призвело до створення нового технологічного процесу – оброблення металів імпульсним бар'єрним розрядом (рис. 5) [43]. Він генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, і його застосування є новим підходом до оптимізації механічних властивостей високоміцних сталей для зварних конструкцій, який базується на електрофізичних процесах. У [44] досліджували зміцнення сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню такого розряду. На базі методу трансмісійної електронної мікроскопії встановлено, що значення твердості *HV* після оброблення імпульсним бар'єрним розрядом зростають з 420 до 505 кг/мм² і супроводжується загальним підвищенням щільності дислокацій та диспергуванням мікроструктури. Це позитивно впливає на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ для зварних конструкцій, які працюють в умовах динамічних навантажень. Отримані результати відкривають нові можливості застосування оброблення імпульсним бар'єрним розрядом для еволюції структури металевих сплавів і зварних з'єднань.

На рис. 6 наведено структурну схему електрофізичних технологій на базі процесів із використанням імпульсного електромагнітного поля. Так, окремим напрямком є дослідження впливу оброблення імпульсним бар'єрним розрядом на ресурс металевих сплавів і зварних з'єднань, включаючи легкі та кольорові сплави й конструктивні сталі, з метою еволюції їх структури для підвищення твердості, регулювання напружених станів.

Перспективним є дослідження можливості застосування оброблення імпульсним бар'єрним

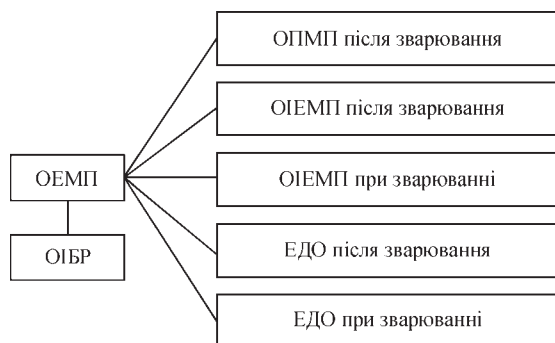


Рис. 6. Структура перспективних досліджень впливу оброблення магнітним полем (ОЕМП) на ресурс металевих сплавів і зварних з’єднань: ОМПМП – оброблення постійним магнітним полем; ОІЕМП – оброблення імпульсним магнітним полем; ЕДО – електродинамічне оброблення; ОІБР – оброблення імпульсним бар’єрним розрядом

розрядом для локальної неруйнівної оцінки залишкових напружених станів металів, сплавів і зварних з’єднань. Оброблення локальних ділянок (діаметром ≤ 1 мм) може бути альтернативою операції висвердлювання локальних отворів на поверхні металу, що є необхідною умовою застосування методу електронної спекл-інтерферометрії для визначення напружень [45]. Недоліком даної методики є те, що вона є умовно руйнівною. Це обмежує її використання на натурних відповідальних металевих конструкціях, що призначені для експлуатації і на яких виключені навіть мінімальні поверхневі точкові пошкодження.

Таким чином, використання спекл-інтерферометрії можливе тільки на зразках-свідках або конструкціях-імітаторах. У запропонованій методиці для релаксації напружень (замість висвердлювання отвору) може бути застосоване оброблення імпульсним бар’єрним розрядом локальної ділянки поверхні. Встановлення кореляційної залежності між спекл-картинами поверхні навколо обробленої ділянки та навколо висвердленого отвору дозволить використовувати метод електронної спекл-інтерферометрії в якості неруйнівного методу оцінки напружених станів на поверхні металевих зварних конструкцій.

Досвід дослідження впливу електромагнітних полів на метали та сплави доводить можливість застосування електрофізичних технологій для керування напруженим станом, поліпшення структури, трибологічних і механічних характеристик зварних з’єднань у конструкціях машинобудування, суднобудування та авіакосмічної промисловості.

Висновки

1. Проведено аналіз перспективних технологій покращення механічних характеристик і напруженого стану металевих сплавів і зварних з’єднань,

які базуються на застосуванні електромагнітних полів та їх похідних, таких як електродинамічна сила тиску, вихрові струми та ударні хвилі.

2. Доведено позитивний вплив мікродобавок модифікатора системи Ti–TiC, отриманого електрогідроімпульсним обробленням високоенергетичним розрядом, на експлуатаційні властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС.

3. Показано, що різні методи оброблення імпульсним електромагнітним полем сприяють зменшенню залишкових напружень зварних з’єднань. Доведено переваги такого оброблення металу шва в процесі зварювання у порівнянні з обробленням при кімнатній температурі.

4. Досліджено механізм поверхневого зміцнення сталі 25XГНМТ внаслідок її оброблення імпульсним бар’єрним розрядом. Доведено, що він сприяє підвищенню щільності дислокацій та диспергуванням мікроструктури, тобто позитивно впливає на механічні характеристики сталі. Розглянуто перспективи застосування імпульсного бар’єрного розряду для неруйнівного контролю залишкових напружених станів зварних з’єднань.

Список літератури

1. Razmyshlyaev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, 3, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.05>
2. Дубоделов В.І., Горюк М.С. (2018) Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. У кн. «Наука про матеріали: досягнення та перспективи». У 2-х т. Т. 2. Л.М. Лобанов та ін. (ред.). Київ, Академперіодика, сс.24–50.
3. Опара В.С., Резникова Л.Я., Юрченко Е.С., Петушков В.Г. (1984) Влияние жесткости сварных соединений на снижение остаточных напряжений при электрогидроимпульсной обработке. *Автоматическая сварка*, 7, 70–71.
4. Sizonenko, O., Vovchenko, A. (2014) Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of new materials (Review). *Machines. Technologies. Materials*, 8(12), 41–44. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2014/12/41>
5. Липян Е.В., Сизоненко О.Н., Торпаков А.С., Жданов А.А. (2015) Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «смесь порошков Fe–Ti–углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць*, 51(1160), 59–65.
6. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Science*, 56(2), 232–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>
7. Lobanov, L.M., Syzonenko, O.M., Holovko, V.V. et al. (2021) Pulsed-discharge treatment of the Al–Ti–C system modifier. *The Paton Welding J.*, 5, 24–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.04>
8. Lobanov, L.M., Ryabtsev, I.O., Pashchyn, M.O. et al. (2023) Wear resistance of titanium carbide-modified 25Kh5FMS deposited metal. *Strength of Materials*, 55(3), 469–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00539-y>
9. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Pashchin, M.O. et al. (2023) Influence of different types of modifiers on the structure

- and properties of deposited metal of the type of 25Kh5MFS tool steel. *The Paton Welding J.*, **5**, 11–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.02>
10. Sprecher, A.F., Mannan, S.L., Conrad, H. (1986) Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, **34(7)**, 1145–1162. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
 11. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.
 12. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-density pulse current-induced unsteady stress-strain state in a long rod. *Strength of Materials*, **36(4)**, 377–381. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>
 13. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. Том 1. Прочность материалов и конструкций: серия монографий*. В.Т. Трошенко (ред.). Киев, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины.
 14. Троицкий О.А., Калымбетов П.У. (1981) Зависимость электропластического эффекта в цинке от длительности отдельных импульсов. *Физика металлов и металловедение*, **51(5)**, 1056–1059.
 15. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A., Olisov, A.N. (2006) Analysis of pulse current-induced tensile stress relaxation. *Strength of Materials*, **38(1)**, 84–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0019-4>
 16. Strizhalo, V.A., Novogrudskij, L.S. (1997) Determination of the electroplastic strain energy of metals. *Problemy Prochnosti*, **4**, 38–43. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0031108852&origin=recordpage>
 17. Morris, J.W., Fultz, B., Chan, J.W., Mei, Z. (1989) The influence of high magnetic fields on mechanical properties of metastable austenitic steels. *Физика низких температур*, **15(10)**, 1072–1080. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0032269>
 18. Guoyi Tang, Zhuohui Xu, Miao Tang et al. (2005) Effect of a pulsed magnetic treatment on the dislocation substructure of a commercial high strength steel. *Materials Science and Engineering: A*, **398(1–2)**, 108–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.003>
 19. Liping Ma, Wenxiang Zhao, Zhiqiang Liang et al. (2014) An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Materials Science and Engineering: A*, **609**, 16–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.100>
 20. Batainen, O., Klamecki B., Koepeke B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. of Materials Processing Technology*, **134(2)**, 190–196. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01002-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01002-6)
 21. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of Materials*, **4**, 387–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9142-3>
 22. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J., Mamuzic, I. (2010) Correlation between the corrosion resistance and the hardness scattering of structural metals treated with a pulse electric current. *Mater. Technol.*, **44(2)**, 99–102. <http://mit.imt.si/izvodi/mit102/babutsky.pdf>
 23. Bigyan Fang, Jinqiu Wang, Suhong Xiao (2005) Stress corrosion cracking of X-70 pipeline steels by electropulsing treatment in near-neutral pH solution. *J. Mater. Sci. Technol.*, **40(24)**, 6545–6552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1813-2>
 24. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. та ін. (1998) Влияние магнитного поля на релаксацию метастабильных структурных дефектов и пластичность кристаллов. *Вестник ТГУ*, **3(3)**, 273–274.
 25. Климов К.М., Бурханов Ю.С., Новиков И.И. (1985) Влияние электрического тока высокой проводимости на процесс пластического деформирования алюминия. *Проблемы прочности*, **6**, 44–47.
 26. Семашко Н.А., Крупский Р.Ф., Купов А.В. (2004) Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов. *Материаловедение*, **7**, 29–33.
 27. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. et al. (2011) Redistribution of residual welding stresses in pulsed electro-magnetic treatment. *Strength of Materials*, **43(3)**, 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9300-2>
 28. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Pulsed electromagnetic field effect on residual stresses and strains of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *Strength of Materials*, **53(6)**, 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>
 29. Yanli Song, Lin Hua (2012) Mechanizm of residual stress reduction in low alloy steel by a low frequency alternating magnetic treatment. *J. Mater. Sci. Technol.*, **28(9)**, 803–808. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60134-0](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60134-0)
 30. Царюк А.К., Скульский В.Ю., Моравецкий С.И., Сокирко В.А. (2008) Влияние электромагнитной обработки на остаточные сварочные напряжения в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, **9**, 28–32.
 31. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr-2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **476**, 218–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.105>
 32. Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A. et al. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials Performance and Characterization*, **7(4)**, 941–955. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
 33. Han Shanguo, Lobanov, L.M., Cai Detao et al. (2016) *Portable welding deformation control equipment and deformation treatment method thereof*. European patent of office. Priority number(s): CN201510142968 20150330. Bibliographic data: CN104722978 (B) – 2016-04-27 <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?C=C&NR=104722978B&KC=B&FT=D&ND=5&date=20160427&DB=&locale=en-EP>
 34. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Пащин М.О., Волков С.С. (2021) *Спосіб усунення залишкових напружень і деформацій в зонах зварних з'єднань та пристрій для його здійснення*. Патент України винахід № 122829 від 06.01.2021.
 35. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Пащин М.О., Волков С.С. (2021) *Спосіб усунення залишкових напружень і деформацій в зварних з'єднаннях та пристрій для його здійснення*. Патент України на винахід №122933 від 20.01.2021.
 36. Lobanov, L.M., Korzhik, V.M., Pashchin, M.O. et al. (2022) Deformation-free TIG welding of AMg6 alloy with application of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.08.01>
 37. Dubodelov, V.I., Seredenko, Ye.V., Zatulovskiy, A.S., Seredenko, V.A. (2018) Increase of properties of aluminum alloys by the action of a permanent magnetic field on melting at solid state. *The Scientific Technical J. Metal Science and Treatment of Metals*, **24(4)**, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.003>
 38. Бобринский В.И., Родин Н.П., Фомичева Л.Ф., Юсупов Р.Ю., Глущенко В.А., Иголкин А.Ю (2006) *Способ сварки плавлением*. Патент №2288823, опубл.20.12.2006.
 39. Акинін К.П., Антонов О.С., Петухов І.С. та ін. (2010) *Побудова електромеханічних перетворювачів енергії підвищеної ефективності*. Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць, Вип. **26**, 3–12.
 40. Антонов О.С., Михальський В.М., Петухов І.С. та ін. (2012) Дослідження процесів в електромеханічних та напівпровідникових перетворювачах енергії. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць*, Вип. **32**, 5–19.
 41. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2025) Scientific principles of magnetic pulse treatment of welded joints in the process of fusion welding. In: *Welding and Related Technologies*, I.V. Krivtsun et al. (Eds), pp. 183–187. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518>
 42. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu et al. (2014) Review on electrical discharge plasma technology for wastewater.

- Chemical Engineering J.*, **236**, 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
43. Божко І.В., Зозулев В.І., Кобильчак В.В. (2016) SOS-генератор для електророзрядних технологій на основі імпульсного бар'єрного розряду. *Технічна електродинаміка*, **2**, 63–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.02.063>
 44. Божко І.В., Кондратенко І.П., Лобанов Л.М. та ін. (2023) Застосування імпульсного бар'єрного розряду для обробки поверхні пластин зі сталі марки 25ХГНМТ. *Технічна електродинаміка*, **1**, 76–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.076>
 45. Лобанов Л.М., Книш В.В., Пащин М.О. та ін. (2023) Неруйнівне визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.03>
 46. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, **54(6)**, 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
- ### References
1. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.05>
 2. Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018) The use of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena to intensify the influence on metal systems: World and Ukrainian experience. In: *Science of Materials: Achievements and Prospects*. In: 2 Vol. Vol. 2. Ed. by L.M. Lobanov et al. Kyiv, Akadempriodyka, 24–50 [in Ukrainian].
 3. Opara, V.S., Reznikova, L.Y., Yurchenko, E.S., Petushkov, V.G. (1984) Influence of welded joint stiffness on reduction of residual stresses during electrohydroimpulse processing. *Avtomaticheskaya Svarka*, **7**, 70–71 [in Russian].
 4. Sizonenko, O., Vovchenko, A. (2014) Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of new materials (Review). *Machines. Technologies. Materials*, **8(12)**, 41–44. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2014/12/41>
 5. Lipyanyan, E.V., Sizonenko, O.N., Torpakov, A.S., Zhdanov, A.A. (2015) Thermodynamic analysis of heterogeneous chemical reactions in the system «mixture of Fe–Ti powders–hydrocarbon liquid» under the influence of high-voltage electric discharges. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Tekhnika ta Elektrofizyka Vysokykh napruh: Coll.*, **51(1160)**, 59–65 [in Russian].
 6. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lipyanyan, E.V., Zaiichenko, A.D. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Mater. Sci.*, **56(2)**, 232–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>
 7. Lobanov, L.M., Syzonenko, O.M., Holovko, V.V. et al. (2021) Pulsed-discharge treatment of the Al–Ti–C system modifier. *The Paton Welding J.*, **5**, 24–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.04>
 8. Lobanov, L.M., Ryabtsev, I.O., Pashchyn, M.O. et al. (2023) Wear resistance of titanium carbide-modified 25Kh5FMS deposited metal. *Strength of Materials*, **55(3)**, 469–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00539-y>
 9. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Pashchin, M.O. et al. (2023) Influence of different types of modifiers on the structure and properties of deposited metal of the type of 25Kh5MFS tool steel. *The Paton Welding J.*, **5**, 11–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.05.02>
 10. Sprecher, A.F., Mannan, S.L., Conrad, H. (1986) Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, **34(7)**, 1145–1162. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
 11. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Y.S. (2001) *Physical bases of electric pulse and electroplastic processing and new materials*. Moscow, MGIU [in Russian].
 12. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-density pulse current-induced unsteady stress-strain state in a long rod. *Strength of Materials*, **36(4)**, 377–381. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>
 13. Strizhalo, V.A., Novogrudskiy, L.S., Vorobyev, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account the influence of electromagnetic fields. Vol. 1. Strength of materials and structures: A series of monographs*. Ed. by V.T. Troshchenko, Kyiv, IPS [in Russian].
 14. Troitsky, O.A., Kalymbetov, P.U. (1981) Dependence of the electroplastic effect in zinc on the duration of individual pulses. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **51(5)**, 1056–1059 [in Russian].
 15. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A., Olisov, A.N. (2006) Analysis of pulse current-induced tensile stress relaxation. *Strength of Materials*, **38(1)**, 84–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0019-4>
 16. Strizhalo, V.A., Novogrudskiy, L.S. (1997) Determination of the electroplastic strain energy of metals. *Problemy Prochnosti*, **4**, 38–43. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0031108852&origin=recordpage>
 17. Morris, J.W., Fultz, B., Chan, J. W., Mei, Z. (1989) The influence of high magnetic fields on mechanical properties of metastable austenitic steels. *Fizika Nizkikh Temperatur*, **15(10)**, 594–599. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0032269>
 18. Guoyi Tang, Zhuohui Xu, Miao Tang, Xihua Chen, Huihua Zhou, Anli Lu (2005) Effect of a pulsed magnetic treatment on the dislocation substructure of a commercial high strength steel. *Mater. Sci. and Engin.: A*, **398(1–2)**, 108–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.003>
 19. Liping Ma, Wenxiang Zhao, Zhiqiang Liang et al. (2014) An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Mater. Sci. and Engin.: A*, **609**, 16–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.100>
 20. Batainen, O., Klamecki B., Koepke B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. Mater. Proc. Technol.*, **134(2)**, 190–196. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01002-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01002-6)
 21. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of Materials*, **4**, 387–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9142-3>
 22. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J., Mamuzic, I. (2010) Correlation between the corrosion resistance and the hardness scattering of structural metals treated with a pulse electric current. *Mater. Technol.*, **44(2)**, 99–102. <http://mit.imt.si/izvodi/mit102/babutsky.pdf>
 23. Bigyan Fang, Jinqiu Wang, Suhong Xiao (2005) Stress corrosion cracking of X-70 pipeline steels by electropulsing treatment in near-neutral pH solution. *J. Mater. Sci. Technol.*, **40(24)**, 6545–6552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1813-2>
 24. Golovin, Yu.I., Morgunov, R.B., Zhulikov, S.E. et al. (1998) Influence of magnetic field on metastable structural defects relaxation and plasticity of crystals. *Vestnik TGU*, **3(3)**, 271–274 [in Russian].
 25. Klimov, K.M., Burkhanov, Y.S., Novikov, I.I. (1985) Effect of high conductivity electric current on the process of plastic deformation of aluminum. *Problemy Prochnosti*, **6**, 44–47 [in Russian].
 26. Semashko, N.A., Krupsky, R.F., Kupov, A.V. (2004) Acoustic emission during electric pulse deformation of titanium alloys. *Materialovedenie*, **7**, 29–33 [in Russian].
 27. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. et al. (2011) Redistribution of residual stresses in pulsed electromagnetic treatment. *Strength of Materials*, **43(3)**, 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9300-2>
 28. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Pulsed electromagnetic field effect on residual stresses and strains of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *Strength of Materials*, **53(6)**, 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>
 29. Yanli Song, Lin Hua (2012) Mechanism of residual stress reduction in low alloy steel by a low frequency alternating

- magnetic treatment. *J. Mater. Sci. Technol.*, 28(9), 803–808. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60134-0](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60134-0)
30. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Influence of electromagnetic treatment on residual welding stresses in welded joints of carbon and low-alloyed steel. *The Paton Welding J.*, 9, 22–25.
 31. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr-2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 218–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.105>
 32. Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A., Pashchin, N., Mikhodui, O. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials Performance and Characterization*, 7(4), 941–955. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
 33. Han Shanguo, Lobanov, L.M., Cai Detao et al. (2016) *Portable welding deformation control equipment and deformation treatment method thereof*. European Patent Office. Priority number(s): CN201510142968 20150330. Bibliographic data: CN104722978 (B) – 2016-04-27. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=C-N&N_R=104722978B&KC=B&FT=D&ND=5&date=20160427&DB=&locale=en_EP
 34. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchyn, M.O., Volkov, S.S. (2021) *Method for eliminating residual stresses and deformations in welded joints and device for its implementation*. Patent for invention 122829, 06.01.2021 [in Ukrainian].
 35. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchyn, M.O., Volkov, S.S. (2021) *Method for eliminating residual stresses and deformations in welded joints and device for its implementation*. Patent for invention 122933, 20.01.2021 [in Ukrainian].
 36. Lobanov, L.M., Korzhik, V.M., Pashchin, M.O. et al. (2022) Deformation-free TIG welding of AMg6 alloy with application of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, 8, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/t.pwj2022.08.01>
 37. Dubodelov, V.I., Seredenko, Ye.V., Zatulovskiy, A.S., Seredenko V.A. (2018) Increase of properties of aluminum alloys by the action of a permanent magnetic field on melting at solid state. *The Sci. Technical J. Metal Science and Treatment of Metals*, 24(4), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.003>
 38. Bobrinsky, V.I., Rodin, N.P., Fomicheva, L.F., Yusupov, R.Y., Glushchenko, V.A., Igolkin, A.Y. (2006) *Fusion welding method*. Patent 2288823 RF, publ. 20.12.2006 [in Russian].
 39. Akinin, K.P., Antonov, O.E., Petukhov, I.S. et al. (2010) Construction of electromechanical energy converters of increased efficiency. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky, NANU: Coll.*, Vol. 26, 3–12 [in Ukrainian].
 40. Antonov, O.E., Mikhalskiy, V.M., Petukhov, I.S., Shapoval, I.A., Chopyk, V.V. (2012) Investigation of processes in electromechanical and semiconductor energy converters. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NANU: Coll.*, Vol. 32, 5–19 [in Ukrainian].
 41. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2025) Scientific principles of magnetic pulse treatment of welded joints in the process of fusion welding. In: *Welding and Related Technologies*, Ed. by I.V. Krivtsun et al., 183–187. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518>
 42. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu et al. (2014) Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering J.*, 236, 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
 43. Bozhko, I.V., Zozuljov, V.I., Kobylchak, V.V. (2016) SOS-generator for the electric discharge technology used pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2, 63–68 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-2016.02.063>
 44. Bozhko, I.V., Kondratenko, I.P., Lobanov, L.M. et al. (2023) Pulsed barrier discharge for treatment of surfaces of 25KhGNMT steel plates. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1, 76–80 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-2023.01.076>
 45. Lobanov, L.M., Knysh, V.V., Pashchin, M.O., Kot, V.G. et al. (2023) Nondestructive evaluation of residual stresses in welded joints on the base of a combination of ultrasonic testing and speckle-interferometry. *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruivnyy Kontrol*, 2, 22–27 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.03>
 46. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, 54(6), 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>

INVESTIGATIONS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF TREATMENT OF METAL ALLOYS AND WELDED JOINTS BY ELECTROMAGNETIC FIELD (REVIEW)

L.M. Lobanov¹, L.I. Nyrkova¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mikhodui¹, O.M. Tymoshenko¹, N.L. Todorovych¹, O.M. Syzonenko³, 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 Beresteiskiy Ave., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: dep7ied@ukr.net

³Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine. 43a Bohoyavlensky Ave., 54018, Mykolaiv, Ukraine.

E-mail: dioo@iippt.com.ua

An analysis of promising technologies for improving the mechanical characteristics and stressed states of metal alloys and welded joints based on the use of electromagnetic fields and their derivatives, such as electrodynamic pressure force, eddy currents, and shock waves, is carried out. The process of electrohydro-pulse treatment by a high-energy discharge (EPT HED EHDPD) with application of a hydrocarbon liquid for the production of polydisperse mixtures used for alloying the weld metal of welded joints as part of flux-cored wires, is considered. The positive effect of microadditives of the Ti-TiC system modifier, obtained by EPT HED, on the operational properties of the deposited metal of the 25Kh5FMS tool steel type was determined. It is shown that treatment with a pulsed electromagnetic field (PEMF) improves the residual stressed states of welded joints. New technological schemes for the application of electrodynamic treatment (EDT) of welded joints are considered. The advantages of these two treatments of the weld metal in the welding process in comparison with processing at room temperature are proved. The mechanism of surface hardening of 25KhGNMT steel as a result of its treatment with a pulsed barrier discharge (PBD) was investigated. It is proved that the PBD increases the dislocation density and refines the microstructure, which has a positive effect on the mechanical characteristics of steel. Prospects for its use for non-destructive testing of residual stressed states of welded joints are considered. 46 Ref., 6 Fig.

Keywords: welded joint, electromagnetic field treatment, electrodynamic treatment, residual stresses, fusion welding, surface hardening, titanium carbide, polydisperse mixtures, residual deformations, aluminum alloys, structural steels, dislocation density

Отримано 09.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 09.06.2025

Прийнято 29.09.2025