

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА В СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.В. Черкашин¹, О.Л. Міходуй¹, І.П. Кондратенко², О.М. Сізоненко³

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

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

³Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України.

54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43А. E-mail: office.iipt@nas.gov.ua

Розробка і впровадження нових енергозберігаючих технологій відповідає сучасним запитам України. В роботі розглянуто передпосилки, сучасний стан та напрямки розвитку вивчення впливу електромагнітних полів на механічні властивості і напружений стан металевих матеріалів та зварних з'єднань. Показана можливість їх застосування для керування напруженим станом, еволюцією структури, властивостями, подовженням ресурсу зварних конструкцій. Бібліогр. 49.

Ключові слова: електромагнітні технології обробки, електромагнітні поля, зварні з'єднання, конструкції, металеві матеріали, імпульсні іскрові і струмові розряди, електропластичний ефект, напружено-деформований стан, нанодисперсні модифікатори

Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює зростання вимог до металевих матеріалів, комплексу їх основних та спеціальних властивостей, методів їх нероз'ємного з'єднання.

Враховуючи сучасні труднощі України, перспективним резервом покращення стану її промислової індустрії є розробка і впровадження нових енергозберігаючих технологій. Підвищення міцності, пластичності та інших механічних характеристик можливо досягти через комбіновану обробку металевих матеріалів імпульсним електричним струмом (ІЕС) і електромагнітним полем (ЕМП) високої інтенсивності за малий відрізок часу. Результати досліджень електрофізичних процесів, що протікають в металевих матеріалах при дії ЕМП, дають підставу вважати, що засади керування механічними властивостями із застосуванням ЕМП є альтернативою традиційним технологіям, маючи при цьому низку переваг, таких як енергоефективність та технологічність.

Метою статті є аналіз розвитку, сучасного стану та напрямків вирішення проблеми впливу ЕМП на механічні характеристики і напружений стан металевих матеріалів та зварних з'єднань. При цьому питання керування структурою і механічними властивостями рідкого металу із застосуванням ЕМП у процесі зварювання, що є окремим (і досить актуальним) питанням інженерної практики [1], у даній роботі не розглядається.

Перспективи застосування імпульсного іскрового та струмового розрядів для обробки зварних з'єднань. До методів підвищення механічних характеристик металів і сплавів відносяться різні види їх обробки ІЕС та ЕМП [2]. Високовольт-

ний імпульсний розряд в рідині використовується в промисловій технології як джерело динамічного тиску, під дією якого матеріали, що оброблюються, можуть піддаватися руйнуванню, формоутворенню, змінювати структуру і механічні характеристики. Електрогідроімпульсна обробка (ЕГІО) являє собою вплив на об'єкт механічного навантаження, яке ініціюється високовольтним імпульсним розрядом електричного струму в струмопровідному середовищі (воді). Є численні результати, що підтверджують можливість використання ЕГІО для зниження залишкових технологічних напружень. Дослідження впливу ЕГІО на напружено-деформований стан зварних з'єднань показали, що вона зменшує напруження розтягування в зварних конструкціях до 90 % завдяки активації дислокаційних процесів. За результативністю зниження рівня залишкових зварювальних напружень ЕГІО порівняна з високим відпуском [3].

При цьому методу ЕГІО притаманний ряд недоліків, до яких можна віднести необхідність використання металоємних технологічних ємностей з водою, які характеризуються достатньою складністю конструкції за рахунок збільшеної жорсткості, аби протистояти хвилям стиснення — розтягування, що ініціюються електрогідрравлічним ефектом.

Водночас ЕГІО є доцільним для використання при виробництві габаритних зварних виробів, наприклад, зварювально-литих станин. В останні роки ЕГІО не набула подальшого розвитку в Україні, що помітно за відсутності відповідних публікацій і пов'язано із скороченням обсягів важкого машинобудування, але має перспективи за

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.В. Черкашин, О.Л. Міходуй, І.П. Кондратенко, О.М. Сізоненко, 2019

умов відновлення темпів зростання вітчизняного виробництва металокопункцій.

Близькою до ЕГЮ за засобом реалізації (але не за призначенням) можна вважати електроіскрову обробку, поширену в технології машинобудування. При електроіскровій обробці на поверхні заготовки, що входить до складу розрядного контуру і знаходиться в діелектричній рідині (гас, масло) ініціюється розряд ІЕС, під час якого виділяється тепло, що витрачається на плавлення, часткове випаровування і вибуховий викид частинок оброблюваного металу. Подібність електроіскрової обробки і ЕГЮ полягає в тому, що при їх виконанні розряд струму відбувається в рідкому середовищі, а енергія розряду забезпечується ємнісним накопичувачем. При цьому якщо для реалізації ЕГЮ необхідно струмопровідне середовище, то для електроіскрової обробки — діелектричне. Даний метод застосовується при калібруванні, прошивці отворів і фільтер, різанні і шліфуванні. Водночас реалізація електроерозійних процесів без застосування струмопровідних і діелектричних середовищ різко розширює можливості застосування електроіскрової обробки великогабаритних металокопункцій, наприклад, для зміцнення ріжучих поверхонь деталей сільгосптехніки [4]. При цьому можливості даного способу дозволяють реалізувати процеси наноструктурування поверхневих шарів копункційних сталей та наплавлених поверхонь, спрямованих на підвищення їх трибологічних характеристик.

Обробка ІЕС використовується для зміцнення поверхонь фрикційного контакту, який визначається взаємодією пари колесо-рейка [5]. Принцип зміцнення рейки полягає в електроіскровому нанесенні покриття дискретного типу з ділянками, що мають різні характеристики твердості, ударної в'язкості та коефіцієнта тертя. Формування дискретного покриття контактної поверхні рейки здійснювали з використанням електроіскрової обробки. Однією з переваг дискретного покриття є його несплошність, яка забезпечує мінімальний рівень залишкових напружень у порівнянні з суцільним покриттям. Нанесення покриття здійснювали за допомогою переміщення електрода з різних металевих матеріалів у формі диска по оброблюваній поверхні. Між електродом і рейкою ініціювали ІЕС заданої тривалості і конфігурації, що забезпечувало дискретний перенос металу з електрода на рейку. Застосування методу забезпечило високі трибологічні характеристики як контактної поверхні рейки, так і пари колесо-рейка [6]. Електроіскрове структурування є перспективним з позиції його реалізації стосовно зварних з'єднань. Розробка електроімпульсних

методів наноструктурування, а так само імплантування наноструктур на заданих ділянках перетину зварного з'єднання представляється перспективним методом підвищення ресурсу металевих копункцій.

Дослідження електропластичного ефекту, що є базою перспективних технологій обробки зварних з'єднань. Дослідження в галузі фізики твердого тіла, що проводяться з 1960-х рр., дозволили встановити явище різкого підвищення пластичності та зниження опору металу деформації за рахунок одночасної дії активного механічного навантаження і ІЕС високої щільності. Явище було названо електропластичним ефектом (ЕПЕ), а деформація, ініційована ЕПЕ — електропластичною деформацією (ЕПД). Практичне використання ЕПЕ відкрило нові можливості як для технологій механічного формоутворення металів і сплавів, включаючи тугоплавкі [7], так і для регулювання їх напруженого стану [8]. У 1925 р. Хекман, вивчаючи властивості кристалів, висловив ідею про взаємозв'язок між їх механічними, електричними і тепловими характеристиками. Оскільки основними «носіями» електричних властивостей в металах є електрони і зв'язок між атомами здійснюється електростатичними силами, то вплив на енергетичний спектр вільних електронів призводить до зміни механічних властивостей металів [9]. Було досліджено питання прискорення руху дислокацій під дією спрямованого потоку електронів і показано, що таке прискорення може відбуватися за умови, якщо швидкість електронів вище швидкості дислокацій. Було встановлено, що вплив ІЕС викликає стрибок, знижуючий величину деформуючого зусилля, причому це явище спостерігалось лише в області пружно-пластичних деформацій.

Основна мета більшості проведених в 1970–80-і рр. досліджень полягала у вивченні механізму ЕПЕ. Це стало стимулом до вивчення впливу побічних факторів: теплової та механічної (пондеромоторної) дії ІЕС, а також впливу нерівномірності розподілу щільності струму по перетину зразка (скін-ефект) на зниження опору металів деформуванню.

При цьому для розглянутих матеріалів і параметрів ІЕС в наведених вище роботах товщина скін-шару перевищувала діаметр зразків, тобто скін-ефект був практично відсутній.

Результати вивчення впливу пінч-ефекту на реалізацію ЕПЕ показали, що останній визначається напруженістю H магнітного поля та магнітною проникністю матеріалу, а також площею поверхні зразка [10]. Значення H прямо залежить від величини сили струму і зворотно — від перетину зразка. На поверхні зразка внаслідок пінч-ефекту розвивається тиск P , який визначається виразом:

$$P = 0,5\mu_0 I^2, \quad (1)$$

де μ_0 — абсолютна магнітна проникність матеріалу.

Оцінка впливу пінч-ефекту на зниження опору деформації зразків показала, що його внесок не перевищує 0,4...6,0 % межі плинності металевих матеріалів. Це підтверджує його незначний вплив на ЕПД [11].

При проходженні ІЕС через метал відбувається підвищення його температури за рахунок джоулева розігріву. При дії ІЕС зростання внутрішньої енергії в матеріалі визначається тривалістю імпульсу, амплітудою струму і величиною електричного опору. Дисипація теплової енергії в металі може як знизити опір його деформації в момент дії ІЕС внаслідок термічної втрати міцності, так і викликати зміну механічних характеристик [12].

Слід зазначити, що основна спрямованість досліджень впливу електричного струму на пластичну деформацію металів була орієнтована як на встановлення фізичної суті явища, так і на технологічні додатки ЕПЕ в інженерній практиці. Дослідження фізичної моделі ЕПЕ виконані для великої кількості металів і сплавів різних класів, при різних режимах виконання ІЕС, видах навантаження, в широкому діапазоні температур. На даний час існує ряд трактувань і описів механізмів ЕПД та ЕПЕ. Найбільш відомою є дислокаційна модель ЕПЕ, в основі якої лежить електронно-дислокаційний взаємодія, що приводить до зриву дислокацій зі стопорів і до захоплення їх рухомими електронами провідності. Але у роботі [13] запропоновано інше трактування ЕПЕ, у якому за базу приймається градієнтно-дислокаційна модель, де градієнт хімічного потенціалу ϕ (ϕ — мінімальна енергія, необхідна для розриву зв'язку електронів з атомами кристалічної решітки) вакансій в полікристалічних металевих матеріалах є визначальним руху дислокацій в імпульсному електромагнітному полі (ІЕМП). Дислокаційна і градієнтно-дислокаційна фізичні моделі дозволяють пояснити тільки підвищення пластичних властивостей металів. У роботі [14] запропоновано градієнтно-дифузійну фізичну модель, яка дає можливість пояснити основні ефекти, які проявляються в металах при обробці ІЕС. Відповідно до цієї моделі, при впливі ІЕС за рахунок концентрації силових ліній електромагнітного поля на дефектах структури, таких як мікропори, тріщини і розшарування, утворюється не тільки $\text{grad } \phi$ по межах цих дефектів, але також і локалізовані поля термопружних напружень.

Супутній нагрів при обробці ІЕС зразків металу в термопружній області температур приводить до зменшення рівня початкових напружень

розтягування [15]. При аналогічному нагріванні без застосування ІЕС рівень напружень в металі після охолодження до кімнатної температури повертався до початкового рівня. При цьому ефект впливу ІЕС (без урахування джоулева розігріву) знижувався зі збільшенням тривалості окремого імпульсу, а при багаторазовій обробці ІЕС опір матеріалу деформації зростав зі збільшенням кількості розрядів струму. З позицій електронно-дислокаційної взаємодії це пояснюється тим, що при одноразовому впливі ІЕС одиничний імпульс діє на матеріал, що має значний дислокаційний потенціал. При багаторазових режимах впливу попередні імпульси виводять з релаксаційних процесів частину дислокацій і реакція матеріалу на дію ІЕС знижується. Зміна полярності ІЕС також впливає на прояв ЕПЕ. У роботі [16] показано, що при однаковій кількості електрики і амплітуді ІЕС, що пропускаються через навантажений зразок, біполярні імпульси викликають меншу релаксацію (стрибок) напружень, ніж монополярні. Це викликане тим, що послідовні ІЕС різної полярності, ініціюючи рух дислокацій в протилежних напрямках, протидіють один одному, внаслідок чого результуюча їх дії менша, ніж при однополярних ІЕС. Вплив ІЕС на пластичність металів відбувається в області пластичної деформації, що супроводжується скиданням деформуючого зусилля, в той час як в області пружної деформації ЕПЕ не спостерігається. У роботі [17] на базі механізму електропластичної деформації запропоновано метод визначення частини енергії імпульсу електричного струму, яка безпосередньо витрачається на роботу пластичної деформації. Це дозволяє визначати напруження початку пластичної течії, ініційованої ІЕС, для матеріалів різних класів в інтервалі температур 293...4,2 К.

В даний час закономірності ЕПЕ найдетальніше досліджені відповідно до вимог інженерної практики з пошуку ефективних способів збільшення пластичності металевих матеріалів, що застосовуються в промисловості. Для зменшення впливу теплової дії ІЕС та магнітного поля одним з напрямків досліджень ЕПЕ було їх проведення при криогенних температурах [18], що має важливе значення у науковому та прикладному аспектах. Науковий інтерес обумовлений тим, що зі зниженням температури від 293 К до значень, близьких до криогенних, посилюється вплив ІЕС, оскільки в таких температурних умовах електронна в'язкість (через відсутність джоулева тепла) стає головним джерелом зниження рухливості дислокацій, що приводить до змін механічних властивостей металевих матеріалів [19]. Прикладний аспект пов'язаний зі створенням високоенергетичних виробів, які використовують ефект

надпровідності (кріотурбогенераторів, термоядерних реакторів). Специфічна дія ІЕС на реалізацію ЕПЕ при криогенних температурах проявляється в тому, що величина стрибка напружень при дії розряду струму збільшується з пониженням температури випробувань, зростанням амплітуди ІЕС і його тривалості. Проходження ІЕС в області пружних напружень викликає появу залишкової деформації при напруженнях, які в залежності від температури випробувань, параметрів імпульсу і класу матеріалу на 10...35 % менше, ніж його межа плинності. Причому зазначені зміни посилюються зі зниженням температури досліджень від 293 до 4,2 К, а амплітуда ІЕС є більш сильнодіючим фактором, ніж його тривалість [20].

Методи обробки металевих матеріалів і зварних з'єднань електромагнітними полями. На основі результатів досліджень електромагнітної дії ІЕС на механічні характеристики металів і сплавів, розроблено технологічні процеси металообробки. Змінюючи тривалість і енергію ІЕС і ІЕМП, в результаті активації спектру дислокаційних, фазових та інших фізичних процесів можна отримувати вироби і деталі з заданими експлуатаційними характеристиками. Вплив ІЕС та ІЕМП різної тривалості та конфігурації, що реалізовано в різних технологіях металообробки, викликає структурні зміни в металах і сплавах [21], що впливають на їх характеристики. Відзначається підвищення зносостійкості різального інструменту [22], корозійної стійкості [23], зниження концентрації напружень в оброблених деталях і елементах конструкцій, ліквідація тріщин втоми, подовження ресурсу штампованих деталей з легких і спеціальних сплавів. Встановлено, що при оптимальних параметрах електроімпульсних впливів підвищується тимчасовий опір відриву матеріалу, межа витривалості і довговічності без зниження пластичних властивостей матеріалу [24]. Наведені технологічні процеси металообробки є перспективними для підвищення механічних характеристик і експлуатаційних властивостей зварних конструкцій з урахуванням особливостей структури і напружено-деформованого стану зварних з'єднань. Це підтверджується формуванням відповідних дослідних програм у таких європейських дослідних організаціях, як: University of Birmingham (UK), University of Hertfordshire (UK), Imperial College (UK), Katholieke Universiteit Leuven (Belgium), EBF-Dresden (Germany), Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS (Germany). Велика увага дослідженням у даному напрямку приділяється у КНР і Японії, наприклад: Sichuan University, China University of Geosciences, Army Academy of Armed Forces, Process Institute of Inner Mongolia First Machinery

Group, Wuhan University of Technology, Beijing Institute of Technology, Nagoya University.

При експлуатації металевих конструкцій, у тому числі і зварних, під впливом навантажень в металі виникають та розвиваються мікротріщини, які викликають зниження його механічних властивостей, що призводить до руйнування виробів. Проблема «заліковування» таких дефектів є актуальною і в даний час відомо кілька способів її реалізації: відновна термічна обробка (ВТО); механіко-термічна обробка (МТО); дифузійна металізація (ДМ) [7]. Ці методи мають недоліки, до яких можна віднести високе енергоспоживання, обмеженість застосування для великогабаритних металоконструкцій, велика тривалість процесу. Енергетичний вплив на тріщину, що поширюється, може реалізовуватися при її обробці ІЕС і ІЕМП, яка здатна не тільки загальмувати її розвиток, але і підвищити міцність металу в зоні вершини дефекту [25]. Пропускання ІЕС по деталі з крайовою тріщиною супроводжується мікровибухом в її вершині, що призводить до утворення кратера, на видаленні від якого на 5...10 мм метал нагрівається на кілька десятків градусів. Це явище може бути використане для притуплення вершини тріщини. Запропоновано метод заліковування мікротріщин в сталі 65Г і армо-залізі за допомогою схрещених полів ІЕС і ІЕМП. У зоні відновленої сплошності спостерігається диспергування структури при супутньому підвищенні мікротвердості по відношенню до вихідного матеріалу [26].

При циклічних випробуваннях вплив ІЕС і ІЕМП призводить до підвищення опору втомі металевих матеріалів, яке пов'язується із заліковуванням мікротріщин, еволюцією дефектної структури і фазового складу, а також усуненням концентраторів напружень. Встановлено позитивний вплив ІЕС на технологічні напруження розтягування у напилених поверхнях інструментальних сталей [27]. Але наведені результати не знайшли подальшого розвитку.

Аналізуючи в цілому результати досліджень ЕПЕ при регулюванні напружено-деформованого стану металевих матеріалів, слід зазначити, що застосування електромагнітних дій проводилися, в основному, в пластичній області навантаження в зв'язку з орієнтацією на практичне застосування ЕПЕ у технологіях формоутворення. При цьому область пружного деформування металевих матеріалів при електромагнітних діях залишається маловивченою [28]. Водночас дослідження особливостей релаксації пружних напружень в металах і сплавах при їх електромагнітній обробці є актуальним для регулювання напруженого стану зварних конструкцій. Результати досліджень впли-

ву ІЕС і ІЕМП на керування залишковими зварювальними напруженнями показали, що реалізація ЕПЕ при обробці зварних з'єднань обмежена особливостями формування розрядного контуру, до складу якого входить конструкція, що обробляється. Так, в більшості випадків розміри зварної конструкції не дозволяють забезпечити необхідну щільність струму j в зоні дії ІЕС. Винятком є обробка ІЕС малогабаритних зварних виробів, наприклад, наплавлених поверхонь деталей різального інструменту, перетини яких дозволяють забезпечувати значення щільності струму, необхідні для реалізації ЕПЕ. Досліджували вплив ІЕМП на зниження залишкових напружень стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву, використовуючи систему плоских індукторів, жорстко закріплених на поверхні пластин, що оброблюються і входять до складу розрядного контуру [29]. Проведені дослідження показали принципovu можливість зниження зварювальних напружень при впливі ІЕМП, хоча їх початковий рівень після обробки знизився не більше, ніж на 30 %. Вплив ІЕМП на зниження залишкових напружень в зварних і наплавлених зразках низьковуглецевих сталей, що базується на інтенсифікації динамічного ефекту магнітострикції [30], забезпечив зниження початкового рівня напружень до 40 %. При цьому особливості закріплення зварних з'єднань впливають на ефективність впливу ІЕМП. Так, при обробці зразків в умовах жорсткого закріплення релаксація залишкових зварювальних напружень проходить більш інтенсивно, ніж в умовах вільного обпирання.

У роботі [31] проведено дослідження дії електромагнітних впливів на зміну механічних властивостей зварних з'єднань вуглецевих і низьколегованих сталей, які показали істотне збільшення значень ударної в'язкості після обробки зразків сталей марки сталь 20 і 09Г2С при збереженні їх характеристик тимчасового опору розриву. Пояснення отриманих результатів засновано на теорії електронно-дислокаційної взаємодії, а також магнітопружною взаємодією міждоменних кордонів (стінок Блоха) з дислокаціями, що стимулюють їх рух при намагнічуванні [32]. Неоднозначні результати досліджень впливу ІЕМП на зміну залишкових зварювальних напружень показано в роботі [33]. Так, залишкові напруження в зразках сталей Ст2пс і 20ХМФЛ в активній зоні знижуються на 3...25 %, при цьому в реактивній зоні підвищуються до 15 %. Разом з тим ІЕМП знижує напруження II роду до рівня, що забезпечується відпаленням при температурі 1060 °С, а також призводить до більш рівномірного розподілу α -фази за обсягом обробленого металу.

Виходячи з представлених результатів за оцінкою впливу ІЕС і ІЕМП на регулювання напру-

жено-деформованого стану зварних з'єднань із сталей та сплавів алюмінію, можна зробити висновки, що, незважаючи на очевидний ефект, максимальне зниження початкового рівня напружень не перевищує 40 %. Перспективною видається розробка та вдосконалення енергоефективних технологій електромагнітних впливів на зварні з'єднання, наплавленні та напиленні поверхні, за яких зниження напружень наближалось б до 100 %.

Реалізація ЕПЕ при прямому пропусканні ІЕС скрізь елементи металокопункцій є досить складним завданням через необхідність забезпечення щільності струму $j \geq 10^3$ А/мм² в перетинах, площа яких значно перевищує 100 мм². Складність пов'язана з розсіюванням силових ліній струму, що має місце вже на незначній відстані від точок підключення розрядного контуру до деталі. Мінімізувати фактор розсіювання можливо за рахунок локалізації ділянки проходження струму в зоні обробки, а його щільність j , що необхідна для реалізації ЕПЕ, досягається за рахунок динамічного контакту електроду, що проводить струм, з поверхнею, яка обробляється. Дану схему дії ІЕС досліджували стосовно новітнього методу неруйнівного контролю напружено-деформованого стану зварних з'єднань [34], де показано, що додаток динамічного навантаження до електроду в період дії ІЕС збільшує надійність контакту електроду з поверхнею зварного з'єднання. При цьому динамічне навантаження інтенсифікує рух і розмноження дислокацій, яке визначає ступінь пластичної деформації полікристалічних структур в умовах дії ІЕС. Керуючий механізм впливу динамічного навантаження, розглянутий у фізичній моделі переривчастої текучості металу при криогенних температурах [7], поширено на область температур в діапазоні 273...293 К стосовно магніто-імпульсної формозміни феромагнітних матеріалів [35]. Встановлено, що малий стрибок напруження, що викликається динамічним або тепловим навантаженням [36], служить ініціатором та синхронізатором пластичної деформації, яка визначається масовим проривом бар'єрів дислокаціями по всьому об'єму полікристалічної структури, яка піддається активному механічному навантаженню. При цьому спрямований рух електронів провідності в момент дії ІЕС сприяє просуванню дислокацій, збільшуючи ступінь пластичної деформації матеріалу у порівнянні з випадком застосування чисто механічного навантаження. У роботі [37] представлено результати досліджень впливу механічного та електромагнітного ефектів при сумарному і розділеному впливах ІЕМП та механічних імпульсів тиску на рухливість крайових дислокацій в кристалах NaCl і LiF. В якості

характеристики імпульсних впливів на рухливість дислокацій брали довжину l їх пробігу. Встановлено, що середня довжина пробігу $\langle l \rangle$ значно зростає при спільному впливі ІЕМП та імпульсів механічного навантаження в порівнянні зі значеннями $\langle l \rangle$, що реєструються при дії кожного з факторів окремо. Зростання $\langle l \rangle$ при впливі струму пов'язано з підвищенням інтенсивності електромагнітного накачування кристала, а суперпозиція імпульсних впливів різної природи ініціює в кристалах досить протяжні за часом релаксаційні процеси, що впливають на їх напружений стан. Дана фізична модель є справедливою і для металевих полікристалічних структур, що знайшло своє підтвердження в роботі [38], де представлено результати оцінки впливу імпульсів струму та механічного навантаження σ на швидкість пластичної деформації $\dot{\epsilon}$ в зразках Zn. Показано, що вплив ІЕС при значенні щільності струму j вище порогового збільшує швидкість v дислокацій, що рухаються у напрямку дії струму. Збільшення $j > 1,0$ кА/мм² ініціює вказаний процес, причому вплив ІЕС прискорює рух дислокацій завдяки їх взаємодії з носіями заряду (електронами).

На основі аналізу попередніх досліджень було обґрунтовано можливість спільного використання електроімпульсних і механічних впливів для обробки зварних конструкцій з метою продовження їх ресурсу [39], що послужило базою для створення нового виду обробки зварних з'єднань — електродинамічної (ЕДО) [40]. При ЕДО метал піддається об'ємному електродинамічному впливу, який характеризується спільним протіканням електроімпульсного і динамічного процесів, перший з яких викликає ЕПЕ в зоні обробки, а другий — формування хвиль напружень із заданою амплітудою, пластичне деформування та подрібнення структури металу. Взаємодія хвиль напружень зі статичним полем залишкових зварювальних напружень може ініціювати релаксацію останніх, наслідком чого є зниження їх значень. Локалізація ІЕС в зоні деформування зменшує фактор розсіювання силових ліній струму, забезпечуючи тим самим досягнення порогової щільності, яка є необхідною умовою реалізації ЕПЕ. Взаємодія складових електродинамічного впливу в період проходження ІЕС через метал визначає ефективність впливу ЕДО на залишкові напруження, еволюцію структури, точність і довговічність зварних конструкцій із легких сплавів [41].

Базуючись на механізмі електрон-дислокаційної взаємодії для створення умов кристалізації, яка забезпечує формування дрібнозеренної структури, перспективною вважається розробка технології модифікування зварного з'єднання нано-

структурними високодисперсними матеріалами, що буде предметом подальших досліджень новітніх методів обробки конструкційних матеріалів.

Для оцінки впливу електрофізичної та динамічної складових електродинамічних дій, що визначають зміну характеристик залишкових зварювальних напружень, розроблено математичну модель процесу ЕДО. Це дозволило провести оптимізацію режимів обробки з метою керування напружено-деформованим станом зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг6 [42–44]. Удосконалення існуючої моделі дозволить проводити розрахунок напружено-деформованого стану зварних конструкцій в умовах супутнього підігріву зварного шва, при різних схемах закріплення конструкції, що обробляється, та при дії магнітного поля.

Враховуючи результати роботи [8], де показано, що супутній підігрів стимулює релаксацію напружень при електроімпульсній обробці тонких стрижнів зі сталі, перспективними є дослідження ефективності ЕДО зварного шва, що охолоджується, яку виконують впродовж термодформаційного зварювального циклу. Розробка гібридних технологій (автоматичне зварювання + ЕДО) дозволить знизити енергоємність процесу обробки, зменшити робочий час виготовлення металевої конструкції при підвищенні її якості [45].

Серед новітніх засобів зовнішнього впливу на якість металовиробів активно розвиваються дослідження дії постійних магнітних полів (ПМП), що накладаються на розплав в процесі його твердіння під час отримання литих заготовок та деталей із неферромагнітних матеріалів, наприклад, сплавів алюмінію. Визначено, що дія ПМП сприяє еволюції їх структури, підвищення спротиву корозійного ураження. Механізм структуроутворення ґрунтується на проявах дії ПМП — зменшення структурних складових, зміни морфології інтерметалідних фаз, підвищення їх мікротвердості, зміна їх розмірів та конфігурації, що є відповідним процесам твердіння при високих швидкостях охолодження [46]. Слід зазначити, що рідкий метал ванни при зварюванні плавленням є, за певних умов, подібним за властивостями (при значно меншому об'ємі) металу при литті, тобто придатним для обробки ПМП. Враховуючи умови формування заднього фронту ванни, перспективною є обробка ПМП вистигаючого металу зварного шва в якості засобу керування напруженим станом і структурою металу з'єднання. Це може стимулювати створення перспективного методу обробки ПМП зварних з'єднань у продовж термодформаційного зварювального циклу та спонукати розробку гібридних технологій (автоматичне зварю-

вання + обробка ПМП») для неферромагнітних металевих матеріалів на основі Al, Mg, Fe.

Модифікування металів і сплавів введенням в розплав невеликих кількостей наномодифікаторів різко впливає на кристалізацію, наприклад, викликає диспергування структурних складових та зміни їх розподілу. В результаті модифікування покращуються механічні властивості сплаву. Якісними характеристиками модифікаторів є розмір окремих тугоплавких частинок, його хімічна чистота та ціна. Певну кількість модифікаторів виготовляють методами порошкової металургії, або із застосуванням шарових млинів. Відомо, що висковольтний електричний розряд (ВЕР) в дисперсній системі металевий порошок–газ дозволяє не тільки подрібнювати частинки металу, а й ініціювати протікання хімічних реакцій. При використанні ВЕР можливість виготовлення високодисперсних наноструктурованих модифікаторів та їх ціна є привабливою для комерційного застосування в металообробці. Технологія диспергування із застосуванням ВЕР подібна за діючим механізмом методу ЕГЮ, що показаний вище. Слід зазначити, що було розроблено наукові засади ВЕР обробки у газі сумішей порошоків Al, Ti при яких здійснюється диспергування та синтез тугоплавких складових, зокрема TiC, AlTi₃, AlTi, Al₂Ti, Al₃Ti, Ti₃AlC, Ti₃AlC₂, Ti₂AlC та лонсдейліта [47, 48]. Окрім ливарного виробництва, наномодифікування є застосовним в технологіях зварювання та наплавлення шляхом введення наночастинок тугоплавких хімічних сполук в зварювальну ванну в процесі лазерного і електрошлакового зварювання, електронно-променевого наплавлення. При напавленні жаростійкими сплавами на основі заліза, нікеля та хрому і вуглецевими сталями, які модифіковані наночастинами, підвищується стійкість напавленого інструменту, який зазнає циклічного температурно-силового впливу. При модифікуванні наночастинами усуваються зони транскристалізації в напавленому або зварному металі, зменшуються розміри дендритів, поліпшується морфологія і топографія зміцнюючих фаз, що сприяє підвищенню жароміцності та опору втомі сплавів [49]. Є певні обмеження наномодифікування металу при автоматичному і ручному дуговому зварюванні. Основною проблемою застосування нанокомпозитів при зварюванні плавленням є проблема введення останніх у зварювальну ванну. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є розробка новітніх технологій виготовлення зварювальних і наплавлювальних матеріалів (електроди, флюси, порошкові дроти) із додаванням високодисперсних наноструктурних модифікаторів, отриманих на базі енерго-

фективного методу ВЕР. Це є новим підходом до підвищення службових характеристик зварних конструкцій, що базується на електроімпульсних процесах.

Таким чином, досвід багаторічних досліджень впливу електромагнітних технологій на метали і сплави доводить можливість їх застосування для керування напруженим станом, еволюцією структури, трибологічними і механічними характеристиками, подовженням ресурсу зварних конструкцій в різних галузях машинобудування, металургійного комплексу, авіакосмічної та військової промисловості.

Перелік літератури

1. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры метала шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматическая сварка*, 3, 24–29.
2. Дубоделов В.І., Горюк М.С. (2018) Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2–х т. Т.2. Київ, Академперіодика, сс. 24–50.
3. Опара В.С., Резникова Л.Я., Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю. (1998) Электрогидроимпульсная обработка – универсальный и эффективный метод повышения служебных характеристик металлоконструкций с технологическими напряжениями. *Тяжелое машиностроение*, 9, 7–9.
4. Хромов В.Н., Кузнецов И.С., Петрашов А.С. (2009) Электроискровая обработка поверхностей деталей для создания износостойких объемных наноструктурных покрытий на режущих деталях сельхозтехники. *Вестник ОрелГАУ*, 1, 6–8.
5. Узлов И.Г. (2003) Прогрессивные процессы производства и качество железнодорожных колес. *Сталь*, 5, 69–72.
6. Волкогон В.М., Аврамчук С.К., Стрилец Е.В. (2005) Формирование упрочняющих покрытий под действием мощного электрического разряда. *Материалы 5-ой Международной науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий»*, Ялта, 21–24 мая, сс. 48–51.
7. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.
8. 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.
9. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.
10. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Гуревич Л.И. (1990) Действие импульсов электрического тока на подвижность дислокаций в монокристаллах Zn. *Металлофизика*, 12(4), 11–15.
11. Okazaki K., Kagana M., Conard H. (1979) Evaluation of the contour, of skin, pinch and heating to the electroplastic effect in titanium. *Scr: Metal*, 3, 473–500.
12. Braunovic M. (1986) The effect of electric current on the stress relaxation of aluminium wire conditions. *Strength metals and alloys (ICSMA 7)*. Oxford e. a., 1, 619–624.
13. Громов В.Е. (1989) О механизмах электропластического эффекта в металлах. *Известия вузов. Черная металлургия*, 9, 71–75.
14. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. (1984) Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность прово-

- дящих материалов. *Известия Академии Наук СССР. Металлы*, **4**, 184–187.
15. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А., Олисов А.Н. (2006) Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока. *Проблемы прочности*, **1**, 116–127.
 16. Троицкий О.А., Калымбетов П.У. (1981) Зависимость электропластического эффекта в цинке от длительности отдельных импульсов. *Физика металлов и металловедение*, **51**, **5**, 1056–1059.
 17. Стрижало В.А., Новоградский Л.С. (1997) Определение энергии электропластической деформации металлов. *Проблемы прочности*, **4**, 38–43.
 18. Стрижало В.А., Воробьев Е.В. (2003) Скачкообразная деформация металла в условиях воздействия импульсного магнитного поля и криогенных температур. *Там же*, **1**, 137–142.
 19. Воробьев Е.В., Анпилогова Т.В. (2007) Нестабильность деформации и прочность конструкционных сплавов в условиях концентрации напряжений и криогенных температур. *Там же*, **2**, 153–156.
 20. Dolgin A.M., Natsik V.D. (1991) Criteria of instability and kinetics of jumps under unstable low temperature plastic flow. *Acta. Univ. Carol. Math. and Phys.*, **32**(1), 77–88.
 21. 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. *Material Science & Engineering*, **A0**, 16–25.
 22. Batainen O., Klamecki B., Koepe B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. Mater. Process. Tech.*, **13**, 190–196.
 23. Babutsky A., Chrysanthou A., Ioannou J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of materials*, **4**, 387–391.
 24. Семашко Н.А., Крупский Р.Ф., Купов А.В. (2004) Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов. *Материаловедение*, **7**, 29–33.
 25. Семакин Е.В., Чиракидзе Д.З., Целлермаер В.Я. (1997) Электростимулированное восстановление долговечности сварных соединений: эксперимент и модель. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, **6**, 48–51.
 26. Баранов Ю.В. (2003) Дефектообразование и залечивание дефектов в металлических материалах импульсным электрическим током. *Сб. докладов конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов»*. Материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, сс. 7–12.
 27. Jaewoong Jang, Yang Ju, Yasuyuki Morita, Yuki Toku (2016) Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al alloy. *21-st European Conference on Fracture, ECF21, 20–24 June 2016, Catania, Italy*, 2989–2993.
 28. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. (2007) Моделирование релаксации напряжений при действии импульсного электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, **2**, 113–120.
 29. Степанов Г.В., Бабуцкий А.М., Мамеев И.А. и др. (2011) Перераспределение остаточных сварочных напряжений в результате обработки импульсным электромагнитным полем. *Там же*, **3**, 123–131.
 30. 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.
 31. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Change of mechanical properties of welded joints of carbon and low-alloy steels under influence of electromagnetic effects. *The Paton Welding J.*, **7**, 27–30.
 32. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr₂Ni₄A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **4**, 218–224.
 33. 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.
 34. Lobanov L., Pivtorak V., Paschin N. et al. (2014) Application of local current pulses for determination and control of residual stresses. *Advanced Materials Research*, **9**, 386–391.
 35. Гнатов А.В. (2012) Магнито-импульсные технологии для бесконтактной рихтовки корпусных элементов транспортных средств. *Научовий вісник ХДМА*, **7**(2), 108–114.
 36. Hodowant J., Ravichndram G., Rosakis A., Rosakis P. (2000) Partition of plastic work into heat and stored energy in metal. *Exp. Mech.*, **40**(2), 113–123.
 37. Альшиц В.И., Дарьинская Е.В., Легеньков М.А., Морозов В.А. (1999) Движение дислокаций в кристаллах NaCl при комбинированном воздействии механических и электромагнитных импульсов, создаваемых электронным пучком. *Физика твердого тела*, **41**(11), 2004–2006.
 38. Громов В.Е., Гуревич Л.И., Курилов В.Ф., Ерилова Т.В. (1989) Влияние импульсов тока на подвижность и размножение дислокаций в Zn. *Проблемы прочности*, **0**, 48–53.
 39. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Покляцкий А.Г. (2010) Влияние электроимпульсной обработки на остаточные формоизменения тонколистовых сварных конструкций (Обзор). *Там же*, **3**, 13–17.
 40. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Скульский В.И. (2005) Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей. *Там же*, **5**, 13–17.
 41. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhiltsov A.V., Mikhodui O.L. (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. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>.
 42. Лобанов Л.М., Кондратенко И.П., Жильцов А.В. та ін. (2016) Нестационарні електрофізичні процеси в системах для зниження залишкових напружень зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*, **6**, 10–19.
 43. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. (2017) Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Там же*, **5**, 83–88.
 44. Лобанов Л.М., Пашин М.О., Міходуй О.Л. та ін.. (2017) Вплив ударної дії електрода – індентора на напружено-деформований стан сплаву АМг6 при електродинамічній обробці. *Проблемы прочности*, **3**, 30–42.
 45. Лобанов Л.М., Пашин М.О., Півторак В.А., Волков С.С. (2015). *Спосіб усунення залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань*, Україна, Пат. 110273.
 46. Дубоделов В.І., Середненко О.В., Затуловський А.С., Середненко В.О. (2018) Підвищення властивостей сплавів алюмінію дією постійного магнітного поля на розплав при твердненні. *Металознавство та обробка металів*, **4**, 3–8.
 47. Сизоненко О.Н., Липян Е.В., Торпаков А.С. (2015) К вопросу об оптимизации параметров высоковольтной импульсной обработки. *Наукові нотатки*, **6**, 203–207.
 48. Зайченко А.Д., Жданов О.О., Торпаков А.С., Сизоненко О.М. (2018) Вплив високодисперсного модифікатора на структуру та властивості нікелевого сплаву СМ88У. *Металознавство та обробка металів*, **4**, 55–57.
 49. Сергієнко Р.А., Верховлюк А.М. (2018) Обробка ливарних сплавів металевими наночастинками. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2–х т. Т. 2. Київ, Академперіодика, сс. 88–103.

References

1. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal refining in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25–28.
2. Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018) *Application of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena for intensification of effect on metal systems:*

- World and Ukrainian experience.* In: Materials science: Achievements and perspectives. In: 2 Vol. Vol. 2. Kyiv, Akhademperiodyka, 24-50 [in Ukrainian].
3. Opara, V.S., Reznikov, L.Ya., Onatskaya, N.A., Demidenko, L.Yu. (1998) Electrohydropulsed treatment as a universal and effective method for improvement of service characteristics of metal structures with technological stresses. *Tyazholoe Mashinostroenie*, **0**, 7-9 [in Russian].
 4. Khromov, V.N., Kuznetsov, I.S., Petrashov, A.S. (2009) Electrosark machining of surfaces of parts for producing wear-resistant volume nanostructural coatings on cutting parts of farming machines. *Vestnik OrelGAU*, **1**, 6-8 [in Russian].
 5. Uzlov, I.G. (2003) Advanced processes of production and quality of railway wheels. *Stal*, **5**, 69-72 [in Russian].
 6. Volkogon, V.M., Avramchuk, S.K., Strilets, E.V. (2005) Formation of strengthening coatings under action of high-power electric discharge. In: *Proc. of 5th Int. Sci.-Techn. Conf. on Surface Engineering and Renovation of Products (Yalta, 21-24 May, 2005)*, 48-51.
 7. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Yu.S. (2001) *Physical principles of electropulse and electroplastic machining and new materials*. Moscow, MGIU [in Russian].
 8. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in long rod, caused by pulse electric current of high density. *Problemy Prochnosti*, **4**, 60-67 [in Russian].
 9. Strizhalo, V.A., Novogradsky, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account the effect of electromagnetic fields*. Kiev, IPS [in Russian].
 10. Zuev, L.B., Gromov, V.E., Gurevich, L.I. (1990) Effect of electric current pulses on dislocation mobility in single crystals Zn. *Metallofizika*, **12(4)**, 11-15 [in Russian].
 11. Okazaki, K., Kagana, M., Conrad, H. (1979) Evaluation of the contour, of skin, pinch and heating to the electroplastic effect in titanium. *Ibid.*, **3**, 473-500.
 12. Braunovic, M. (1986) The effect of electric current on the stress relaxation of aluminium wire conditions. *Strength Metals and Alloys (ICSMA 7)*, Oxford, **1**, 619-624.
 13. Gromov, V.E. (1989) On mechanisms of electroplastic effect in metals. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **0**, 71-75 [in Russian].
 14. Beklemishev, N.N., Koryagin, N.I., Shapiro, G.S. (1984) Effect of local heterogeneous pulsed electromagnetic field on plasticity and strength of conducting materials. *Izv. AN SSSR. Metall.*, **4**, 184-187 [in Russian].
 15. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A., Olisov, A.N. (2006) Analysis of process of tensile stress relaxation under electric current effect. *Problemy Prochnosti*, **1**, 116-127 [in Russian].
 16. Troitsky, O.A., Kalymbetov, P.U. (1981) Dependence of electroplastic effect in zinc on duration of separate pulses. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **51(5)**, 1056-1059 [in Russian].
 17. Strizhalo, V.A., Novogradsky, L.S. (1997) Determination of energy of electroplastic deformation of metals. *Problemy Prochnosti*, **4**, 38-43 [in Russian].
 18. Strizhalo, V.A., Vorobiov, E.V. (2003) Stepwise deformation of metal under conditions of effect of pulsed magnetic field and cryogenic temperatures. *Ibid.*, **1**, 137-142 [in Russian].
 19. Vorobiov, E.V., Anpilogova, T.V. (2007) Instability of deformation and strength of structural alloys under conditions of stress concentration and cryogenic temperatures. *Ibid.*, **2**, 153-156 [in Russian].
 20. Dolgin, A.M., Natsik, V.D. (1991) Criteria of instability and kinetics of jumps under unstable low temperature plastic flow. *Acta Univ. Carol. Math. and Phys.*, **32(1)**, 77-78.
 21. 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. & Engin.*, **A0**, 16-25.
 22. Batainen, O., Klamecki, B., Koepke, B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. Mater. Process. Tech.*, **3**, 190-196.
 23. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of Materials*, **4**, 387-391.
 24. Semashko, N.A., Krupsky, R.F., Kupov, A.V. (2004) Acoustic emission in electropulsed deformation of titanium alloys. *Materialovedenie*, **7**, 29-33 [in Russian].
 25. Semakin, E.V., Chirakidze, D.Z., Tsellermayer, V.Ya. (1997) Electric simulation restoration of service life of welded joints: Experiment and model. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **6**, 48-51 [in Russian].
 26. Baranov, Yu.V. (2003) Formation of defects and healing of defects in metallic materials by pulsed electric current. In: *Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. on Effect of Electromagnetic Fields on Plasticity and Strength of Materials (Voronezh)*, 17-12.
 27. Jaewoong Jang, Yang Ju, Yasuyuki Morita, Yuki Toku (2016) Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al alloy. In: *Proc. of 21st Europ. Conf. on Fracture, ECF21 (20-24 June 2016, Catania, Italy)*, 2889-2993.
 28. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I. (2007) Modeling of stress relaxation under effect of pulsed electric current of high density. *Problemy Prochnosti*, **2**, 113-120 [in Russian].
 29. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. et al. (2011) Redistribution of residual welding stresses as a result of treatment by pulsed electromagnetic field. *Ibid.*, 123-131 [in Russian].
 30. 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.
 31. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Change of mechanical properties of welded joints of carbon and low-alloy steels under influence of electromagnetic effects. *The Paton Welding J.*, **7**, 27-30.
 32. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **4**, 218-224.
 33. 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 steels. *The Paton Welding J.*, **9**, 22-25.
 34. Lobanov, L., Pivtorak, V., Pashchin, N. et al. (2014) Application of local current pulses for determination and control of residual stresses. *Advanced Mater. Research*, **90**, 386-391.
 35. Gnatov, A.V. (2012) Magnetic pulsed technologies for contact-less dressing of hull components of transport vehicles. *Maukovyiy Visnyk KhDMA*, **7(2)**, 108-114 [in Russian].
 36. Hodowant, J., Ravichndram, G., Rosakis, P. (2000) Partition of plastic work into heat and stored energy in metal. *Exp. Mech.*, **40(2)**, 113-123.
 37. Alshits, V.I., Dariinskaya, E.V., Legenkov, M.A., Morozov, V.A. (1999) Dislocation mobility in NaCl crystals under combination impact of mechanical and electromagnetic pulses, formed by electron beam. *Fizika Tvyordogo Tela*, **41(11)**, 2004-2006 [in Russian].
 38. Gromov, V.E., Gurevich, L.I., Kurilov, V.F., Erilova, T.V. (1989) Effect of current pulses on mobility and multiplication of dislocations in Zn. *Problemy Prochnosti*, **0**, 48-53 [in Russian].
 39. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Poklyatsky, A.G. (2010) Effect of electric pulsed treatment on residual forming of thin sheet welded structures (Review). *Ibid.*, **3**, 13-17 [in Russian].
 40. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Skulsky, V.Yu. (2005) Effect of electrodynamic treatment on stress-strain state of heat-resistant steels. *Ibid.*, **5**, 13-17 [in Russian].
 41. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V., Mikhodui, O.L. (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**, Issue 4, <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>.

42. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V. et al. (2016) Nonstationary electrophysical processes in systems for reduction of residual stresses in welded joints. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 10-19 [in Ukrainian].
43. Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V., Pashchin, M.O., Vasyuk, V.V. (2017) Selection of parameters of electromechanical converter of induction type for electrodynamic treatment of welded joints. *Ibid.*, **5**, 83-88 [in Ukrainian].
44. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Mikhoduj, O.L. et al. (2017) Effect of impact action of electrode-indentor on stress-strain state of AMg6 alloy in electrodynamic treatment. *Problemy Prochnosti*, **3**, 30-42 [in Ukrainian].
45. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Pivtorak, V.A., Volkov, S.S. (2015) *Method of removal of residual stresses and strains of welded joints*. Ukraine Pat. 110273 [in Ukrainian].
46. Dubodelov, V.I., Serednenko, O.V., Zatulovsky, A.S., Serednenko, V.O. (2018) Improvement of properties of aluminium alloys by action of constant magnetic field on melt in solidification. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **4**, 3-8 [in Ukrainian].
47. Sizonenko, O.N., Lipyay, E.V., Torpakov, A.S. (2015) To problem of parameter optimization by high-voltage pulsed treatment. *Naukovi Notatky*, **6**, 203-207 [in Russian].
48. Zajchenko, A.D., Zhdanov, O.O., Torpakov, A.S., Syzonenko, O.M. (2018) Influence of high-dispersed modifier on structure and properties of SM88U nickel alloy. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **4**, 55-57 [in Ukrainian].
49. Serhienko, R.A., Verkhovlyuk, A.M. (2018) Treatment of cast alloys by metallic nanoparticles. In: *Materials science: Achievements and perspectives*. In: 2 Vol. Vol. 2. Kyiv, *Akadempriodyka*, 88-103 [in Ukrainian].

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПРИ СВАРКЕ И В РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Л.М. Лобанов¹, Н.А. Пашчин¹, А.В. Черкашин¹, О.Л. Миходуй¹, И.П. Кондратенко², А.Н. Сизоненко³

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт электродинамики НАН Украины. 03057, г. Киев, просп. Победы, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

³Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины.

54018, г. Николаев, просп. Богоявленский, 43А. E-mail: office.iipt@nas.gov.ua

Разработка и внедрение новых энергосберегающих технологий отвечает современным требованиям Украины. В работе рассмотрены предпосылки, современное состояние и направления развития изучения влияния электромагнитных полей на механические свойства и напряженное состояние металлических материалов и сварных соединений. Показана возможность их применения для управления напряженным состоянием, эволюцией структуры, свойствами, продлением ресурса сварных конструкций. Библиогр. 49.

Ключевые слова: электромагнитные технологии обработки, электромагнитные поля, сварные соединения, конструкции, металлические материалы, импульсные искровые и токовые разряды, электропластический эффект, напряженно-деформированное состояние, нанодисперсные модификаторы

PROSPECTS OF APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN WELDING AND RELATED PROCESSES

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchin¹, O.V. Cherkashyn¹, O.L. Mikhoduy¹, I.P. Kondratenko², O.M. Sizonenko³

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

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

E-mail: ied1@ied.org.ua

³Institute of pulse processes and technologies of the NAS of Ukraine.

43a Bohoyavlensky Ave., 54018, Mykolayiv, Ukraine. E-mail: office.iipt@nas.gov.ua

Development and introduction of new energy-saving technologies meets the modern demands of Ukraine. In the paper background, current state and directions of development of studying the influence of electromagnetic fields on mechanical properties and the stressed state of metal materials and welded joints are considered. The possibility of their application for control of the stressed state, the evolution of structure, properties, elongation of the life of welded structures is shown. 49 Ref.

Keywords: electromagnetic treatment technologies, electromagnetic fields, welded joints, structures, metal materials, pulsed sparks and current discharges, electroplastic effect, stress-strain state, nanodispersed modifiers

Надійшла до редакції 26.02.2019