

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЗВАРЕНИХ ПІД ВОДОЮ З'ЄДНАНЬ\*

С.Ю. Максимов, О.М. Берднікова, О.О. Прилипко, Т.О. Алексеєнко, Є.В. Половецький, А.А.Радзівська

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

В розробленому комп'ютерному додатку Proj5.exe реалізовано ідею послідовного обчислення величин, де значення величини зварювального струму/напруги і струму/напруги в індукторі зовнішнього електромагнітного впливу підбирається дослідником. Це дозволяє підвищити ефективність досліджень з мінімальною кількістю експериментів під водою. З використанням отриманих параметрів зовнішнього електромагнітного поля виконані наплавлення під водою порошковим дротом ППС-АН1 на пластину із низьколегованої сталі 09Г2С. Дослідженнями встановлено, що використання зовнішнього електромагнітного впливу сприяє подрібненню зеренної структури наплавленого металу та зменшенню частки неметалевих включень при помітному їх диспергуванні. Крім того, в металі зони термічного впливу зменшуються параметри пакетної структури бейніту, спостерігається більш рівномірний рівень мікротвердості при подрібненні субструктури. Зовнішнє електромагнітне поле значно впливає на дислокаційну структуру металу, сприяє рівномірному та безградієнтному її розподілу, що обумовлює рівномірний рівень дислокаційного зміцнення у локальних об'ємах структури та зниження рівня локальних внутрішніх напружень. Бібліогр. 11, рис. 7.

*Ключові слова:* зварювання під водою, зварні з'єднання, низьколегована сталь, зовнішній електромагнітний вплив, мікроструктура, мікротвердість, бейніт нижній та верхній, дислокації, локальні внутрішні напруження

Вимоги до якості і надійності зварних з'єднань, виконаних і працюючих під водою, постійно зростають. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні під водою протікають в важких, екстремальних умовах, які обумовлюють складність проблем отримання якісних з'єднань. Це пов'язано з інтенсивним тепловідведенням, значним насиченням розплавленого металу воднем, підвищеним тиском навколишнього середовища. Для інтенсифікації процесів його дегазації, зниження вмісту водню, подрібнення структури, підвищення значень показників міцності і пластичності швів пропонується використовувати зовнішній електромагнітний вплив (ЗЕВ) на розплав зварювальної ванни. Максимальне підвищення технологічних і фізико-хімічних властивостей зварних з'єднань досягається в певному діапазоні параметрів електромагнітного впливу, який залежить від типу основного металу і умов зварювання.

Відомо позитивний вплив магнітного поля на властивості і структуру з'єднань при зварюванні конструкційних сталей. Метод електромагнітного перемішування при кристалізації зварювальної ванни використовувався для створення керованого режиму процесу впливу на різних етапах, на стадії, коли йде надходження тепла, і на стадії, коли відсутнє його надходження в ванну.

Інтенсивний термодформаційний вплив на метал, високі температури нагріву, нерівноважні умови кристалізації металу шва, високо- і низькотемпературна пластична деформація, значна хімічна неоднорідність металу впливають на перерозподіл дефектів кристалічної будови у шві та зоні термічного впливу (ЗТВ) зварного з'єднання [1, 2]. Численними дослідженнями встановлено, що застосування будь-якого перемішування на етапі кристалізації (механічне низькочастотне, вібрація, ультразвукова обробка розплаву і т.п.) істотно впливає на формування первинної структури, у тому числі і при дуговому зварюванні. Однак з позиції техніки здійснення процесу перемішування електромагнітний вплив має безперечну перевагу в порівнянні з іншими.

При використанні ЗЕВ істотно знижується різниця в температурах на осі зварювальної ванни і на її бічних крайках, відбувається зниження градієнта температур між центральними і периферійними частинами. Внаслідок вирівнювання середніх температур осьових і периферійних зон зварювальної ванни створюються умови для кристалізації при мінімальних температурних градієнтах ванни.

Дислокації – це дефекти кристалічної будови, що викликають порушення правильного розташування атомів. Вони виникають при зростанні кри-

\* Друкується за матеріалами доповіді на міжнародній конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», ІЕЗ ім. С.О. Патона, Київ, 31 травня – 02 червня 2021 р.

сталу і термодинамічно нерівноважні. Причинами утворення дислокацій можуть бути також концентрація вакансій, скупчення домішок, дія високих напружень. Процес перетворення скупчення точкових дефектів у лінійні йде зі зменшенням вільної енергії кристалів. Зазвичай дефект ґратки збільшує внутрішню енергію і ентропію кристалу [3]. Крім того, дислокаційна структура стає нестійкою при накладенні імпульсного магнітного поля. Це призводить до прискорення руху дислокацій. Виникаючі точкові дефекти вступають у взаємодію з дислокаціями, які викликають їх перерозподіл, і це може призвести до зниження внутрішніх напружень і взаємної анігіляції дислокацій.

Як раніше зазначалося, імпульсна обробка призводить до подрібнення структури, перерозподілу дислокацій, розчиненню надлишкових фаз, гомогенному розподілу домішкових атомів у металі. Все це не може не позначитися на механічних властивостях металу [4, 5].

Ефективність цієї взаємодії визначається густиною струму у зварювальній ванні, де на процес взаємодії магнітного і електричного полів значний вплив чинять фізичні властивості водного середовища. Для його уточнення потрібно визначити характер розподілу ліній електричного струму в зварювальній ванні з урахуванням умов зварювання під водою. На основі цього стає можливим визначення оптимальних параметрів ЗЕВ [6–8].

**Моделювання технологічних параметрів зварювання.** У розробленому комп'ютерному додатку Proj5.exe реалізовано ідею послідовного обчислення величин, де значення величини зварювального струму/напруги і струму/напруги в індукторі зовнішнього електромагнітного впливу підбирається самим дослідником.

Весь процес обчислень, у ході якого реалізується алгоритм, представлений сімома модулями, кожному з яких відповідає своя екранна форма, де операції виконуються у послідовності, що відповідає номерам.

У першому з модулів здійснюється введення даних та початкова їх обробка. Далі у модулі 2 реалізується обчислення напруженості поля і густини постійного зварювального струму. У модулі 3 виконується обчислення у всіх складових дугового зварювання вихрових струмів і струмів намагніченості, створених індуктором. У модулі 4 обчислюється індукція магнітного поля, створеного індуктором. У модулі 5 проходить обчислення вихрових струмів, струмів намагніченості і зарядів для синусоїдального зварювального струму. В останньому модулі 6 виконується обчислення напруженості поля і густини зварювального струму. Екранна форма для модуля 6 після виконання перших 6 передбачених дій представлена на рис. 1.

**Мікроструктура.** В результаті практичного експерименту наплавленням порошковим дротом ППС-АН1 на пластину із низьколегованої сталі 09Г2С товщиною 12 мм було отримано шви без застосування та із застосуванням ЗЕВ на режимах зварювання: струм  $I = 180...200$  А, напруга на дузі  $U = 30...31$  В, швидкість зварювання  $v = 2,2$  мм/с (8 м/год).

Дослідження мікроструктури проводили методами світлової (мікроскопи Neophot-32 і Versamet-2, Японія) та растрової електронної мікроскопії (скануючий електронний мікроскоп SEM-515 фірми Philips, Нідерланди). Мікротвердість металу вимірювали на твердомірі М-400 (фірми Лесо, США) при навантаженні 0,1 кг. Було досліджено структурно-фазовий склад, параметри зернової та пакетної структури основного ме-

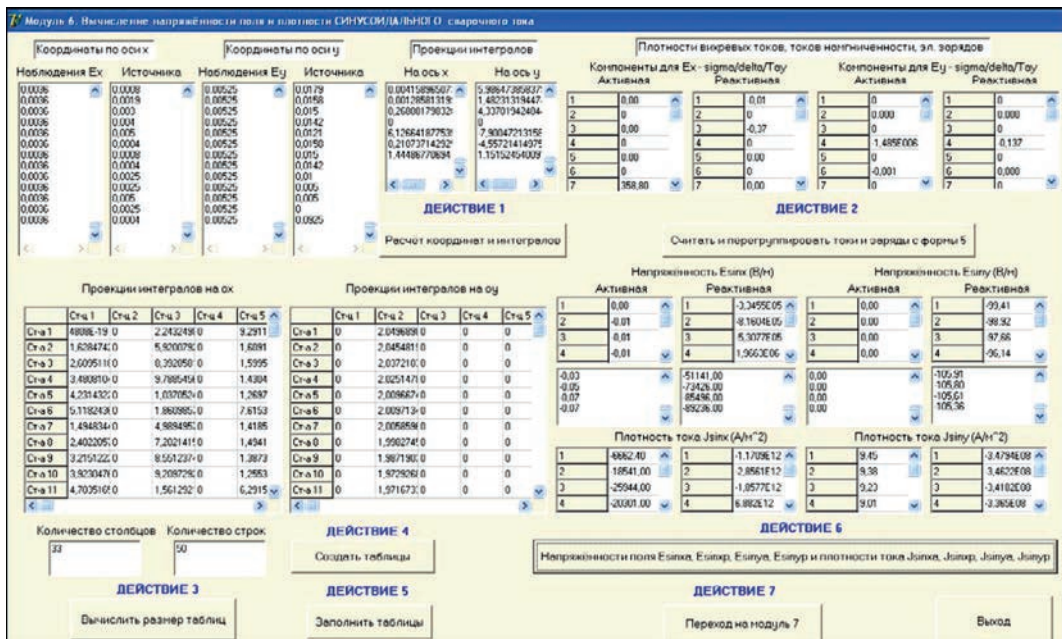


Рис. 1. Екранний вигляд останнього модуля розрахунку параметрів зовнішнього електромагнітного поля

талу та пакетної структури металу ЗТВ ( $D$ ), швів ( $l_{кр} \times h_{кр}$ , де  $h_{кр}$  – ширина;  $l_{кр}$  – довжина кристалітів), розмір неметалевих включень (НВ). Досліджували зварні шви та ділянки ЗТВ: перегріву (великого зерна – I ЗТВ), перекристалізації (II), неповної перекристалізації (III), рекристалізації (IV ЗТВ). Дослідження структури та мікротвердості металу зварних з'єднань було проведено у декількох зонах («А», «В»), що зображені на рис. 2, а.

Металографічними дослідженнями показано, що структура основного металу сталі 09Г2С феритно-перлітна ( $D_3 = 5...10$  мкм,  $HV = 1650...1990$  МПа (рис. 2, б)).

Структура наплавленого металу зразків, що отримали без застосування та із застосуванням ЗЕВ, феритна з розміром кристалітів  $l_{кр} \times h_{кр} = 50...150 \times 200...800$  мкм та  $30...80 \times 100...500$  мкм, відповідно, при однаковій мікротвердості ( $HV = 1700...1870$  МПа). Наплавленому металу зразків в обох випадках притаманно формування НВ силікатного типу різних розмірів. У металі шва без застосування ЗЕВ – це великі НВ переважно розміром  $10...60$  мкм (рис. 3, а). При застосуванні ЗЕВ кількість НВ та їх розмір помітно зменшуються (переважно  $1...3$  мкм та одиничні до  $10$  мкм), рис. 3, б.

Встановлено, що ЗЕВ сприяє подрібненню зеренної структури наплавленого металу та зменшенню частки НВ при помітному їх диспергуванні, що буде забезпечувати високий рівень механічних властивостей металу.

Дослідженнями мікроструктури ЗТВ зразків показано, що у I; II та III ЗТВ формується бейнітна структура (нижній та верхній бейніт, рис. 4), а у IV ЗТВ феритно-бейнітна.

Без застосування ЗЕВ у зоні «А» розмір пакетів складає:  $D_n = 10...40$  мкм при  $HV = 3220...3830$  МПа (I ЗТВ);  $D_n = 10...20$  мкм при  $HV = 3660...4010$  МПа (II ЗТВ);  $D_n = 8...14$  мкм при  $HV = 3220...3660$  МПа (III ЗТВ) та  $D_n = 5...8$  мкм при  $HV = 2210...2850$  МПа (IV ЗТВ) (рис. 5, а). При переході у корінь шва в зоні «В» з боку I ЗТВ спостерігається укрупнення пакетної структури до  $D_n = 30...80$  мкм при зменшенні мікротвердості ( $HV = 3220...3660$  МПа) (рис. 5, б). Такі градієнти по структурним параметрам можуть сприяти появі градієнтів властивостей міцності металу.

Дослідженнями зразків, що отримали із застосуванням ЗЕВ, встановлено, що параметри пакетної структури металу I – III ЗТВ зменшуються:  $D_n = 10...30$  мкм при  $HV = 3360...3830$  МПа (I ЗТВ);  $D_n = 10...15$  мкм

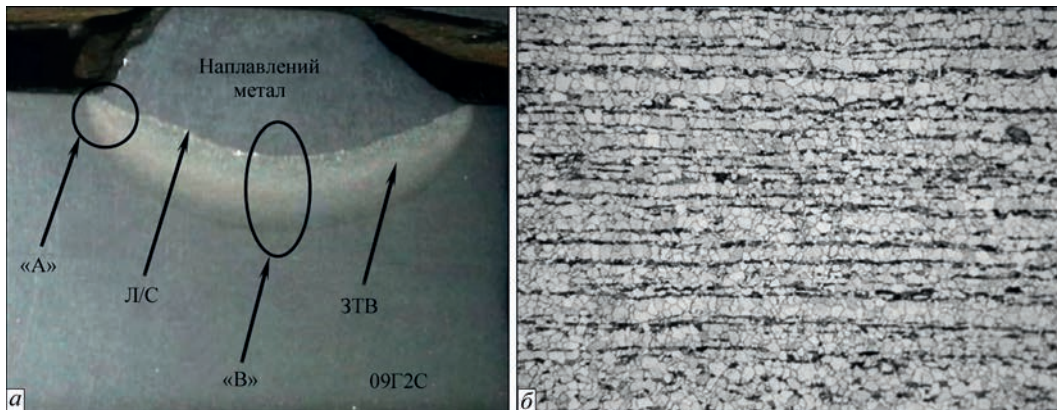


Рис. 2. Макроструктура зварного з'єднання (а) та мікроструктура основного металу сталі 09Г2С (б,  $\times 250$ )

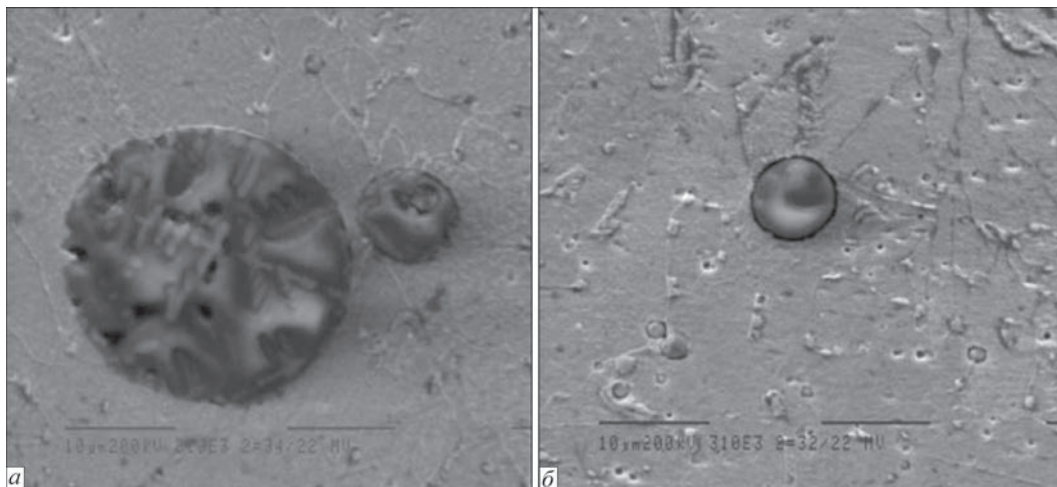


Рис. 3. Неметалеві включення у наплавленому металі зразків, що отримані без застосування (а) та з застосуванням ЗЕВ (б),  $\times 3100$

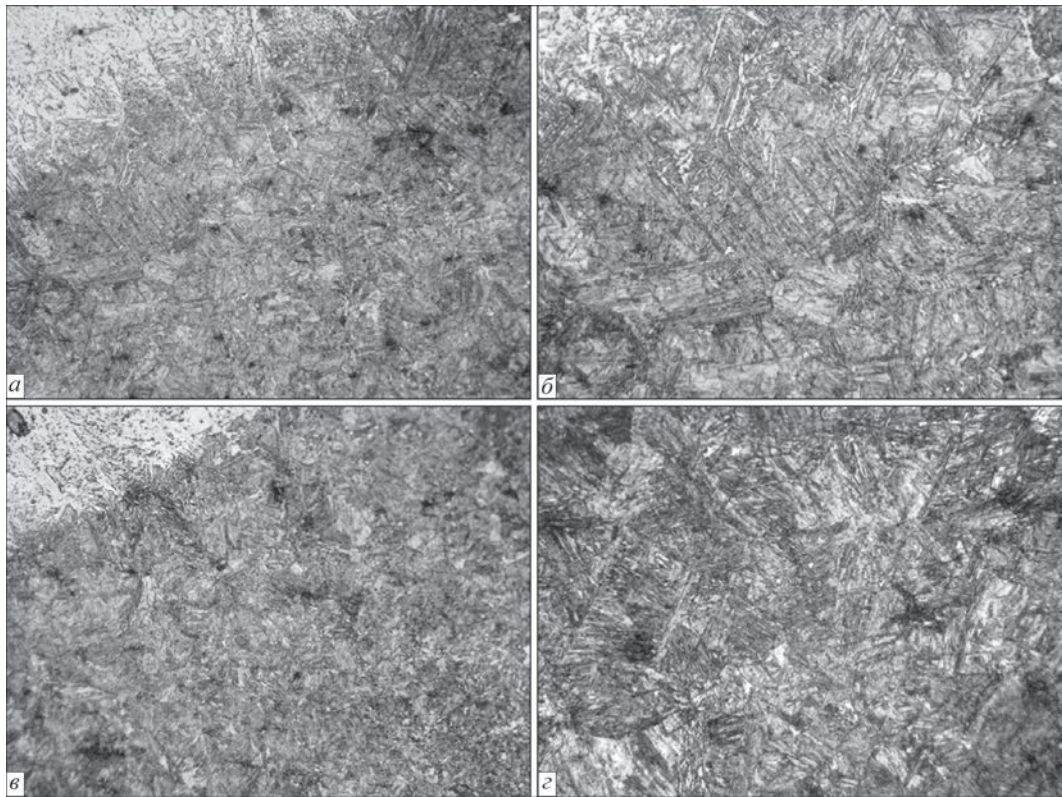


Рис. 4. Мікроструктура лінії сплавлення (а, б,  $\times 250$ ) та I ділянки ЗТВ (б, с,  $\times 500$ ) зразків, що отримані без застосування (а, б) та із застосуванням ЗЕВ (б, с)

при  $HV = 3360 \dots 3510$  МПа (II ЗТВ);  $D_{II} = 8 \dots 12$  мкм при  $HV = 3220 \dots 3510$  МПа (III ЗТВ), спостерігається деяке зниження мікротвердості (рис. 5, в). При переході у корінь шва (зона «В») з боку I ЗТВ знижується мікротвердість, структура укрупнюється, але не так помітно, як у разі зварювання без ЗЕВ (рис. 5, г).

Зіставленням параметрів структурно-фазового складу досліджуваних зразків встановлено, що у наплавленому металі без застосування ЗЕВ великокристалічна феритна структура при наявності значної кількості НВ переважно великого розміру, у металі ЗТВ спостерігаються найбільші градієнти за мікротвердістю та роз-

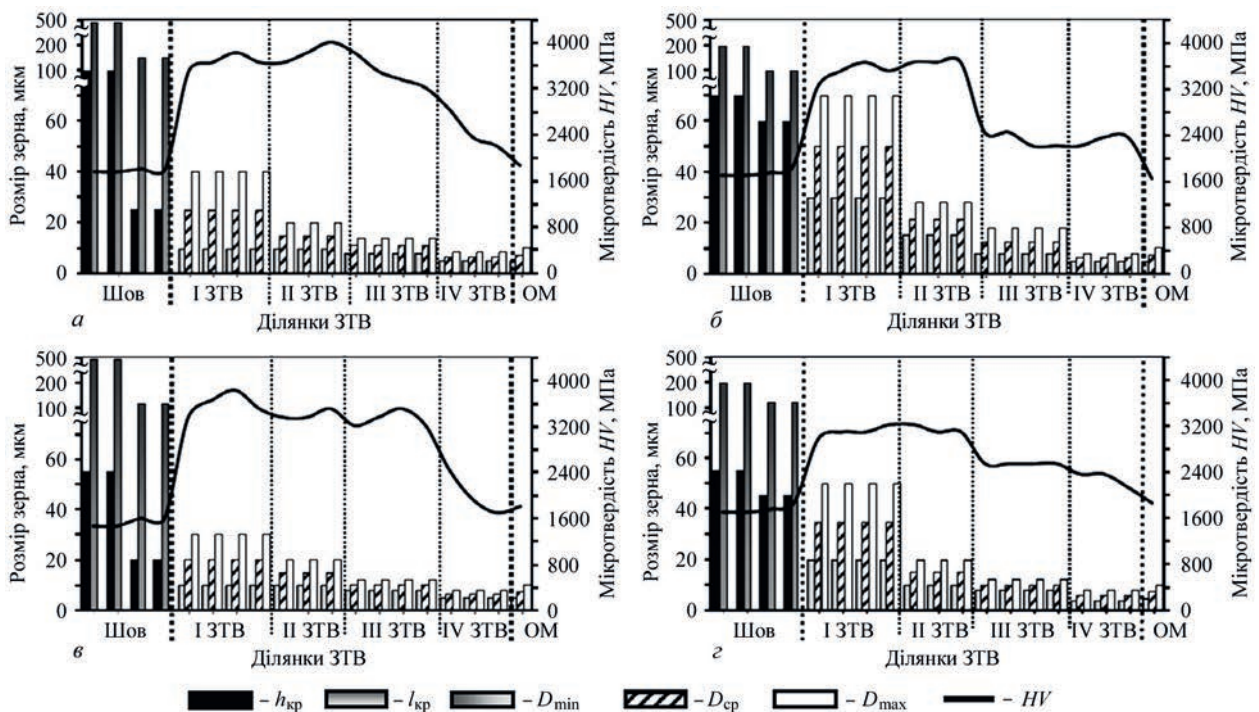


Рис. 5. Зміна параметрів зернової структури – кристалів ( $h_{кр}$  – ширина;  $l_{кр}$  – довжина), пакетів ( $D$ ), мікротвердості ( $HV$ ) у металі швів та ЗТВ зразків, що отримані без застосування (а, б) та з застосуванням ЗЕВ (в, г) по зонах «А» (а, в) та «В» (б, г)

мірами пакетної структури бейнітних складових (рис. 5, а, б).

При застосуванні ЗЕВ у металі швів та ЗТВ спостерігається більш рівномірний рівень мікротвердості при подрібненні структури (рис. 5, в, г) та відсутності великих НВ у наплавленому металі, що буде забезпечувати більш рівномірний рівень міцності металу.

**Дислокаційна структура.** Методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ, мікроскоп JEM-200СХ фірми JEOL, Японія) було детально досліджено тонку структуру металу зразків з найбільшими структурними змінами – дислокаційну структуру металу ділянки перегріву (І ЗТВ). Дослідженнями встановлено, що в металі зразка, отриманого без застосування ЗЕВ, грубопластинчатій рейковій структурі (ширина рейок  $h_p = 0,5 \dots 1,0$  мкм) бейніту верхньому ( $B_v$ ) притаманно формування градієнтів по густині дислокацій ( $\rho$ ) від  $\rho = (2 \dots 4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $\rho = (8 \dots 10) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  по границях структурних складових (рис. 6, а).

Застосування ЗЕВ призводить до помітних змін у внутрішній структурі пакетів  $B_v$ , а саме до

рівномірного перерозподілу дислокацій при зменшенні їх густини до  $\rho = (1,8 \dots 3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  та подрібненні рейкової структури ( $h_p = 0,2 \dots 0,8$  мкм) (рис. 6, б).

Структура бейніту нижнього ( $B_n$ ) у металі ЗТВ досліджуваних зразків більш дисперсна ( $h_p = 0,1 \dots 0,4$  мкм, рис. 6, в), розподіл густини дислокацій носить безградієнтний характер при  $\rho = (1 \dots 4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (без ЗЕВ) та  $\rho = (1 \dots 3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (із ЗЕВ).

В результаті встановлено, що застосування ЗЕВ значно впливає на дислокаційну структуру металу, сприяє рівномірному та безградієнтному її розподілу [9]. У більш значній мірі такі структурні зміни характерні для структур  $B_v$ . У разі формування грубопластинчатих структур  $B_v$  з дислокаційними скупченнями (без ЗЕВ), високою густиною дислокацій, зонами локалізації деформації збільшується рівень локальних внутрішніх напружень у структурі, що може призводити до тріщиноутворення (рис. 7).

Враховуючи той факт, що практично всі механізми структурного зміцнення металу обумовлені між-дислокаційною взаємодією: у разі твердорозчинного

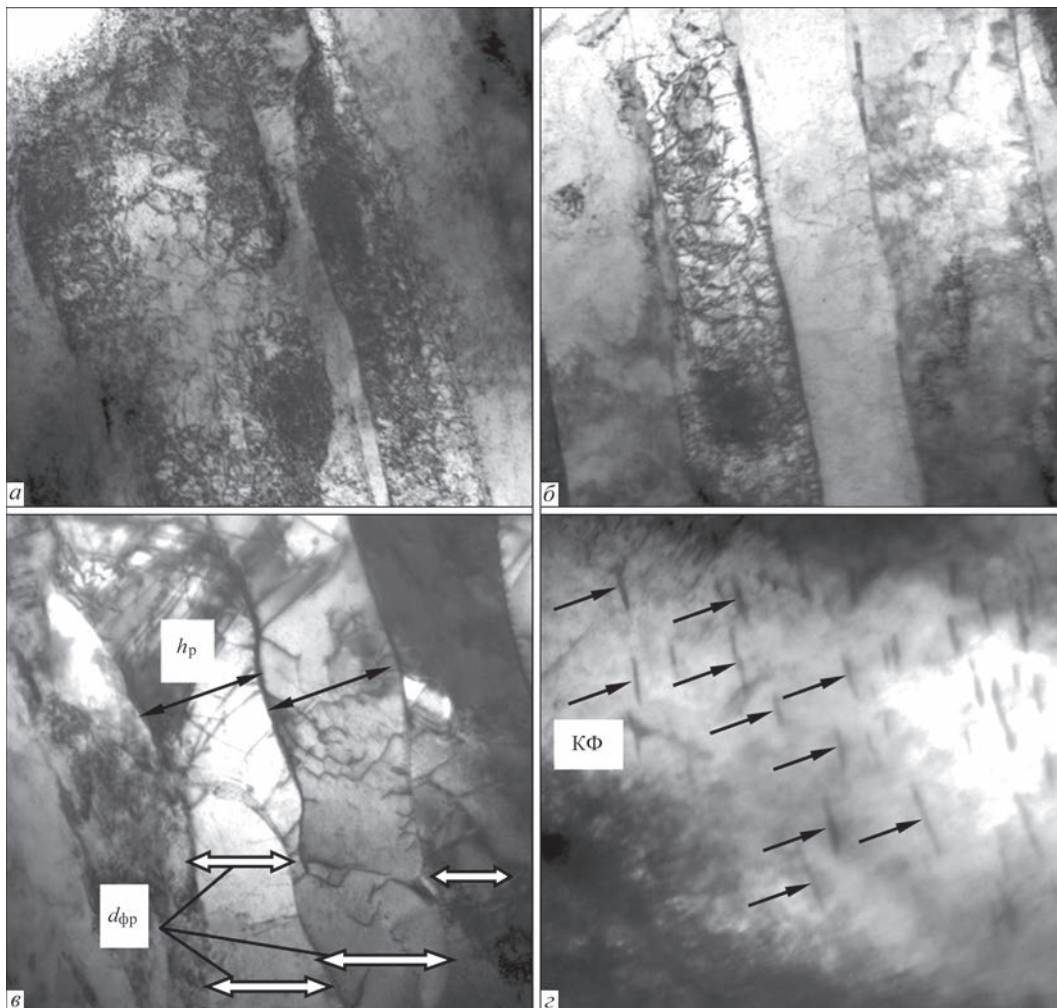


Рис. 6. Тонка структура бейніту верхнього (а, б,  $\times 35000$ ) та нижнього (в, г,  $\times 52000$ ) в ділянці перегріву ЗТВ зварних з'єднань при зварюванні під водою: а – без застосування ЗЕВ; б–г – при застосуванні ЗЕВ

зміцнення – це блокування дислокацій атмосферами з атомів домішок і легуючих елементів; у разі зернограничного та субструктурного зміцнення – розподілом дислокацій в об’ємах та по границях зерен; в разі дисперсійного зміцнення – перерозподілом дислокацій та їх щільністю в матриці металу, насиченою частинками дисперсних фаз, саме дислокаційна структура є одним з визначальних чинників, який обумовлює міцність та тріщиностійкість металу. Градієнтна за розмірами та густиною дислокацій рейкова структура  $B_v$  не буде забезпечувати рівномірний рівень міцності та тріщиностійкість металу.

В структурних складових  $B_v$  з градієнтами по густині дислокацій в об’ємі та по границям локальний рівень дислокаційного зміцнення ( $\Delta\sigma_c$ ) змінюється від  $\Delta\sigma_c = 100$  МПа до 300 МПа (режим без ЗЕВ). У разі застосування ЗЕВ градієнти по густині дислокацій відсутні, що обумовлює рівномірний рівень дислокаційного зміцнення ( $\Delta\sigma_c = 136...175$  МПа) у локальних об’ємах структури [10].

Що стосується внутрішньої структури складової  $B_H$ , характерною особливістю при зварюванні під водою та застосуванні ЗЕВ є наявність фрагментованої субструктури розміром  $d_{фр} = 0,1...0,3$  мкм та чіткими границями

(рис. 6, в). При цьому структура  $B_H$  характеризується наявністю наночастинок карбідних фаз (КФ), рівномірно розподілених по об’єму, розміром  $10...20 \times 30...200$  нм, міжкарбідна відстань при цьому складає  $10...70$  нм (рис. 6, з). Без застосування ЗЕВ розмір карбідних фаз складає  $20...30 \times 50...250$  нм, при цьому відстань між частинками збільшується до  $50...80$  нм. Такі зміни у процесах фазоутворення впливають на рівень субструктурного (за рахунок фрагментації) та дисперсійного зміцнення металу. Згідно залежностям Холла-Петча та Орована [11], рівень субструктурного ( $\Delta\sigma_s$ ) та дисперсійного ( $\Delta\sigma_{д.з.}$ ) зміцнення у структурі  $B_H$  складає  $\Delta\sigma_s = 600$  МПа,  $\Delta\sigma_{д.з.} = 628$  МПа та  $\Delta\sigma_c = 750$  МПа,  $\Delta\sigma_{д.з.} = 725$  МПа у металі зразків, що отримані без застосування та із застосуванням ЗЕВ, відповідно.

Таким чином, встановлено, що застосування ЗЕВ забезпечує подрібнення зеренної структури металу, рівномірний розподіл дислокацій у внутрішніх об’ємах бейнітної структури, відсутність зон локального дислокаційного зміцнення, підвищення субструктурного та дисперсійного зміцнення та зниження рівня локальних внутрішніх напружень.

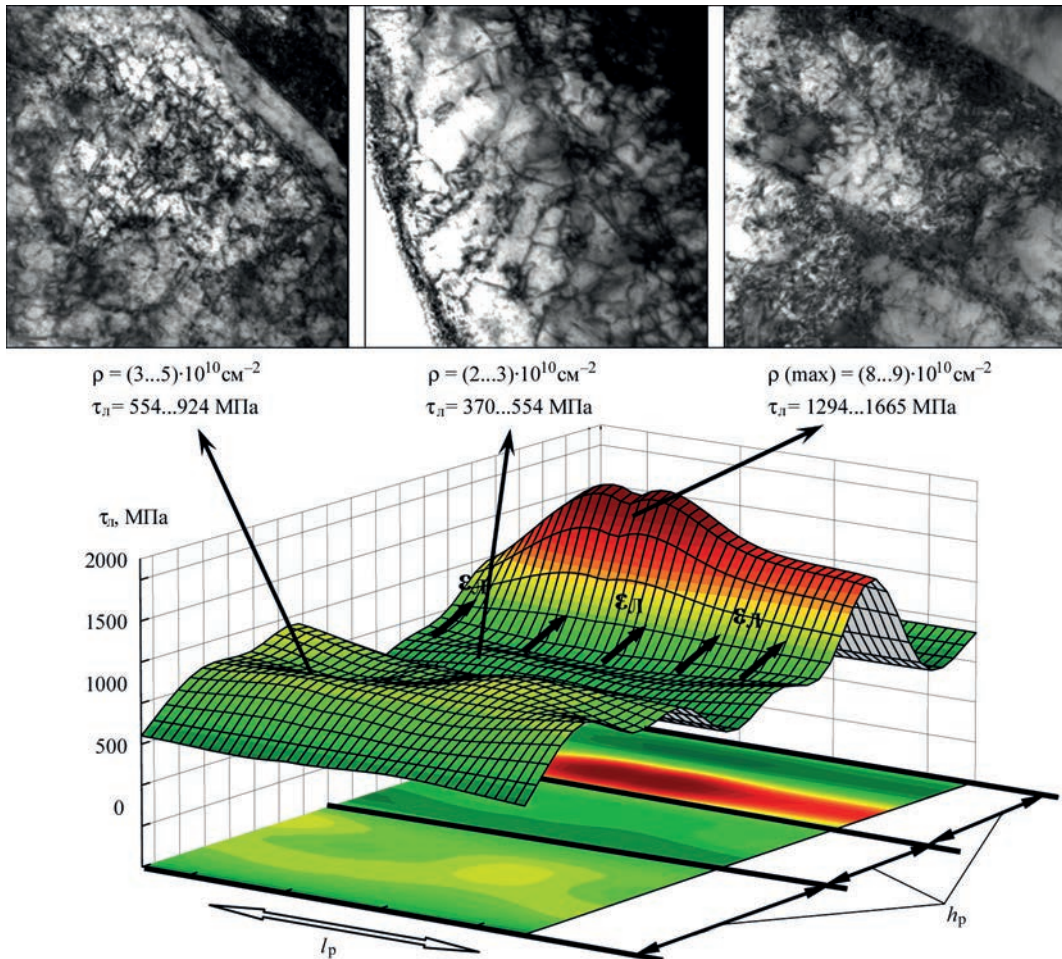


Рис. 7. Розподіл локальних внутрішніх напружень ( $\tau_n$ ) у градієнтних структурних складових бейніту верхнього ( $h_p$  – ширина,  $l_p$  – довжина рейок) із зонами локалізації деформації ( $\epsilon_n$ ) в металі ЗТВ зразка без застосування ЗЕВ та відповідні зображення дислокаційних структур ( $\times 70000$ )

## Висновки

1. Математичне моделювання дозволило інтенсифікувати дослідницький процес зварювання під водою.

2. В розробленому комп'ютерному додатку Proj5.exe реалізовано ідею послідовного обчислення величин, де значення величини зварювального струму/напруги і струму/напруги в індукторі зовнішнього електромагнітного впливу підбирається дослідником.

3. При зварюванні під водою низьколегованої сталі 09Г2С без ЗЕВ та з його застосуванням наплавлений метал зварних швів має феритну структуру за наявності неметалевих включень. У ділянці перегріву (I ЗТВ), перекристалізації (II ЗТВ) та неповної перекристалізації (III ЗТВ) формується бейнітна структура, у ділянці рекристалізації (IV ЗТВ) – феритно-бейнітна.

4. Встановлено, що у наплавленому металі без застосування ЗЕВ у металі швів формується крупнокристалічна структура при наявності неметалевих включень переважно великого розміру. У металі ЗТВ спостерігаються найбільші градієнти за розмірами пакетної структури бейнітних складових та мікротвердості. При застосуванні ЗЕВ у металі швів та ЗТВ структура подрібнюється при рівномірному рівні мікротвердості та відсутності великих неметалевих включень у наплавленому металі.

5. Дослідженнями трансмісійної електронної мікроскопії показано, що у металі ЗТВ формується структура нижнього та верхнього бейніту. Застосування ЗЕВ призводить до змін внутрішньої структури пакетів бейніту верхнього та нижнього, впливає на дислокаційну структуру металу, сприяє рівномірному перерозподілу дислокацій у верхньому бейніті при зменшенні їх щільності та подрібненні рейкової структури, фрагментації нижнього бейніту. Структура бейніту нижнього у металі ЗТВ більш дисперсна, розподіл щільності дислокацій носить безградієнтний характер при наявності наночастинок карбідних фаз, рівномірно розподілених по об'єму. Такі структурні зміни забезпечують відсутність зон локального дислокаційного зміцнення, підвищення субструктурного та дисперсійного зміцнення та зниження рівня локальних внутрішніх напружень.

## Список літератури

1. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д., Прилипко Е.А. (2005) Методика расчета параметров управляющего электромагнитного воздействия при дуговой сварке конструкционных сталей. *Вестник НТТУ «КПИ»*, 45, 176–177.
2. Максимов С.Ю., Прилипко Е.А., Кожухарь В.И., Рыжов Р.Н. (2004) Применение внешних электромагнитных влияний для улучшения механических свойств швов при мокрой подводной сварке. *Автоматическая сварка*, 11, 20.
3. Косевич. Ф.М. (1978) *Дислокации в теории упругости*. Киев, Наукова думка.

4. Лариков Л.Н., Фальченко В.М. (1980) *Влияние высокоскоростного нагружения на массоперенос в железе. Влияние дефектов кристаллической структуры на диффузию и массоперенос при импульсном воздействии*. Киев, Ин-т металлофизики АН УССР, сс. 30–32.
5. Токий В.В., Зайцев В.И., Филатов Б.П. (1973) О механизме формирования упорядоченной дислокационной структуры металлов. *Укр. физ. журнал*, 7, 1178–1181
6. Тозони О.В. (1964) *Математические модели для расчета электрических и магнитных полей*. Киев, Наукова думка.
7. Тозони О.В., Маергойз И.Д. (1974) *Расчет трехмерных электромагнитных полей*. Киев, Техніка.
8. Петрушенко Е.И. (1966) Постановка задачи по расчету вихревых токов в телах произвольной формы. *Известия вузов. Электромеханика*, 11, 1181–1184.
9. Бердникова О.М., Максимов С.Ю., Прилипко О.О. та ін. (2021) Вплив зовнішнього електромагнетного поля на структуру зварних з'єднань під час зварювання під водою. *ФХММ*, 57, 1, 60–68.
10. Maksymov, S.Yu., Berdnikova, O.M., Prilipko, O.O. et al. (2021) Influence of external electromagnetic field on parameters and defects of crystal lattice of metal of welded joints during underwater welding. *The Paton Welding J.*, 1, 23–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.01.0>
11. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. (1986) *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Москва, Металлургия.

## References

1. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D., Prilipko, E.A. (2005) Procedure of calculation of control electromagnetic action parameters in arc welding of structural steels. *Vestnik NTU KPI*, 45, 176–177 [in Russian].
2. Maksymov, S.Yu., Prilipko, E.A., Kozhukhar, V.I., Ryzhov, R.N. (2004) Application of external electromagnetic actions for improvement of mechanical properties of welds in underwater wet welding. *The Paton Welding J.*, 11, 49–51.
3. Kosevich, F.M. (1978) *Dislocations in theory of elasticity*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Larikov, L.N., Falchenko, V.M. (1980) *Influence of high-speed loading on mass transfer in iron. Influence of crystal-line structure defects on diffusion and mass transfer at pulse action*. Kiev, IPM, 30–32 [in Russian].
5. Tokij, V.V., Zajtsev, V.I., Filatov, B.P. (1973) About mechanism of formation of ordered dislocation structure of metals. *Ukr. Fiz. Zh.*, 7, 1178–1181 [in Russian].
6. Tozoni, O.V. (1964) *Mathematical models for calculation of electric and magnetic fields*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Tozoni, O.V., Mayergojz, I.D. (1974) *Calculation of three-dimensional fields*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
8. Petrusenko, E.I. (1966) Problem definition on calculation of eddy currents in bodies of arbitrary shape. *Izv. Vuzov. Elektromekhanika*, 11, 1181–1184 [in Russian].
9. Berdnikova, O.M., Maksimov, S.Yu., Prilipko, O.O. et al. (2021) Influence of external electromagnetic field on welded joint structure during underwater welding. *FKhMM*, 57(1), 60–68.
10. Maksymov, S.Yu., Berdnikova, O.M., Prilipko, O.O. et al. (2021) Influence of external electromagnetic field on parameters and defects of crystal lattice of metal of welded joints during underwater welding. *The Paton Welding J.*, 1, 23–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.01.0>
11. Goldshhtejn, M.I., Litvinov, V.S., Bronfin, B.M. (1986) *Physics of metals of high-strength alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

## MODELING THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE STRUCTURE FORMATION OF JOINTS WELDED UNDER WATER

S.Yu. Maksymov, O.M. Berdnikova, O.O. Prilipko, T.O. Alekseenko, E.V. Polovetsky, A.A. Radzievskaya

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The developed computer application Proj5.exe implements the idea of a sequential calculation of values, where the value of welding current/voltage and current/voltage in the inductor of external electromagnetic influence is selected by the researcher. This allows increasing the efficiency of research works with a minimum number of underwater experiments. Using the obtained parameters of the external electromagnetic field, underwater deposits were performed on a plate of low-alloy steel 09G2S using PPS-AN1 flux-cored wire. The studies showed that the use of external electromagnetic effect facilitates the refinement of the grain structure of the deposited metal and reduction in the share of non-metallic inclusions at their noticeable dispersion. In addition, in the metal of the heat-affected-zone, the parameters of a package structure of bainite decrease and a more uniform level of microhardness during refinement of the substructure is observed. The external electromagnetic field significantly affects the dislocation structure of the metal, contributes to its uniform and gradient-free distribution, which causes a uniform level of dislocation hardening in the local volumes of the structure and a decrease in the level of local inner stresses. 11 Ref., 7 Fig.

*Keywords: underwater welding, welded joints, low-alloy steel, external electromagnetic influence, microstructure, microhardness, lower and upper bainite, dislocations, local inner stresses*

Надійшла до редакції  
14.04.2021

Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

### II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

# НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

6–10 вересня 2021

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор  
ПрАТ «УкрНДІНК»



Офіційний спонсор  
ТОВ «НВФ «Діагностичні  
прилади»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50  
journal@paton.kiev.ua  
posypaiko.yurii@gmail.com  
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2021>