

PACS numbers: 61.72.Ff, 61.72.Lk, 61.72.Mm, 64.70.dg, 81.20.Vj, 81.40.Wx

Керування параметрами кристалічної ґратниці металу зварних з'єднань, виконаних під водою

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

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, НАН України,
вул. Казимира Малевича 11,
03150 Київ, Україна*

Підвищення якості зварних з'єднань, розробка та вдосконалення електродугових процесів і пристроїв вимагають комплексного експериментального і теоретичного дослідження. Одним з найбільш перспективних методів, що забезпечує необхідну міцність і пластичність металу з'єднання є метод зварювання в зовнішньому електромагнетному полі. Перемішування зварювальної ванни чинить суттєвий вплив на процес кристалізації розтопленого металу, газообмінні реакції та формування структури металу шва. Проведені дослідження підтвердили ефективність використання зовнішнього електромагнетного впливу в умовах зварювання під водою для підвищення механічних властивостей металу шва. Для подальшого вдосконалення технології механізованого підводного зварювання було використано методи математичного моделювання, як найбільш раціональні для оптимізації експериментальних досліджень в умовах водного середовища. Математичні моделі дозволили врахувати вплив на властивості зварного з'єднання як первинних чинників, а саме заданого струму і напруги в зварювальному ланцюгу та індукторі, властивостей матеріалів і умов протікання процесу, так і вторинних — формування структури металу шва і зони термічного впливу. Розроблений алгоритм дозволяє спростити розрахунки для оптимізації технологічного процесу і підвищення якості зварного виробу. За допомогою розробленої програми на мові

Corresponding author: Sergii Yuriyovych Maksimov
E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: S. Yu. Maksimov, O. O. Prilipko, O. M. Berdnikova, T. O. Alekseienco, Ye. V. Polovetskiy, and Yu. A. Shepelyuk, Controlling the Parameters of the Metal Crystal Lattice of the Welded Joints Made Underwater, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 5: 713–723 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.05.0713](https://doi.org/10.15407/mfint.43.05.0713).

Delphi 7 проведено чисельні експерименти із дослідження поведінки рідкого металу в зварювальній ванні в залежності від параметрів зовнішнього електромагнетного впливу (ЗЕВ) і режимів зварювання. Металографічними дослідженнями металу зварних з'єднань, виконаних за штатною технологією та на оптимальних режимах ЗЕВ, показано, що в металі ділянки перегріву зварного з'єднання, отриманого без ЗЕВ, спостерігаються найбільші градієнти для розміру рейкових структур верхнього бейніту та густини дислокацій, що призводитиме до нерівномірного розподілу рівня механічних властивостей металу, підвищення локальних внутрішніх напружень і, відповідно, зниження його тріщиностійкості. В металі ділянки перегріву зварного з'єднання, отриманого із застосуванням ЗЕВ, спостерігається диспергування структури при загальному зниженні і рівномірному (безградієнтному) розподілі густини дислокацій в об'ємі структурних складових верхнього і нижнього бейніту, що забезпечує міцність і тріщиностійкість металу. Проведені дослідження підтвердили ефективність використання зовнішнього електромагнетного впливу в умовах зварювання під водою.

Ключові слова: низьколегована сталь, зварювання під водою, зовнішній електромагнетний вплив, зварні з'єднання, зона термічного впливу, дислокаційна структура, густина дислокацій.

The quality enhancement of welded joints, the development and improvement of electric arc processes and devices require complex experimental and theoretical research. One of the most promising methods, that provide the necessary strength and ductility of the joint metal, is the method of welding in an external electromagnetic field. The stirring of the weld pool has a significant effect on the process of molten metal crystallization, gas exchange reactions, and formation of the weld metal structure. The conducted studies confirm the effectiveness of using external electromagnetic action in underwater welding conditions to improve the mechanical properties of the weld metal. To a further improvement of the technology of mechanized underwater welding, mathematical modelling methods are used, as the most rational method for optimizing experimental studies in an aqueous environment. Mathematical models made it possible to take into account the influence of both the primary factors, namely, the specified current and voltage in the welding circuit and inductor, the properties of materials and the conditions of the process, and secondary ones—the formation of the structure of the weld metal and heat-affected zone, on the properties of the welded joint. The developed algorithm makes it possible to simplify the calculations to optimize the technological process and improve the quality of the welded workpiece. Using the developed program in the Delphi 7 language, numerical experiments are carried out to study the behaviour of liquid metal in the weld pool depending on the parameters of the external electromagnetic effect and welding modes. Metallographic studies of the welded joints metal, which made according to the standard technology and in the optimal modes of external electromagnetic influence, showed that in the welded joint metal overheating area, obtained without external electromagnetic influence, the most significant gradients are observed for the sizes of the lath structures of the upper bainite and for the density of dislocations. This will lead to an inhomogeneous distribution

of the level of mechanical properties of the metal, an increase in the level of local internal stresses and, accordingly, to a decrease in metal crack resistance. In the metal of the overheating section of the welded joint, obtained with the use of an external electromagnetic effect, the structure is dispersed with a general decrease and uniform (gradient-free) distribution of dislocation density in the volume of the structural components of the upper and lower bainite, which ensures the strength and crack resistance of the metal. The conducted studies have confirmed the effectiveness of the use of external electromagnetic influence in underwater welding conditions.

Key words: low-alloyed steel, underwater welding, external electromagnetic effect, welded joints, heat-affected zone, dislocation structure, density of dislocations.

(Отримано 27 серпня 2020 р.; остаточн. варіант — 11 грудня 2020 р.)

1. ВСТУП

При зварюванні під водою за рахунок інтенсивного тепловідведення створюються нерівноважні умови фазового переходу, що призводить до більш сильного наклепу кристалітів в основному внаслідок формування структури з високим ступенем недосконалості кристалічної ґратниці [1]. Напруження другого роду можуть частково релаксувати при охолодженні зварного з'єднання. Для уповільнення швидкості охолодження застосовують технологію зварювання з накладенням відпалюючого валика [2] або ізоляції прилеглої ділянки основного металу від водного середовища [3]. Однак такі прийоми ускладнюють роботу водолаза-зварювальника і можливість їх застосування на практиці досить обмежена. Збільшення тепловкладення призводить до деякого зниження швидкості охолодження, однак практично не впливає на твердість металу зони термічного впливу і супроводжується збільшенням розбризкування і погіршенням стабільності горіння дуги [4].

Управління процесом структуроутворення можна ефективно здійснювати при реалізації умов резонансу на міжфазній межі в процесі кристалізації металу шва [5–7]. Для цього необхідно узгодити частоту зовнішнього періодичного впливу з власною частотою кристалізації металу, що відповідає технологічним умовам зварювання.

Реалізація такого підходу в умовах зварювання під водою стала можливою за рахунок застосування зовнішнього електромагнетного впливу (ЗЕВ) на рідкометалічну ванну [8–12]. Важливою складовою параметрів ЗЕВ є індукційні струми, вимірювати які і аналізувати їх внесок в зварювальний процес без наявності відповідного математичного опису, програмних засобів і імітаційних моделей досить важко, а частіше — неможливо, наприклад, для визначення

ролі магнетоіндукційної складової [13–15].

При моделюванні процесів, що протікають при дуговому зварюванні з використанням ЗЕВ, однією з найважливіших шуканих величин є густина вихрових струмів в масивних тілах. Ці струми істотно впливають на магнетне поле індуктора і, як наслідок, на розподіл електродинамічних зусиль в потоках розтопу ванни.

В даний час існує ряд чисельних методів, які дозволяють моделювати електромагнетний вплив на рідкий метал при підводному дуговому зварюванні. Виходячи з цього, оптимальним з точки зору зменшення області пошуку рішення і, як наслідок, оптимального використання ресурсів обчислювальної техніки, є метод інтегральних рівнянь в силу того, що шукані величини розподілені тільки в обсягах масивних тіл (зварювальні струми, вихрові струми), на їх межах (електричні заряди) і на границях феромагнетиків (струми намагніченості). Ці рівняння враховують поля розсіювання в необмеженому просторі і мають мінімальну розрахункову область.

Метою проведених досліджень було оцінити ефективність застосування зовнішнього електромагнетного впливу для управління параметрами дислокаційної структури металу зварних з'єднань, виконаних під водою.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Використовуючи програму на мові Delphi 7, написану на основі алгоритму, представленого на рис. 1, був виконаний комплекс обчислюваних експериментів по оптимізації параметрів ЗЕВ.

Змінюючи режим зварювання і величину індукції магнетного поля було встановлено розподіл модуля індукції магнетного поля (рис. 2) і густини електродинамічних зусиль (рис. 3) у зварювальній ванні.

За результатами проведених розрахунків був вибраний оптимальний режим, на якому виконувалося в лабораторному басейні зварювання пластин з низьколегованої сталі 09Г2С порошковим дротом ППС-АН1 діаметром 1,6 мм.

Детальні дослідження характеру розподілу дефектів кристалічної ґратниці в металі зварних з'єднань, отриманих без застосування ЗЕВ і з його застосуванням, проводили методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) (мікроскоп JEM-200СХ, фірми «JEOL», Японія).

Особливий інтерес представляло дослідження тонкої структури, а саме, густини дислокацій (ρ), характеру її розподілу в структурних складових, параметрів субструктури в навколошовній зоні зварного з'єднання — зоні термічного впливу (ЗТВ) в ділянці максимального нагріву (ділянці перегріву).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідженнями зварного з'єднання без ЗЕВ показано наступне. Розмір рейкових структур (ширина рейок) верхнього бейніту h_p (БВ) = 0,2–1,2 мкм (рис. 4, а). У внутрішніх об'ємах рейкової структури



Рис. 1. Алгоритм процесу.

Fig. 1. Process algorithm.

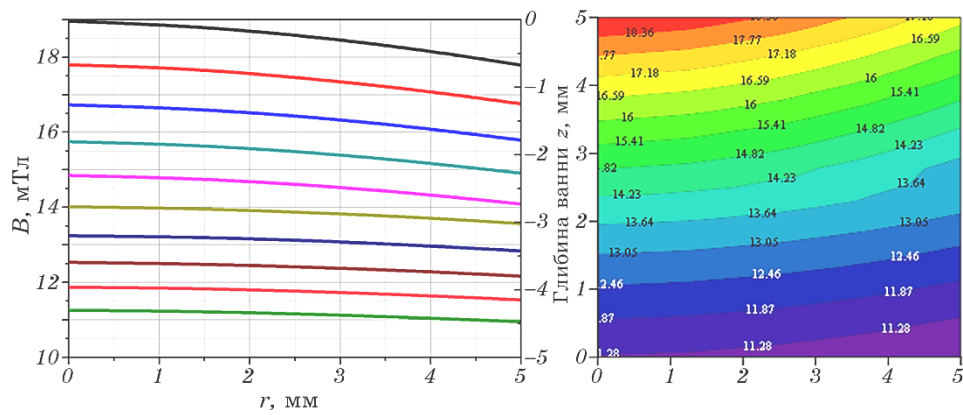


Рис. 2. Залежність модуля індукції магнетного поля від глибини зварювальної ванни.

Fig. 2. Dependence of the modulus of induction of the magnetic field on the depth of the weld pool.

верхнього бейніту розподіл густини дислокацій носить нерівномірний характер. Густина дислокацій змінюється від $\rho = (2-3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $\rho = (5-6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При цьому уздовж границь верхнього бейніту формуються дислокаційні скупчення з ще більш високою густиною $\rho = (7-9) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4, б).

Структура нижнього бейніту більш дисперсна (рис. 4, в), (h_p (Бн) =

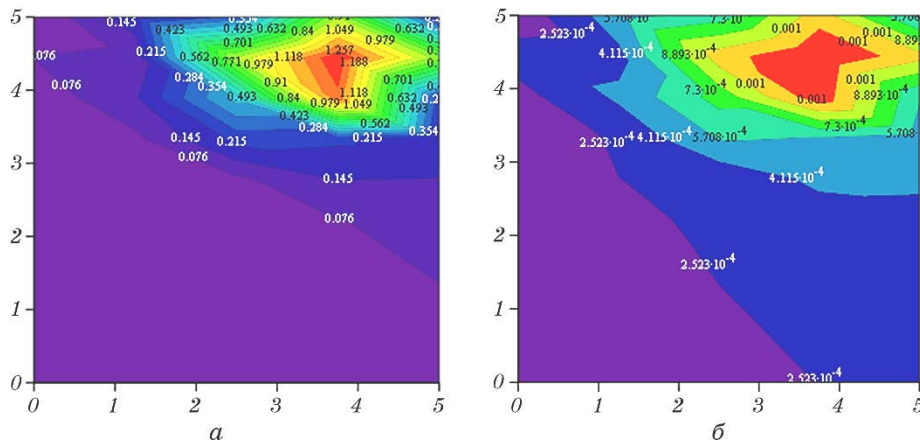


Рис. 3. Розподіли густини електродинамічних зусиль в різних площинах: F_x (а) та F_y (б).

Fig. 3. Distributions of the density of electrodynamic forces in the different planes: F_x (a) and F_y (б).

= 0,1–0,4 мкм), а густина дислокацій становить $\rho = (1-4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4, *з*). Нижньому бейніту характерна наявність частинок карбідних фаз, розміром $h \times l$ (товщина \times довжина) $10-30 \times 50-200 \text{ нм}$, відстані між ними 20–80 нм (рис. 4, *д*).

Таким чином, дослідженнями тонкої структури металу в ділянці перегріву зварного з'єднання, отриманого без ЗЕВ, показано, що параметри тонкої структури бейнітних складових різні. Верхній бейніт має грубопластинчасту будову при помітному підвищенні густини дислокацій і градієнтному її розподілі як в об'ємі, так і по границях рейок.

Детальні дослідження структури зварного з'єднання, отриманого з застосуванням ЗЕВ, показали, що ширина рейок бейнітних структур становить $h_p (\text{БВ}) = 0,2-0,8 \text{ мкм}$ (рис. 5, *а*) і $h_p (\text{БВ}) = 0,1-0,4 \text{ мкм}$ (рис. 5, *в*). У верхньому бейніті густина дислокацій $\rho = (2-3) 10^{10}$

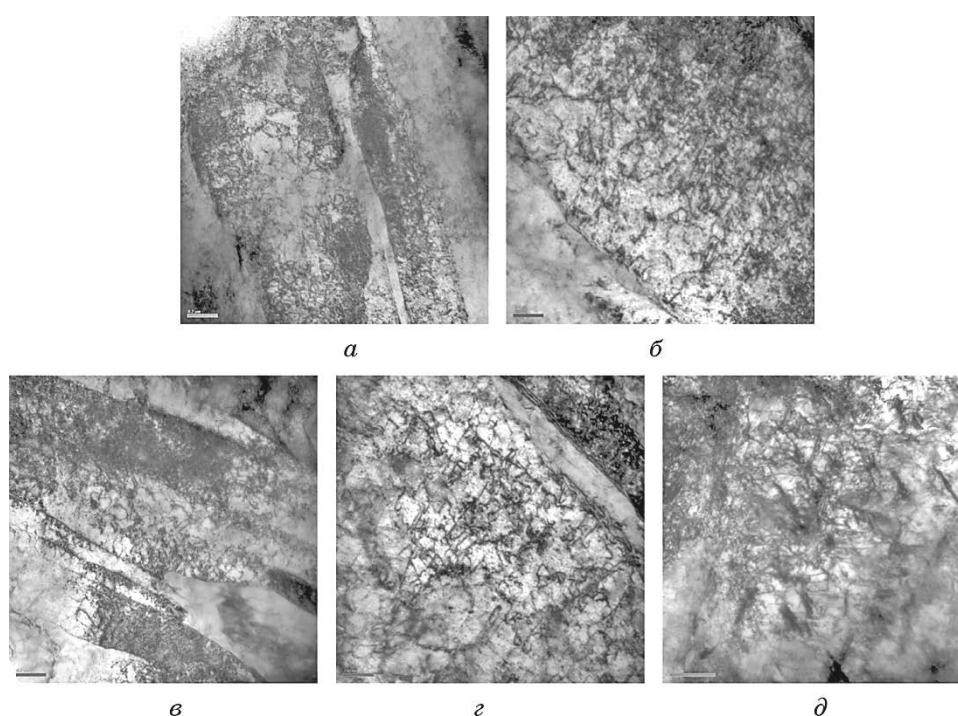


Рис. 4. Тонка структура верхнього (*а* — $\times 35000$; *б* — $\times 70000$) та нижнього бейніту (*в* — $\times 35000$; *г* — $\times 70000$; *д* — $\times 70000$) на ділянці перегріву зварного з'єднання, отриманого без використання зовнішнього електромагнетного впливу.

Fig. 4. Fine structure of the upper (*a*— $\times 35000$; *б*— $\times 70000$) and lower (*в*— $\times 35000$; *г*— $\times 70000$; *д*— $\times 70000$) bainite in the overheating section of the welded joint obtained without the use of external electromagnetic influence.

см⁻² (рис. 5, б), в нижньому бейніті $\rho = (1-3) \cdot 10^{10}$ см⁻² (рис. 5, з). При цьому уздовж границь рейкових структур верхнього бейніту відсутні зони з підвищеною густиною дислокацій. Частинки карбідних фаз в структурі Б_н розміром $h \times l = 10-20 \times 30-200$ нм рівномірно розподілені на відстанях 20-40 нм (рис. 5, д).

Таким чином, дослідженнями тонкої структури зварного з'єднання, отриманого з ЗЕВ, показано, що нижній бейніт має більш дисперсні розміри рейок при рівномірному розподілі густини дислокацій. Рейкова структура верхнього бейніту декілька більше, однак, градієнтів густини дислокацій в ній не спостерігалось.

В результаті встановлено, що в металі ділянки перегріву зварного з'єднання, отриманого без ЗЕВ, спостерігаються найбільші градієнти для розмірів рейкових структур верхнього бейніту (Б_в) та густини дислокацій в об'ємі (від $\rho = (1-2) \cdot 10^{10}$ см⁻² до $\rho = (5-6) \cdot 10^{10}$

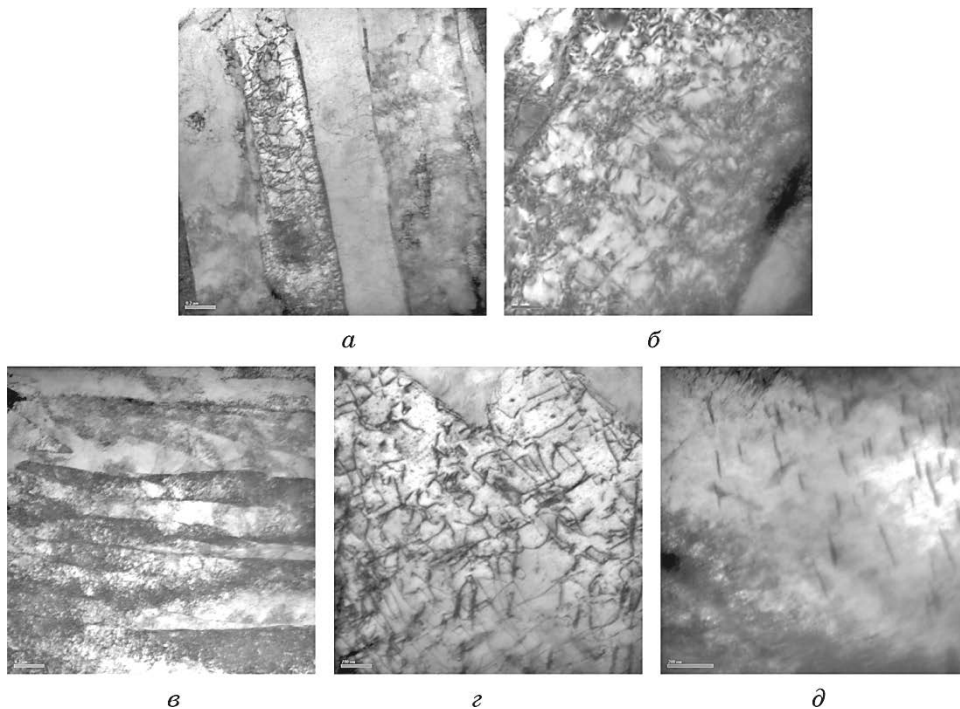


Рис. 5. Тонка структура верхнього (а — $\times 35000$; б — $\times 70000$) та нижнього бейніту (в — $\times 35000$; з — $\times 70000$; д — $\times 70000$) на ділянці перегріву зварного з'єднання, отриманого з використанням зовнішнього електромагнетного впливу.

Fig. 5. Fine structure of the upper (а— $\times 35000$; б— $\times 70000$) and lower bainite (в— $\times 35000$; з— $\times 70000$; д— $\times 70000$) in the overheating section of the welded joint obtained using an external electromagnetic effect.

см⁻²) і по границях рейкових структур верхнього бейніту (до $\rho = (7-9) \cdot 10^{10}$ см⁻²), які будуть призводити до нерівномірного рівня механічних властивостей металу, підвищення рівня локальних внутрішніх напружень і, відповідно, зниження його тріщиностійкості. У металі ділянки перегріву зварного з'єднання, отриманого з застосуванням зовнішнього електромагнетного впливу, спостерігається диспергування структури при загальному зниженні і рівномірному (безградієнтному) розподілі густини дислокацій в об'ємі структурних складових (від $\rho = (1-2) \cdot 10^{10}$ см⁻² до $\rho = 3 \cdot 10^{10}$ см⁻²), що буде забезпечувати міцність і тріщиностійкість металу.

4. ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу існуючих методів обґрунтовані актуальність і необхідність розробки математичних моделей для розрахунку електромагнетного поля в зварювальній ванні з урахуванням реальних електрофізичних властивостей матеріалів для отримання якісного зварного з'єднання.
2. Розроблені тривимірні і вісесиметричні математичні моделі ЗЕВ на рідкий метал при підводному дуговому зварюванні. Застосування інтегральних рівнянь дозволило раціонально використовувати обчислювальні ресурси, оскільки ці рівняння мають мінімальну розрахункову область, точно враховують магнетні поля розсіювання в необмеженому просторі.
3. Використовуючи розроблений алгоритм і програму на мові Delphi 7 можна моделювати, використовуючи розрахунковий модуль, різні варіанти ЗЕВ за змінних теплофізичних параметрів зварювання з мінімальною кількістю фізичних експериментів.
4. При зварюванні під водою по штатній технології і з ЗЕВ в металі ділянки перегріву зони термічного впливу формується структура нижнього і верхнього бейніту, які відрізняються за параметрами структурних складових: розмірами рейкової структури бейнітних складових; густинами дислокацій і розподілами карбідних фаз.
5. При зварюванні по штатній технології структура верхнього бейніту має грубопластинчастий характер з розміром рейок до 1,2 мкм при загальному підвищенні густини дислокацій і нерівномірному її розподілі як в об'ємі, так і по границях. У верхньому бейніті найбільші градієнти спостерігаються для розміру рейкової структури, а також для густини дислокацій: в об'ємі — від $\rho = (1-2) \cdot 10^{10}$ см⁻² до $\rho = (5-6) \cdot 10^{10}$ см⁻²; по межах — до $\rho = (7-9) \cdot 10^{10}$ см⁻².
6. Застосування ЗЕВ забезпечує диспергування рейкових структур бейнітних складових до 0,2–0,8 мкм при загальному зниженні густини дислокацій ($\rho = (1-3) \cdot 10^{10}$ см⁻²) і рівномірному розподілі часток карбідних фаз розміром 10–20 нм в структурі нижнього бейніту (при відстанях між частками 20–40 нм).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. М. Савич, Н. Л. Карета, А. А. Гришанов, В. Н. Сладкова, *Автоматическая сварка*, № 5: 8 (1982).
2. Dariusz Fydrych, A. Swierczynska, G. Rogalski, and J. Labanowski, *Advances Mater. Sci.*, **16**, No. 4: 5 (2016).
3. P. J. Keenan, *Thermal Insulation of Wet Shielded Metal Arc Welds* (Thesis Master's) (MA, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology: 1993).
4. HongLiang Li, Duo Liu, YaoTian Yan, Ning Guo, YiBo Liu, and Jicai Feng, *J. Manufacturing Processes*, **31**: 833 (2018).
5. Л. Н. Лариков, *Залечивание дефектов в металлах* (Киев: Наукова думка: 1980), с. 280.
6. Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко, *Докл. АН СССР*, **221**, № 5: 1073 (1975).
7. А. И. Олемской, В. Е. Панин, В. А. Петрунин, *Изв. вузов. Физика*, № 2: 20 (1986).
8. Х. К. Коттон, П. Х. Харт, С. Е. Грабе, *Подводная сварка морских сооружений* (Ленинград: Судостроение: 1983).
9. Р. Н. Рыжов, С. Ю. Максимов, В. Д. Кузнецов, Е. А. Прилипко, *Вестник НТУУ «КПИ»*, № 48: 226 (2006).
10. Р. Н. Рыжов, С. Ю. Максимов, В. Д. Кузнецов, Е. А. Прилипко, *Автоматическая сварка*, № 6: 55 (2003).
11. Р. Н. Рыжов, С. Ю. Максимов, В. Д. Кузнецов, Е. А. Прилипко, *Автоматическая сварка*, № 11: 41 (2005).
12. А. И. Олемской, В. Е. Панин, В. А. Петрунин, *Изв. вузов. Физика*, № 2: 20 (1986).
13. В. Ф. Евдокимов, С. Ю. Максимов, Е. И. Петрущенко Е. А. Прилипко, Е. А. Рыбалкин, *Электронное моделирование*, **30**, № 6: 3 (2008).
14. С. Ю. Максимов, Е. И. Петрущенко, Е. А. Прилипко, Е. А. Рыбалкин, *Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України*, **45**: 60 (2008).
15. В. Ф. Евдокимов, А. В. Жильцов, С. Ю. Максимов, Е. И. Петрущенко, Е. А. Прилипко, Е. А. Рыбалкин, *Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. Моделювання та інформаційні технології*, **51**: 3 (2009).

REFERENCES

1. I. M. Savich, N. L. Kareta, A. A. Grishanov, and V. N. Sladkova, *Automaticeskaya Svarka*, No. 5: 8 (1982) (in Russian).
2. Dariusz Fydrych, A. Swierczynska, G. Rogalski, and J. Labanowski, *Advances Mater. Sci.*, **16**, No. 4: 5 (2016).
3. P. J. Keenan, *Thermal Insulation of Wet Shielded Metal Arc Welds* (Thesis Master's) (MA, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology: 1993).
4. HongLiang Li, Duo Liu, YaoTian Yan, Ning Guo, YiBo Liu, and Jicai Feng, *J. Manufacturing Processes*, **31**: 833 (2018).
5. L. N. Larikov, *Zalechivanie Defektov v Metalle* [Healing of Defects in Metals] (Kiev: Naukova Dumka: 1980), p. 280 (in Russian).
6. L. N. Larikov, V. M. Falchenko, and V. F. Mazanko, *Dokl. AN SSSR*, **221**,

- No. 5: 1073 (1975) (in Russian).
7. A. I. Olemskoy, V. E. Panin, and V. A. Petrunin, *Izv. Vuzov. Fizika*, No. 2: 20 (1986) (in Russian).
 8. H. K. Kotton, P. H. Hart, and S. E. Grabe, *Podvodnaya Svarka Morskikh Sooruzheniy* (Leningrad: Sudostroenie: 1983) (in Russian).
 9. R. N. Ryzhov, S. Yu. Maksimov, V. D. Kuznetsov, and E. A. Prilipko, *Vestnik NTUU 'KPI'*, No. 48: 226 (2006) (in Russian).
 10. R. N. Ryzhov, S. Yu. Maksimov, V. D. Kuznetsov, and E. A. Prilipko, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 6: 55 (2003) (in Russian).
 11. R. N. Ryzhov, S. Yu. Maksimov, V. D. Kuznetsov, and E. A. Prilipko, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 11: 41 (2005) (in Russian).
 12. A. I. Olemskoy, V. E. Panin, and V. A. Petrunin, *Izv. Vuzov. Fizika*, No. 2: 20 (1986) (in Russian).
 13. V. F. Evdokimov, S. Yu. Maksimov, E. I. Petrushenko, E. A. Prilipko, and E. A. Rybalkin, *Elektronnoe Modelirovanie*, **30**, No. 6: 3 (2008) (in Russian).
 14. S. Yu. Maksimov, E. A. Petrushenko, E. A. Prilipko, and E. A. Rybalkin, *Zbirnyk Naukovykh Prats IPME im. G. E. Puhova NAN Ukrainy*, **45**: 60 (2008) (in Ukrainian).
 15. V. F. Evdokimov, A. V. Giltsov, S. Yu. Maksimov, E. A. Petrushenko, E. A. Prilipko, and E. A. Rybalkin, *Zbirnyk Naukovykh Prats IPME im. G. E. Puhova NAN Ukrainy. Modelyuvannya ta Informatsiyi Tekhnologii*, **51**: 3 (2009) (in Ukrainian).