

# З А В Т О М А Т И Ч Н Е З В А Р Ю В А Н Н Я

01  
2020

## Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

## Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

### ЗМІСТ

#### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

|                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Бой У., Кривцун І.В. Процеси зварювання неплавким електродом з модуляцією зварювального струму (Огляд). Частина III. Моделювання процесів TIG зварювання модульованим струмом .....                                            | 3  |
| Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Козлітіна С.С., Кандаля С.М., Бабенко А.Є. Чисельне прогнозування стану балкових виробів різної товщини при пошаровому формуванні електронно-променевим наплавленням .....                  | 15 |
| Бернацький А.В., Шелягін В.Д., Сіора О.В., Сидорець В.М., Берднікова О.М. Вплив просторового положення при лазерному зварюванні на рівень якості зварних з'єднань зі сталі AISI 321 .....                                      | 25 |
| Аджамський С.В., Кононенко Г.А. Закономірності впливу параметрів процесу SLM на формування одиничного шару з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 .....                                                                   | 32 |
| Книш В.В., Соловей С.О., Ниркова Л.І., Гришанов А.О., Кузьменко В.П. Вплив високочастотної проковки та атмосфери помірного клімату на циклічну довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами ..... | 39 |

#### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Качинський В.С., Кучук-Яценко С.І., Коваль М.П. Пресове зварювання магнітокеруваною дугою високоміцних сталевих трубчастих деталей гідроциліндрів ..... | 45 |
| Скрябінський В.В., Нестеренков В.М., Русиник М.О. Електронно-променеве зварювання з програмуванням розподілу густини потужності променя .....           | 51 |
| Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Донг Ч., Ілляшенко Є.В. Підвищення ефективності лазерного зварювання шляхом зворотно-поступального переміщення фокуса .....   | 57 |

#### ХРОНІКА

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| В.Д. Шелягін – 80 .....                                    | 64 |
| Календар конференцій, семінарів та виставок у 2020 р. .... | 65 |

#### ІНФОРМАЦІЯ

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Міжнародне співробітництво .....                                                                       | 66 |
| Вимоги до оформлення рукописів статей, що подаються до редакції журналу «Автоматичне зварювання» ..... | 67 |

### CONTENTS

#### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Boyi U., Krivtsun I.V. Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review) Part III. Modeling of the processes of TIG welding by modulated current .....                                | 3  |
| Milenin O.S., Velikoivanenko O.A., Kozlitina S.S., Kandala S.M., Babenko A.E. Numerical prediction of kinetics of the state of beam products of different thicknesses during layer-by-layer electron beam surfacing ..... | 15 |
| Bernatskii A.V., Shelyagin V.D., Siora O.V., Sydorets V.M., Berdnikova O.M. Impact of spatial position in laser welding on quality level of welded joints of AISI 321 steel .....                                         | 25 |
| Adjamsky S.V., Kononenko G.A. Regularities of influence of SLM process parameters on the formation of single layer from the heat-resistant nickel alloy Inconel 718 .....                                                 | 32 |
| Knysh V.V., Solovej S.O., Nyrkova L.I., Grishanov A.O., Kuzmenko V.P. Impact of high-frequency peening and moderate climate atmosphere on cyclic fatigue life of tee welded joints with surface fatigue cracks .....      | 39 |

#### INDUSTRIAL

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kachynski V.S., Kuchuk-Yatsenko S.I., Koval M.P. Press magnetically-impelled arc welding of high-strength steel tubular parts of hydraulic cylinders .....       | 45 |
| Skryabinsky V.V., Nesterenkov V.M., Rusynyk M.O. Electron beam welding with programming of beam power density distribution ..                                    | 51 |
| Khaskin V.Yu., Korzhyk V.M., Dong Ch., Illyashenko E.V. Improvement of the effectiveness of laser welding processes by reciprocating movement of the focus ..... | 57 |

#### NEWS

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| V.D. Shelyagin is 80 .....                                      | 64 |
| Calendar of conferences, seminars and exhibitions in 2020 ..... | 65 |

#### INFORMATION

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| International cooperation .....                                                                                           | 66 |
| Requirements for the preparation of manuscripts of articles submitted to the editorial board of «Automatic Welding» ..... | 67 |



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну  
в Міжнародному інституті зварювання  
та в Європейській зварювальній федерації  
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine  
in International Institute of Welding  
and in European Federation for Welding



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України  
Міжнародний науково-технічний та виробничий журнал  
E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine  
International Scientific-Technical and Production Journal

## Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:  
**Б.Є. Патон** (головний редактор),  
**С.І. Кучук-Яценко** (заст. гол. ред.),  
**В.М. Ліподаєв** (штатний заст. гол. ред.)  
**О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,**  
**В.В. Книш, В.М. Коржик, І.В. Кривцун,**  
**Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,**  
**С.Ю. Максимов, М.О. Пашчин,**  
**В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,**  
**К.А. Ющенко;**  
**В.В. Дмитрик**, НТУ «ХПІ», Харків;  
**В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко**,  
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;  
**М.М. Студент**, Фізико-механічний інститут  
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;  
**М. Зініград**, Аріельський університет, Ізраїль;  
**У. Райсген**, Інститут зварювання та з'єднань,  
Аахен, Німеччина;  
**Я. Пілярчик**, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

### Засновники

Національна академія наук України,  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,  
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

### Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ  
03150, Україна, Київ-150,  
вул. Казимира Малевича, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 8277  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as](http://www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as)

Журнал входить до переліку затверджених  
Міністерством освіти і науки України видань  
для публікації праць здобувачів наукових ступенів.

Рекомендовано до друку  
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну  
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001  
ISSN 0005-111X

### Передплата

Передплатний індекс 70031.  
12 випусків на рік (видається щомісячно).  
Друкована версія: 2400 грн. за річний комплект  
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.  
Електронна версія: 2400 грн. за річний комплект  
(випуски журналу надсилаються електронною поштою  
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера  
передплатника надається доступ до архіву журналу).

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается  
англійською мовою під назвою  
«The Paton Welding Journal»  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/tpwj)

За зміст рекламних матеріалів  
редакція журналу відповідальності не несе.

### EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:

**B.E. Paton** (Editor-in-Chief),  
**S.I. Kuchuk-Yatsenko** (Deputy Editor-in-Chief),  
**V.M. Lipodaev** (Staff Deputy Editor-in-Chief)  
**O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,**  
**V.V. Knysh, V.M. Korzhyk, I.V. Krivtsun,**  
**Yu.M. Lankin, L.M. Lobanov,**  
**S.Yu. Maksimov, M.O. Pashchin,**  
**V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,**  
**K.A. Yushchenko;**  
**V.V. Dmytryk**, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv;  
**V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko**, NTUU «Igor Sykorsky  
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;  
**M.M. Student**, Karpenko Physico-Mechanical Institute  
of NASU, Lviv;  
**M. Zinigrad**, Ariel University, Israel;  
**U. Reisgen**, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany;  
**Ja. Pilarczyk**, Welding Institute, Gliwice, Poland

### Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,  
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,  
International Association «Welding» (Publisher)

### Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU  
03150, Ukraine, Kyiv-150,  
11 Kazymyr Malevych Str.  
Tel.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Fax: (38044) 200 8277  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as)

The Journal is included in the list of publications approved  
by the Ministry of Education and Science of Ukraine  
for the publication of works of applicants for academic degrees.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration  
of KV 4788 dated 09.01.2001  
ISSN 0005-111X

### Subscription

Subscription index 70031.  
12 issues per year (issued monthly), back issues available.  
\$180, subscriptions for the printed (hard copy) version,  
air postage and packaging included.  
\$150, subscriptions for the electronic version  
(sending issues of Journal in pdf format  
or providing access to IP addresses).  
Institutions with current subscriptions on printed version  
can purchase online access to the electronic versions  
of any back issues that they have not subscribed to.  
Issues of the Journal (more than two years old)  
are available at a substantially reduced price.

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)  
journal is republished in English under  
the title «The Paton Welding Journal».  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/tpwj)

The editorial board is not responsible  
for the content of the promotional material.

# ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ (Огляд)

## Частина III. Моделювання процесів TIG зварювання модульованим струмом

У. Бої<sup>1</sup>, І.В. Кривцун<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).

510650, м. Гуанчжоу, Тіаньхе, вул. Чансін, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано огляд робіт, присвячених процесам зварювання неплавким електродом у інертному газі з модуляцією зварювального струму. Третя частина огляду присвячена аналізу робіт, що стосуються теоретичного дослідження та математичного моделювання процесів тепло-, масо- і електропереносу в дуговій плазмі та зварюваному металі при TIG зварюванні модульованим струмом. Описано різні підходи до теоретичного дослідження зазначених процесів, а також відповідні математичні моделі, з урахуванням умов зварювання неплавким електродом з низькочастотною (до 10 Гц) та високочастотною (вище 10 кГц) імпульсною модуляцією зварювального струму. Наведено результати чисельного аналізу розподілених та інтегральних характеристик аргонної дуги з тупоплавким катодом при імпульсній зміні струму, виконаного на основі моделей нестационарної дуги з розподіленими та зосередженими параметрами. Проаналізовано результати комп'ютерного моделювання теплових, гідродинамічних та електромагнітних процесів у зварюваному металі (в тому числі при самоузгодженому врахуванні процесів, що протікають в дуговій плазмі) для випадку точкового TIG зварювання з низькочастотною імпульсною модуляцією струму. Представлено аналітичні залежності, що описують вплив форми та параметрів імпульсів зварювального струму на характеристики динамічної дії дуги з тупоплавким катодом на метал зварювальної ванни. Бібліогр. 21, табл. 4, рис. 19.

*Ключові слова:* дуга з тупоплавким катодом, TIG зварювання, дугова плазма, зварюваний метал, проплавлення, модуляція зварювального струму, імпульс, частота, коефіцієнт заповнення, амплітуда, математичне моделювання

Розглянуті у першій [1] та другій [2] частинах даного огляду особливості горіння дуги, проплавлення металу та формування швів при зварюванні неплавким електродом з модуляцією зварювального струму, встановлені експериментально, вимагали проведення теоретичних досліджень, розробки математичних моделей та чисельного моделювання зазначених процесів з метою пояснення і прогнозування характеру їх проходження при практичній реалізації різних технологій TIG зварювання модульованим струмом.

У роботі [3] передбачається, що ефект контракції дуги при ВЧІ модуляції струму, який спостерігається експериментально, і підвищення її тиску на поверхню зварювальної ванни у порівнянні з дугою постійного струму, рівного середньому значенню модульованого, пов'язаний зі збільшенням ефективного значення модульованого струму у порівнянні з його середнім значенням. Це припущення записується у вигляді співвідношення

$$P_{PC} = P_{DC} \frac{I_{eff}^2}{I_{av}^2}, \quad (1)$$

де  $P_{PC}$  – тиск дуги модульованого струму;  $P_{DC}$  – тиск дуги постійного струму;  $I_{eff}$  – ефективне і середнє значення струму.

За даними роботи [3], розрахований таким чином тиск дуги при ВЧІ модуляції струму добре збігається з експериментальними даними.

При модуляції струму дуги прямокутними і трикутними імпульсами квадрат ефективного значення струму може бути наближено обчислений у такий спосіб:

$$I_{eff}^2 \approx I_p I_{av} \quad (2)$$

для прямокутних імпульсів і

$$I_{eff}^2 \approx \frac{2}{3} I_p I_{av} \quad (3)$$

для трикутних, де  $I_p$  – пікове значення струму (при запису (2), (3) передбачалося, що базове значення струму  $I_b$  набагато менше  $I_p$ ).

Оскільки в діапазоні частот  $f = 10 \dots 20$  кГц форма імпульсів близька до трикутної, піковий струм при фіксованій потужності джерела живлення (по постійному струму) може бути оцінений за допомогою співвідношення

$$I_p \sim \sqrt{\frac{I_{av}}{fL}}, \quad (4)$$

де  $L$  – індуктивність зварювального контуру.

У цьому випадку, використовуючи (1), (3), (4), відношення тиску дуги з ВЧІ модуляцією струму до тиску дуги постійного струму (що характеризує ступінь стиснення дуги) може бути представлено у вигляді

$$\frac{P_{PC}}{P_{DC}} \sim \sqrt{\frac{1}{I_{av} f L}}. \quad (5)$$

Таким чином, ефект стиснення дуги при ВЧ модуляції струму найбільш сильно проявляється у випадку малих значень середнього струму.

Робота [4] присвячена порівняльному аналізу тиску на поверхню зварювальної ванни, що чиниться дугою з неплавким електродом при імпульсній модуляції зварювального струму і дугою постійного струму, значення якого визначається з умови рівності потужностей розглянутих дуг. При оцінці тиску дуги автори використовують припущення про те, що струмовий канал має форму усіченого конуса з висотою, що дорівнює довжині дуги, що розширюється від катода, де радіус каналу вибирається рівним  $r_0$ , до анода, де радіус дорівнює  $R$  ( $R > r_0$ ). Передбачається, що щільність струму однорідно розподілена по перетину струмового каналу. Це дозволяє записати тиск дуги постійного струму  $I_c$  на поверхню анода у вигляді

$$P_C = \frac{\mu I_c^2}{4\pi^2 R^2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right), \quad (6)$$

де  $\mu$  – універсальна магнітна стала.

Потужність дуги постійного струму визначається як добуток струму  $I_c$  на напругу  $U(I_c)$ , що обчислюється за допомогою апроксимації вимірної експериментально статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) дуги:

$$U(I) = B_1 I + B_2 + B_3 / I, \quad (7)$$

де  $B_1, B_2, B_3$  – постійні коефіцієнти, які залежать від умов горіння дуги.

З огляду на (7), потужність дуги постійного струму  $I_c$  можна записати наступним чином:

$$W_C = B_1 I_c^2 + B_2 I_c + B_3. \quad (8)$$

У випадку дуги модульованого струму, припускаючи, що модуляція здійснюється прямокутними імпульсами з коефіцієнтом заповнення  $\delta$ , середнє та ефективне значення струму можна обчислити за допомогою виразів:

$$I_{av} = \delta I_p + (1 - \delta) I_b; \quad I_{eff} = [\delta I_p^2 + (1 - \delta) I_b^2]^{1/2}, \quad (9)$$

де  $I_p, I_b$  – пікове та базове значення струму.

Середнє значення потужності такої дуги  $W_P \equiv \frac{1}{T} \int_0^T I(t) U(t) dt$  в роботі [4] визначається за умови, що зміна в часі напруги на дузі при зміні струму відбувається уздовж статичної ВАХ (7), що дає

$$W_P = B_1 I_{eff}^2 + B_2 I_{av} + B_3. \quad (10)$$

Слід зазначити, що останнє припущення істотно обмежує частоту модуляції, зі зростанням якої зміна напруги при зміні струму дуги, що відбувається відповідно до динамічної ВАХ дуги, все більш значно відрізняється від залежності (7) [5].

Прирівнюючи вирази (8) і (10), автори знаходять коефіцієнт заповнення  $\delta$ , який при заданих значеннях  $I_c, I_p, I_b$  забезпечує умову рівності потужностей дуги постійного та модульованого струму:

$$\delta = \frac{B_1 (I_c^2 - I_b^2) + B_2 (I_c - I_b)}{B_1 (I_p^2 - I_b^2) + B_2 (I_p - I_b)}. \quad (11)$$

Припускаючи далі, що розміри струмового каналу дуги з імпульсною модуляцією струму дорівнюють відповідним розмірам для дуги постійного струму та використовуючи вираз (6), автори [4] записують

$$P_P = \frac{\mu I_{eff}^2}{4\pi^2 R^2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right), \quad (12)$$

що дозволяє їм зробити висновок, подібний зробленому в роботі [3] (див. (1)), а саме:

$$P_R \equiv P_P / P_C = I_{eff}^2 / I_c^2. \quad (13)$$

Використовуючи отримані співвідношення, в роботі [4] наводяться розрахункові залежності  $P_R, W_P, I_{eff}/I_{av}$ , а також  $I_c, I_{av}, I_{eff}$  від коефіцієнта заповнення при наступних параметрах режиму горіння дуги: довжина дуги 1 мм, захисний газ Ar,  $I_p = 500$  А,  $I_b = 5$  А. Як приклад, на рис. 1 представлена залежність  $P_R(\delta)$ , яка показує, що тиск на поверх-

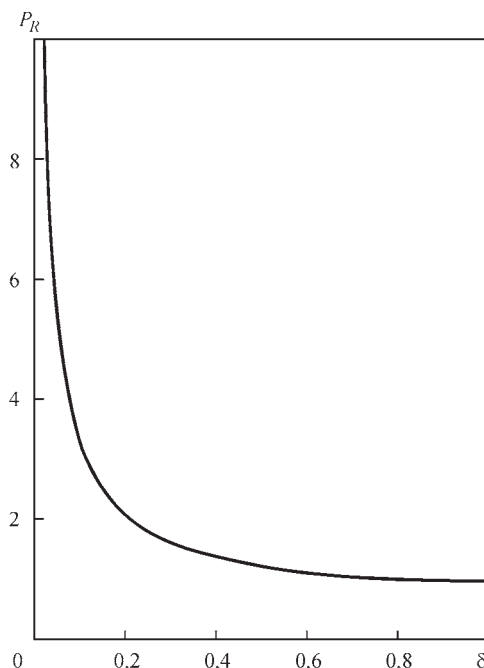


Рис. 1. Залежність відношення тиску на поверхню анода дуги модульованого струму до тиску дуги постійного струму від коефіцієнта заповнення при їх однаковій потужності ( $I_b = 5$  А,  $I_p = 500$  А, довжина дуги – 1 мм) [4]



ню анода дуги з імпульсною модуляцією струму при малих значеннях коефіцієнта заповнення може в десять і більше разів перевищувати відповідну величину для дуги постійного струму ( $\delta = 1$ ).

У роботі [6] проведено комп'ютерне моделювання теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі при точковому аргонодуговому зварюванні (зварювання нерухомою дугою) зразка з нержавіючої сталі AISI 304 завтовшки 3 мм дугою, що горить на постійному струмі та з низькочастотною модуляцією зварювального струму прямокутними імпульсами. При побудові математичної моделі використовувалися такі припущення: 1) розглянута система передбачається осесиметричною; 2) розплавлений метал є в'язкою рідиною, що не стискається, його течія у зварювальній ванні – ламінарна; 3) при аналізі гідродинамічних процесів у ванні розплаву враховуються сила Лоренца та сила Архімеда, що діють в об'ємі ванни, а також сила Марангоні, тиск і сила тертя дугової плазми на її поверхні; 4) властивості зварюваного металу передбачаються незалежними від температури, за винятком коефіцієнта поверхневого натягу, щільності, питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності; 5) розподіл теплового потоку, щільності електричного струму, тиску та сили тертя дугової плазми на поверхні зварюваного металу визначалися на основі результатів моделювання дуги постійного струму [7, 8] при різних значеннях струму (квазістаціонарна дуга).

При проведенні чисельного моделювання використовувалися параметри режимів горіння дуги модульованого струму (табл. 1) та постійного струму – наведені нижче.

**Параметри режиму горіння дуги постійного струму [6]**

|                                    |         |
|------------------------------------|---------|
| Довжина дуги, мм                   | 2,0     |
| Струм дуги, А                      | 100     |
| Напруга на дузі, В                 | 14,0    |
| Електрод                           | W+2 %Th |
| Діаметр електрода, мм              | 3,2     |
| Кут заточки електрода, град        | 60      |
| Діаметр сопла, мм                  | 12,7    |
| Витрата захисного газу (Ar), л/хв. | 10,0    |

**Таблиця 1. Параметри режимів горіння дуги з модуляцією струму [6]**

| Параметр                         | Варіант 1 | Варіант 2 | Варіант 3 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Базове значення струму $I_b$ , А | 36        | 40        | 48        |
| Тривалість паузи $t_b$ , с       | 0,16      | 0,24      | 0,32      |
| Пікове значення струму $I_p$ , А | 120       | 136       | 160       |
| Тривалість імпульсу $t_p$ , с    | 0,32      | 0,24      | 0,16      |
| Ефективний струм $I_E$ , А       | 100       | 100       | 100       |
| Середній струм $I_M$ , А         | 92        | 88        | 85        |
| Коефіцієнт заповнення $r_f$      | 0,67      | 0,50      | 0,33      |
| Частота $F_p$ , Гц               | 2,08      | 2,08      | 2,08      |
| Відношення $t_p/t_b$             | 2,0       | 1,0       | 0,5       |
| Відношення $I_M/I_E$             | 0,92      | 0,88      | 0,85      |

На рис. 2 показані картини течії і поля швидкостей (см/с) рідкого металу зварювальної ванни при дії нерухомого джерела тепла (дуги постійного і модульованого струму) протягом 1,92 с.

Результати проведеного в роботі [6] комп'ютерного моделювання дозволили авторам зробити висновки про те, що збільшення відношення  $t_p/t_b$  або коефіцієнта заповнення призводить до підвищення глибини проплавлення при інших рівних умовах.

Робота [9] також присвячена моделюванню процесів, що протікають у зварюваному металі при ТІГ зварюванні з низькочастотною модуляцією струму дуги. Розглядалися теплові, гідродинамічні та електромагнітні процеси у зразку з нержавіючої сталі 304 завтовшки 3 мм при наступних параметрах режиму зварювання: напруга на дузі  $U = 13$  В, струм зварювання модулюється прямокутними імпульсами, тривалості імпульсу  $t_p$  і паузи  $t_b$  задавалися  $t_p = t_b = 1$  с, струм в імпульсі  $I_p = 170$  А, базовий струм  $I_b = 35$  А, швидкість зварювання  $v = 1,6$  мм/с. При побудові математичної моделі використовувалися наступні припущення: 1) метал зварювальної ванни передбачається в'язкою рідиною, що не стискається, режим течії – ламінарний; 2) розподіли теплового потоку, щільності струму і тиску дуги на поверхні зразка – гаусові; 3) властивості зварюваного металу не залежать від температури, за винятком коефіцієнта поверхневого натягу розплаву (для врахування ефекту Марангоні); 4) поверхню зварювальної ванни вважається плоскою.

На рис. 3 показані розрахункові залежності глибини проплавлення та півширини шва від часу зварювання. Як впливає з представлених кривих, найбільш помітні зміни глибини та ширини шва

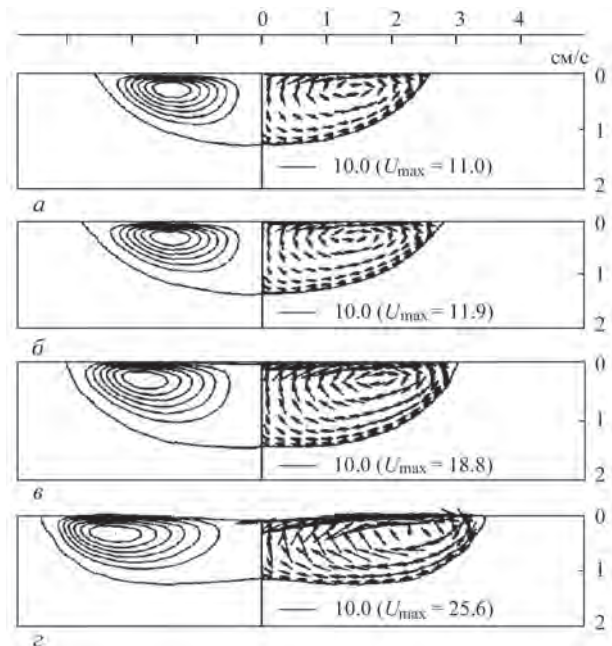


Рис. 2. Картини течії (зліва) і поля швидкостей руху (праворуч) розплаву при дії на зварюваний метал протягом 1,92 с: а – дуги постійного струму (100 А); б–г – дуги модульованого струму (варіанти 1–3 в табл. 1, відповідно) [6]

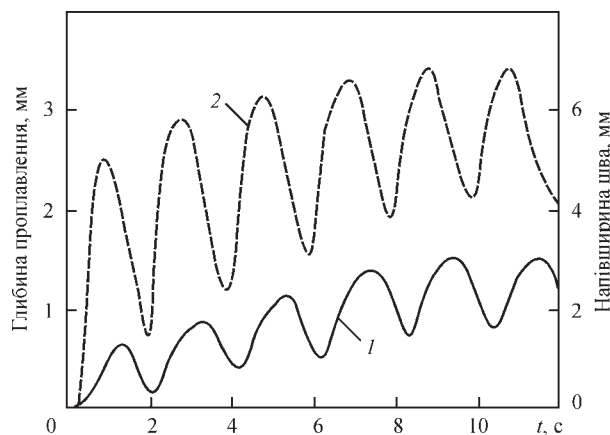


Рис. 3. Залежності глибини проплавлення (1) та напівширини шва (2) від часу [9]

зі зміною струму дуги спостерігаються на самому початку процесу зварювання ( $t < 4$  с). Після чотирьох періодів зміни зварювального струму амплітуда коливань розглянутих характеристик дещо зменшується, при цьому їх максимальні та мінімальні значення стають практично незалежними від часу.

З метою верифікації розробленої моделі автори [9] провели порівняння розрахункових даних з експериментальними, отриманими шляхом відеозйомки поверхні зварювальної ванни. Оскільки під час дії імпульсу струму  $I_p$  провести таку відеозйомку було неможливо, на рис. 4 наведено дані щодо зміни ширини шва тільки під час горіння дуги на мінімальному струмі  $I_b$ . Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало цілком задовільну їх відповідність.

Книга [10] присвячена детальному опису існуючих підходів і математичних моделей, що використовуються для моделювання теплових і гідродинамічних процесів у зварюваному металі при різних способах дугового (MIG/MAG, TIG) і плазмового зварювання. Рівняння відповідних математичних моделей записані у нестационарному вигляді, що дозволяє використовувати їх для моделювання процесів

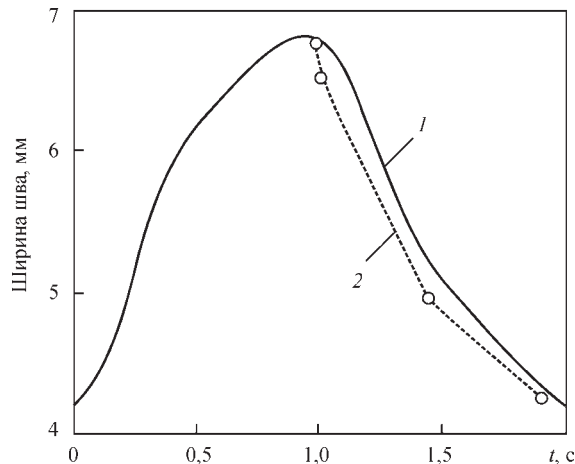


Рис. 4. Порівняння розрахункової (1) та експериментальної (2) залежності ширини шва від часу протягом одного періоду модуляції зварювального струму [9]

дугового зварювання як постійним струмом, так і з імпульсною модуляцією струму дуги.

У роботах [11, 12] проведено детальне чисельне дослідження процесів точкового TIG зварювання (зварювання нерухомим джерелом тепла) нержавіючої сталі AISI 304 при низькочастотній модуляції зварювального струму прямокутними імпульсами у формі меандру. У роботі [11] запропонована 2D модель теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі при його частковому (товщина зразка 10 мм) і повному (товщина зразка 4 мм) проплавленні. При побудові моделі авторами використовувалися такі припущення: 1) розглянута система має осьову симетрію; 2) розплавлений метал є в'язкою рідиною, що не стискається, режим течії – ламінарний; 3) течія металу у зварювальній ванні формується за рахунок дії сил Архімеда, Лоренца і Марангоні (сила тертя потоку плазми з поверхнею розплаву не враховується), а також тиску дугової плазми на поверхню ванни; 4) у рівнянні енергії враховується прихована теплота плавлення-кристалізації; 5) визначення характеристик електромагнітного поля у зварюваному металі здійснюється з урахуванням вихорових струмів. Необхідні для визначення граничних умов на поверхні зварюваного металу розподіли щільності електричного струму, теплового потоку і тиску дуги на зазначену поверхню задавалися на основі відповідних розподілів для дуг постійного струму в діапазоні 80...200 А, однак, автори [11] не вказали джерело, з якого взято ці дані. При проведенні розрахунків використовувалися параметри імпульсної модуляції зварювального струму, представлені нижче. Розглядалася поведінка зварювальної ванни протягом 3,5 с від початку процесу зварювання (7; 14 і 21 період модуляції на частоті 2; 4 і 6 Гц, відповідно).

**Параметри модуляції струму дуги [11]**

|                                              |                          |
|----------------------------------------------|--------------------------|
| Максимальне пікове значення струму $I_p$ , А | ..... 200                |
| Мінімальне базове значення струму $I_b$ , А  | ..... 80                 |
| Тривалість імпульсу $t_p$ , с                | ..... 0,25; 0,125; 0,083 |
| Тривалість паузи $t_b$ , с                   | ..... 0,25; 0,125; 0,083 |
| Частота $f$ , Гц                             | ..... 2; 4; 6            |

На рис. 5 представлено розрахункові залежності ширини (діаметра зварної точки) і глибини проплавлення від часу зварювання зразка завтовшки 10 мм при імпульсній модуляції струму дуги у діапазоні 80...200 А (середнє значення струму 140 А), що здійснюється з частотою 2 Гц, у порівнянні з відповідними залежностями при точковому зварюванні постійним струмом 170 А.

Наведені на цьому рисунку розрахункові дані показують, що зміна в часі максимального діаметра зварювальної ванни при імпульсній модуляції струму дуги відповідає поведінці діаметра ванни при зварюванні на постійному струмі 170 А. Водночас енергія, вкладена в зразок за 3,5 с в першому випадку становить 4565 Дж, тоді як у другому

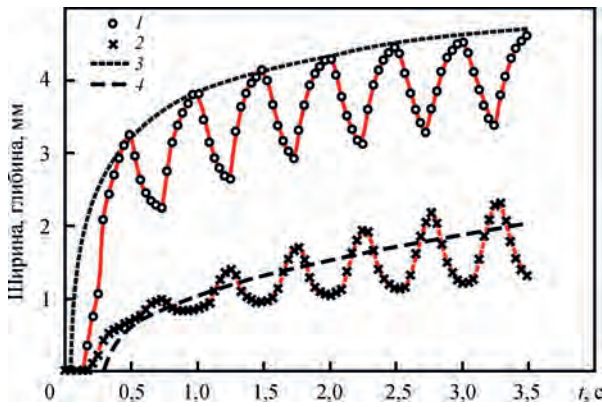


Рис. 5. Залежності від часу ширини (1) і глибини (2) проплавлення при TIG зварюванні модульованим струмом у порівнянні з шириною (3) та глибиною (4) проплавлення при зварюванні на постійному струмі [11]

випадку ця енергія виявляється значно більшою та складає величину 5867 Дж, що є важливою перевагою TIG зварювання з імпульсною модуляцією струму, тому що дозволяє знизити залишкові напруження та деформації.

Ще однією важливою особливістю TIG зварювання модульованим струмом є значна зміна форми поверхні зварювальної ванни у часі. Характерні форми поверхні ванни під час імпульсу та паузи струму для розглянутого вище режиму модуляції представлено на рис. 6.

На рис. 7 наведено розрахункові дані про залежність від часу розмірів зварювальної ванни при повному проплавленні зразка завтовшки 4 мм у випадку точкового зварювання з імпульсною модуляцією струму дуги в діапазоні 80...200 А на частоті 2 Гц.

Для верифікації запропонованої моделі визначені розрахунковим шляхом геометричні розміри та форма проплавлення зразка завтовшки 10 мм при дії на нього дуги модульованого струму протягом 3,5 с, порівнювалися з відповідними розмірами та формою макрошліфів зварних точок, визначеними експериментально. Результати такого порівняння наведені на рис. 8 для різних значень амплітуди модуляції струму (середнє значення струму 140 А) на частоті 2 Гц і свідчать про до-

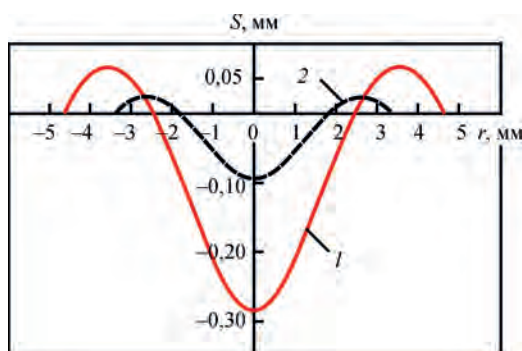


Рис. 6. Форми поверхні зварювальної ванни при піковому (1 – 200 А) і базовому (2 – 80 А) значеннях струму дуги після шести періодів модуляції з частотою 2 Гц [11]

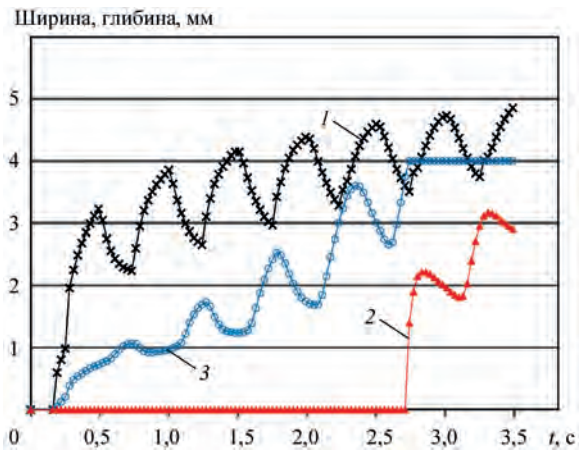


Рис. 7. Залежності від часу ширини зварювальної ванни з лицьової (1) і зворотної (2) сторони зразка, а також глибини проплавлення (3) при точковому TIG зварюванні модульованим струмом з повним проплавленням [11]

статню адекватність математичної моделі, запропонованої авторами [11].

У роботі [12] розглянута модель була узагальнена для самоузгодженого врахування процесів, що протікають в електроді (катоді), стовпі дуги та зварюваному металі при точковому TIG зварюванні з низькочастотною модуляцією струму. За допомогою такої узагальненої моделі було проведено детальне комп'ютерне моделювання перерахованих вище процесів при зварюванні зразків з тієї ж сталі (AISI 304) завтовшки 8 і 4 мм аргоною дугою довжиною 3 мм з вольфрамовим катодом діаметром 3,2 мм (кут заточування  $60^\circ$ ) при наступних параметрах модуляції струму: прямокутні імпульси у формі меандру, частота слідування 1 Гц, струм в імпульсі  $I_p = 160$  А, струм у паузі  $I_b = 80$  А.

На рис. 9, а представлено результати порівняння динаміки зміни в часі напівширини зварювальної ванни, розрахованої на основі моделі [12] і визначеної експериментально шляхом відеозйомки поверхні ванни, при точковому TIG зварюванні зразка завтовшки 8 мм аргоною дугою модульованого струму з параметрами, зазначеними вище. На рис. 9, б показана розрахункова форма та розміри зони проплавлення металу, що зварюється, а також відповідний макрошліф зварної точки, досягнуті за 15 с дії дуги на зварюваний зразок. Як впливає з порівняння результатів моделювання та експериментальних даних, запропонована авторами [12] математична модель дозволяє з високою точністю передбачати як динаміку зміни геометричних характеристик зварювальної ванни, так і результуючу форму зони проплавлення, що досягається за певний час.

Робота [13] китайських учених присвячена вивченню електромагнітної сили, що діє на дугову плазму, при TIG зварюванні з високочастотною ( $f = 20...80$  кГц) імпульсною модуляцією зварюваль-



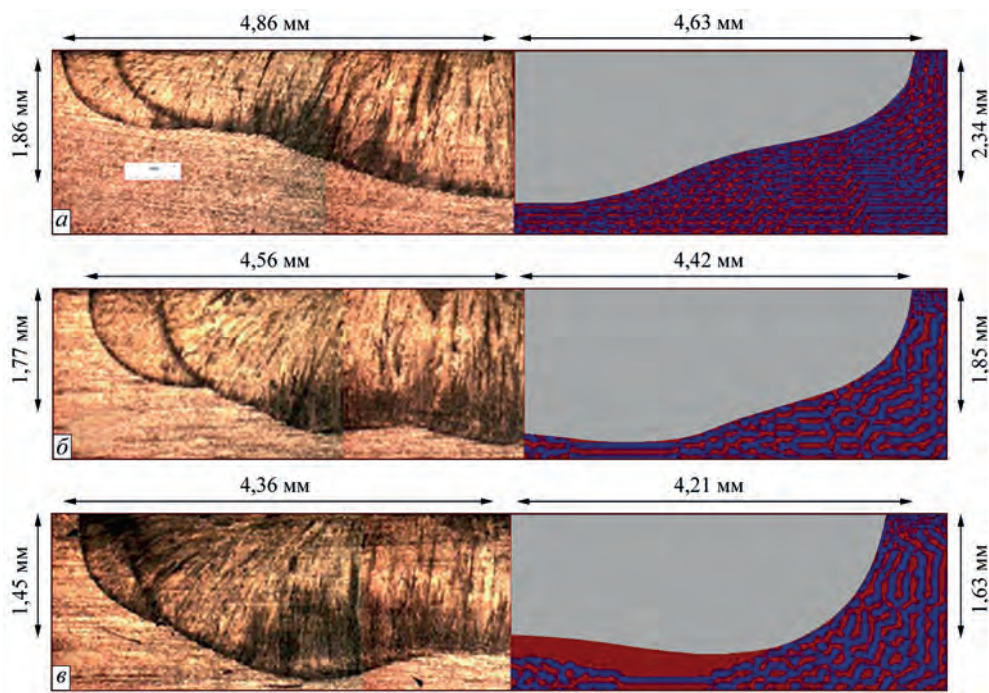


Рис. 8. Макрошліфи зварних точок (зліва) і розрахункові форми проплавлення металу (праворуч) при точковому ТІГ зварюванні зразків зі сталі AISI 304 з низькочастотною модуляцією струму в діапазоні: а – 80...200; б – 100...180; в – 120...160 А [11]

ного струму. Автори припускають, що щільність струму в стовпі дуги має, як показано на рис. 10, аксіальну і радіальну компоненти і розподілена по гаусовому закону:

$$\begin{cases} J_z = \frac{Id}{\pi R_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 d}{R_r^2}\right); \\ J_r = J_z \operatorname{tg} \varphi, \end{cases} \quad (14)$$

де  $I$  – струм дуги;  $d = 3$  – коефіцієнт зосередженості;  $R_r$  – радіус електропровідної ділянки стовпа

дуги, яка вважається кінчною;  $\varphi$  – кут нахилу лінії струму до осі дуги (див. рис. 10). Це дозволяє записати вирази для компонент електромагнітної сили, що діє на плазму, у вигляді:

$$\begin{cases} F_r = C_1 t \exp(-t) [1 - \exp(-t)]; \\ F_z = 0, (r \leq r_0); C_2 t \exp(-t) [1 - \exp(-t)], (r \geq r_0). \end{cases} \quad (15)$$

Тут  $t = r^2 d / R_r^2$ ;  $C_1 = -\mu I^2 / (2\pi^2 r^3)$ ;

$C_2 = \mu I^2 (r - r_0) / [2\pi^2 r^2 (h - z)]$ , де  $\mu$  – магнітна проникність;  $h$  – довжина дуги; координата  $z$  відраховується від поверхні вироу. Слід зазначити, що вираз для  $F_z$  (формули (4) і (6)) у роботі [13] записано неправильно.

Крім розподілених характеристик електромагнітної сили у стовпі дуги у даній роботі досліджується така інтегральна характеристика силового впливу, як тиск дуги на поверхню анода, яке записується у вигляді (див. також [4]):

$$P_{ez} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (16)$$

При аналізі цієї залежності передбачається, що величина  $r_0$  постійна і дорівнює половині діаметра електрода. Радіус кореня дуги  $R$  визначається експериментально шляхом фотореєстрації поперечного розміру анодної зони дуги при ТІГ зварюванні титанового сплаву Ti-6Al-4V завтовшки 2,5 мм з різними частотами модуляції зварювального струму. В експериментах використовували аргонovu дугу довжиною 3 мм з тугоплавким (W+2 %Ce) катодом діаметром 2,4 мм, параметри режимів зварювання наведені в табл. 2.

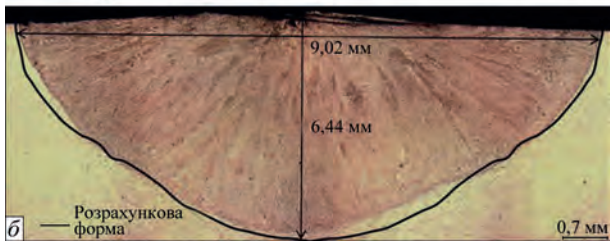
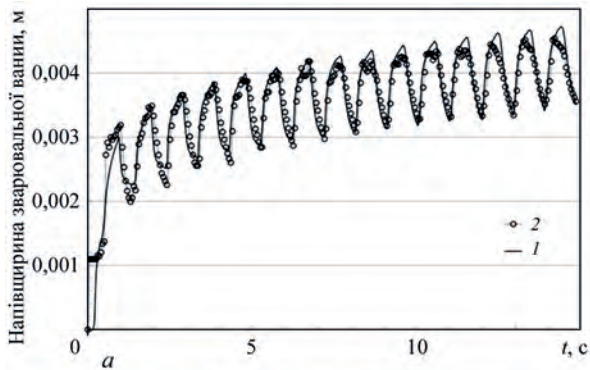


Рис. 9. Порівняння розрахункових (1) та експериментальних (2) даних за динамікою зміни напівширини зварювальної ванни (а) і результуючою формою зони проплавлення (б) при точковому ТІГ зварюванні модульованим струмом [12]



На рис. 11 показана залежність радіуса кореня дуги від частоти модуляції струму, яка свідчить про збільшення ступеня контракції дуги на аноді (зменшення  $R$ ) зі зростанням частоти. Для апроксимації отриманих експериментальних даних була запропонована наступна поліноміальна залежність:  $R(f) = -0,0014f^3 + 0,0307f^2 - 0,2755f + 6,2086$ .

Переписуючи формулу (16) у вигляді  $P_{ez} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 r_0^2} \frac{1}{n^2} \ln n$ , де  $n = \frac{R}{r_0}$ , і досліджуючи цей вираз, автори [13] знаходять, що при  $n < 1,6$  (точніше, при  $n < \exp(1/2)$ ) величина  $P_{ez}$  є зростаючою функцією  $n$ , а при  $n > 1,6$  – спадаючою. Це означає, що тиск дуги на поверхню анода зростає зі збільшенням  $R$  при  $R < R_c$  і спадає при  $R > R_c$ , де, для заданого значення  $r_0 = 1,2$  мм критична величина радіуса кореня дуги  $R_c$  складає 1,92 мм.

Оскільки, згідно з експериментальними даними, наведеними на рис. 11, величина  $R$  виявляється більшою за  $R_c$  для всіх значень частоти модуляції та зменшується зі зростанням  $f$ , то робиться висновок про те, що зі зростанням частоти модуляції струму тиск дуги на поверхню зварювальної ванни зростає, що призводить до заглиблення джерела тепла в зва-

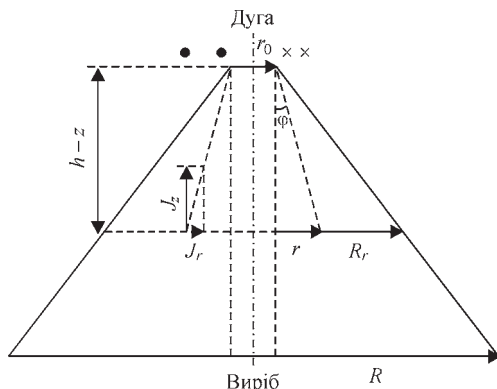


Рис. 10. Схема розподілу щільності струму у стовпі дуги [13]

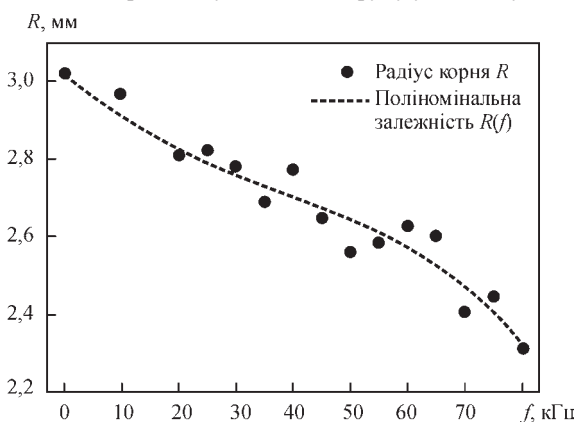


Рис. 11. Радіус кореня дуги в залежності від частоти модуляції струму [13]

Таблиця 2. Параметри досліджених режимів зварювання [13]

| Номер експерименту | Базовий струм $I_b$ , А | Струм в імпульсі $I_p$ , А | Частота $f$ , кГц | Коефіцієнт заповнення $\delta$ , % |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 1                  | 75                      | -                          | -                 | -                                  |
| 2...14             | 40                      | 100                        | 20...80           | 50                                 |

руваний метал, а, отже, до збільшення проплавляючої здатності дуги.

В роботі [14] на основі самоузгодженої математичної моделі нестационарних процесів енерго-, масо- та електропереносу у стовпі та анодній області електричної дуги з тугоплавним катодом [15] проведено детальний чисельний аналіз характеристик аргонної дуги з мідним водоохолоджуванним анодом при імпульсній зміні електричного струму (рис. 12).

Встановлено, що горіння дуги при різкому збільшенні (зменшенні) струму супроводжується суттєвою перебудовою електромагнітних, теплових і газодинамічних характеристик дугової плазми, а також характеристик її дії на поверхню анода. При цьому динамічна поведінка зазначених характеристик залежить не тільки від швидкості зміни струму дуги, а й від того збільшується він чи зменшується. При високій швидкості зміни струму ( $\left| \frac{dI}{dt} \right| > 5 \cdot 10^6$  А/с) змі-

на характеристик стовпа та анодній області дуги відбувається у дві стадії: стадія зміни разом зі струмом дуги та стадія перехідних процесів. Як впливає з розрахункових даних, наведених на рис. 13, 14, при збільшенні (зменшенні) струму дуги щільність електричного струму та теплового потоку на аноді можуть ставати в 2 рази більше (в 1,5 рази менше) відповідних значень для дуги постійного струму, рівного більшому (меншому) значенням.

На стадії перехідних процесів відбувається релаксація теплового і газодинамічного стану дугової плазми до значень, характерних для стаціонарної дуги при відповідному значенні струму. Тривалості процесів релаксації залежать від значень максимального та мінімального струму і можуть істотно відрізнятися для локальних й інтегральних характеристик плазми стовпа та анодній області дуги.

При зміні струму зі швидкістю меншою, ніж  $10^6$  А/с ( $b > 100$  мкс), процеси, пов'язані зі збільшенням (зменшенням) струму та процеси релаксації відбуваються одночасно, внаслідок чого нестационарний процес горіння дуги реалізується у вигляді послідовної зміни станів, характерних для стаціонарної дуги при відповідних зна-

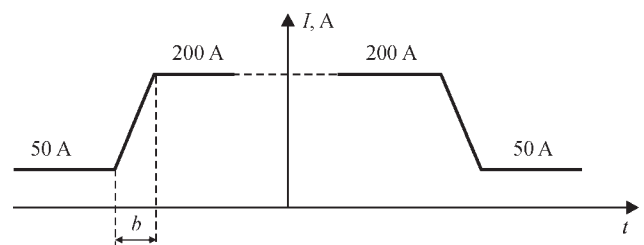


Рис. 12. Діаграма імпульсної зміни струму дуги [14]

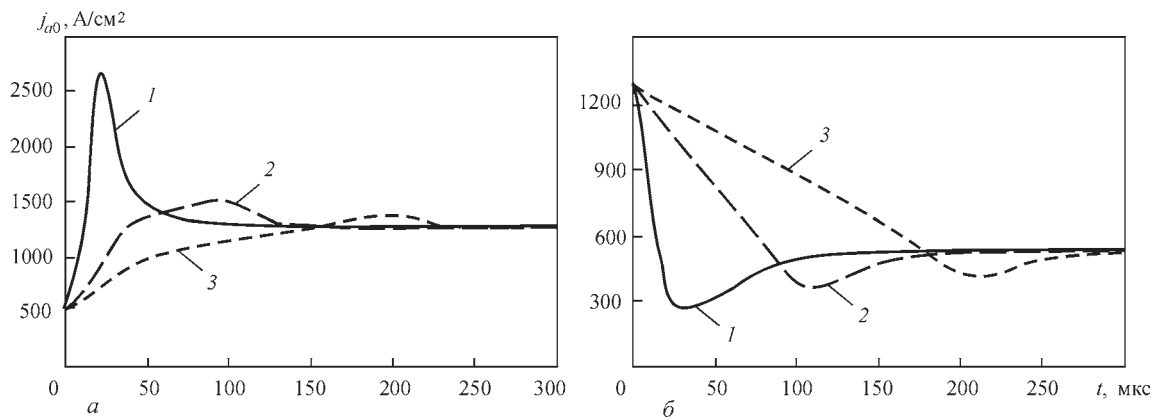


Рис. 13. Зміна осевого значення щільності електричного струму на аноді при імпульсному підвищенні (а) і зниженні (б) струму дуги (1 –  $b = 20$ ; 2 – 100; 3 – 200 мкс) [14]

ченнях струму (див., наприклад, рис. 14), тобто зміна характеристик дуги відбувається в квазістаціонарному режимі.

Робота [16] присвячена дослідженню впливу високочастотної імпульсної модуляції струму дуги на прогин поверхні зварювальної ванни при TIG зварюванні зразків з титанового сплаву Ti–6Al–4V завтовшки 2,5 мм. Дане дослідження включає експериментальне вимірювання сили, з якою дуга діє на поверхню зразка, що зварюється, і геометричних характеристик його проплавлення (ширини шва  $B$  і глибини проплавлення  $H$ ), а також математичне моделювання процесів, що протікають в зварюваному металі з урахуванням прогину вільної поверхні зварювальної ванни.

Для проведення експериментів був створений спеціальний стенд, що дозволяє вимірювати силу, яка діє на зразок, при TIG зварюванні. В експериментах використовувалася аргонна дуга довжиною 3 мм з тугоплавким (W+2 %Ce) катодом радіусом 1,2 мм, параметри режимів зварювання наведені в табл. 3, швидкість зварювання у всіх експериментах була постійною – 150 мм/хв.

Для математичного моделювання теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі, використовувалася 2D модель, побудована за наступних припущень: 1) розплавлений метал є в'язкою рідиною, що не

стискається, його течія у зварювальній ванні – ламінарна; 2) при аналізі гідродинамічних процесів у зварювальній ванні враховуються об'ємні сили (Лоренца та Архімеда), а також поверхневі сили (Марангоні та тиск дуги); 3) властивості зварюваного матеріалу вважаються незалежними від температури за винятком питомої теплоємності і коефіцієнта теплопровідності, а також коефіцієнта поверхневого натягу, в'язкості та щільності розплаву (наближення Буссінеска).

При оцінці ступеня викривлення вільної поверхні зварювальної ванни використовувалася її апроксимація частиною сферичної поверхні, як показано на рис. 15.

Записуючи баланс сил на даній поверхні, автори [16] отримують такий вираз:

$$\Phi(h) = F - \frac{\pi}{6} \rho g h^3 - \frac{3\pi}{2} \rho g r^2 h - 8\sigma r \arctg \frac{h}{r}, \quad (17)$$

Таблиця 3. Параметри режимів зварювання [16]

| Номер експерименту | Базовий струм $I_b$ , А | Струм в імпульсі $I_p$ , А | Частота $f$ , кГц | Коефіцієнт заповнення $\delta$ , % |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 1                  | 80                      | –                          | –                 | –                                  |
| 2                  | 40                      | 100                        | 20                | 50                                 |
| 3                  | 40                      | 100                        | 40                | 50                                 |
| 4                  | 40                      | 100                        | 60                | 50                                 |
| 5                  | 40                      | 100                        | 80                | 50                                 |

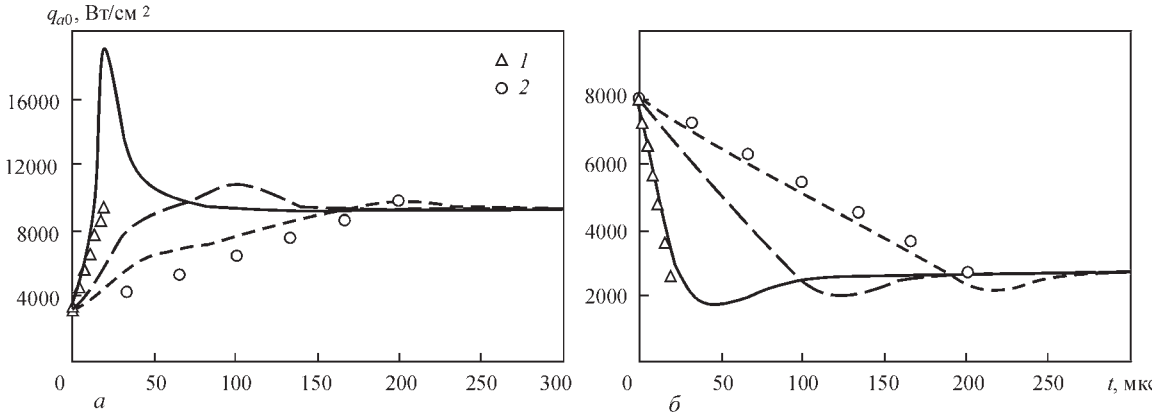


Рис. 14. Зміна осевого значення щільності теплового потоку в анод при імпульсному підвищенні (а) і зниженні (б) струму дуги (маркерами показані значення  $q_{a0}$  для стаціонарної дуги при відповідних значеннях струму: 1 –  $b = 20$ ; 2 – 200 мкс) [14]

де  $F$  – сила дії дуги на поверхню металу, що зварюється;  $\rho$ ,  $\sigma$  – щільність і коефіцієнт поверхневого натягу розплаву;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $r$ ,  $h$  – радіус зварювальної ванни і прогин її вільної поверхні (див. рис. 15). Корінь рівняння  $\Phi(h) = 0$  відповідає величині  $h$ , при якій виконується баланс сил (17).

Радіус зварювальної ванни  $r$ , що входить у вираз (17), визначався як половина експериментально виміряного значення шви  $B$  і далі будувалися залежності  $\Phi(h)$  для різних значень частоти модуляції, які представлені на рис. 16. На цьому ж малюнку вказані відповідні значення коренів рівняння  $\Phi(h) = 0$ .

Зведення експериментальних і розрахункових значень величин, що визначають прогин поверхні зварювальної ванни, наведено в табл. 4.

Завершуючи розгляд роботи [16], слід зазначити, що сила  $F$ , яка вимірюється експериментально, містить дві складові – безпосередньо силу дії дугової плазми на зварюваний метал і силу, що діє на зварюваний зразок, за рахунок розтікання струму в його об'ємі (аналогічна сила, що діє на плазму стовпа дуги, була визначена в [4]). Розрахунки показують, що, наприклад, при постійному струмі дуги, рівному 178 А, сила, що діє на зразок з нержавіючої сталі завтовшки 5 мм, становить 4,4 мН. Таким чином, використані в роботі [16] значення сили дії дуги на поверхню зварю-

вальної ванни, а отже, і прогину цієї поверхні є сильно завищеними.

У роботі [17] зроблено спробу проаналізувати силу дії на поверхню металу, що зварюється, потоку дугової плазми при ТІГ зварюванні з ВЧІ модуляцією струму дуги. Без будь-якого обґрунтування автори припускають, що розподіл тиску потоку плазми в області анодної прив'язки дуги має вигляд

$$P_r = P_{peak} \exp(-a|r|), \quad (18)$$

де  $P_{peak}$  – газодинамічний тиск на осі дуги;  $a$  – коефіцієнт розподілу;  $r$  – радіальна координата. Потім математично некоректно обчислюється величина відповідної сили, що діє на поверхню зварювальної ванни та порівнюється з експериментально виміряним (за методикою, описаною в роботі [16]) значенням цієї сили, яке, як зазначено вище, є сильно завищеним. Тому висновки, зроблені в роботі [17], не представляються обґрунтованими.

Робота [5] присвячена використанню моделі нестационарної дуги з зосередженими параметрами для аналізу динаміки зміни її характеристик в умовах ТІГ зварювання при імпульсній зміні струму. При побудові такої моделі рівняння Кірхгофа, що описують електричне коло, були доповнені рівняннями динамічної моделі дуги як елемента електричного кола [18]. Як параметри моделі з зосередженими параметрами використовується статична ВАХ стовпа дуги і постійна часу перехідного процесу, яка підлягає визначенню. Для ідентифікації цих параметрів були проведені експериментальні дослідження статичних ВАХ аргонної дуги з вольфрамовим катодом і мідним водоохолоджуванним анодом. Постійна часу  $\theta$  перехідного процесу визначалася виходячи з розрахункових даних про динаміку зміни напруги на дузі, отриманих за допомогою моделі з розподіленими параметрами [15].

Розглядався вплив на дугу трапецієподібних імпульсів струму з різними тривалостями фронтів (20; 100; 200 мкс). Розрахунки проводилися для аргонної дуги довжиною 3 мм з тугоплавким катодом. Передбачалося, що після підйому (спаду) струму дуга горить при постійному струмі до встановлення стаціонарного стану. Результати розрахунку динамічної ВАХ такої дуги для моделей з розподіленими та зосередженими па-

Таблиця 4. Значення параметрів, що визначають прогин поверхні зварювальної ванни [16]

| Частота $f$ , кГц | Сила дії дуги $F$ , мН | Ширина шва $B$ , мм | Глибина проплавлення $H$ , мм | Прогин поверхні $h$ , мм |
|-------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 0                 | 1,79                   | 4,16                | 2,29                          | 0,11                     |
| 20                | 4,19                   | 3,10                | 1,75                          | 0,29                     |
| 40                | 7,00                   | 2,77                | 1,85                          | 0,53                     |
| 60                | 8,84                   | 3,21                | 2,15                          | 0,67                     |
| 80                | 16,06                  | 2,59                | 2,06                          | 1,63                     |

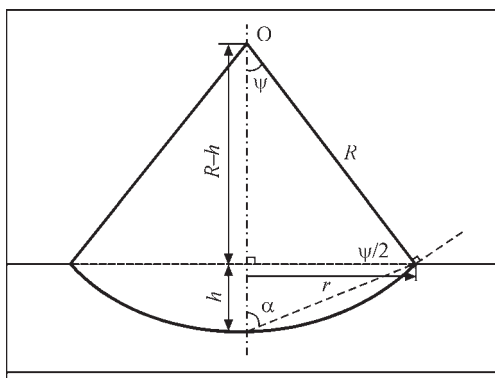


Рис. 15. Апроксимація вільної поверхні зварювальної ванни [16]

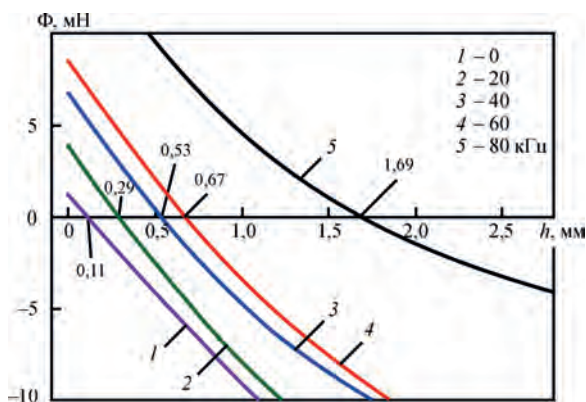


Рис. 16. Залежності  $\Phi(h)$  за різних значень частоти модуляції струму дуги [16]



раметрами представлені на рис. 17. На цьому ж малюнку наведені відповідні значення  $\theta$ , обрані за критерієм найкращої відповідності результатів розрахунку з використанням зазначених моделей.

Як впливає з наведених на цьому малюнку розрахункових даних, постійна часу зменшується зі зменшенням тривалості фронту імпульсу. Характерною особливістю динамічної ВАХ дуги є те, що вона представляється у вигляді петлі гістерезису, у якій верхня та нижня криві відповідають переднім і заднім фронтам імпульсу, а вертикальні відрізки – переходу в стаціонарний стан дуги. ВАХ дуги у вигляді петлі гістерезису була отримана експериментально у роботах [19, 20]. Причиною її виникнення є різна ступінь інерційності процесів перенесення енергії, імпульсу та заряду при підйомі та спаді струму. Відзначимо, що зі збільшенням тривалості фронту імпульсу розмах петлі гістерезису зменшується і динамічна ВАХ дуги наближається до ВАХ стаціонарної дуги (див. рис. 17, в).

У роботі [21] проведено аналіз впливу параметрів імпульсної модуляції зварювального струму на характеристики динамічної дії дуги з тугоплавним катодом на метал зварювальної ванни. Показано, що чим більший квадрат діючого (ефектив-

ного) значення струму  $I_E$  дуги, тим більша сила, що діє на розплавлений метал. Таким чином, для забезпечення максимуму зазначеної дії (при фіксованому середньому значенні струму  $I_A$ ) форму та часові параметри імпульсів модуляції слід вибирати за критерієм максимуму  $I_E$ .

Для будь-якого струму  $I(t)$ , що періодично змінюється у часі, має місце таке представлення:

$$I(t) = I_A + A\eta(t), \quad (19)$$

де  $A = I_2 - I_1$  – амплітуда модуляції струму;  $I_1, I_2$  – мінімальне та максимальне значення струму;  $\eta(t)$  – деяка нормована функція, яка містить інформацію щодо форми та часових параметрів імпульсів. Розглядаючи досить загальний випадок модуляції зварювального струму імпульсами трапецієподібної форми, зображеними на рис. 18, автори показали, що

$$I_E^2 = I_A^2 + A^2 f(\xi, \gamma). \quad (20)$$

$$\text{Тут } f(\xi, \gamma) = \xi \left[ \frac{2}{3}(1+2\gamma) - \xi(1+\gamma)^2 \right],$$

де безрозмірні параметри  $\xi = \frac{\tau_3}{2\tau}$  ( $0 < \xi \leq \frac{1}{2}$ ) і  $\gamma = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3}$  ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ) характеризують, відповідно, відносну тривалість імпульсу (дорівнює половині коефіцієнта заповнення) і його форму (при  $\gamma = 0$  трапецієподібний імпульс стає трикутним, а при  $\gamma = 1$  – прямокутним), а середнє значення струму може бути записано у вигляді  $I_A = (1 - \alpha)I_1 + \alpha I_2$ , де  $\alpha = \frac{\tau_3 + \tau_2 - \tau_1}{2\tau}$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ).

На рис. 19 показано поведінку функції  $f(\xi, \gamma)$ , з явного виду якої випливає, що діюче значення модульованого струму залежить від коефіцієнта заповнення і форми імпульсів і не залежить від частоти їх проходження. Відзначимо також, що,  $f(\xi, \gamma) \geq 0$ , тобто квадрат ефективного значення струму завжди перевищує квадрат його середнього значення.

Як впливає з (20), для забезпечення максимального значення  $I_E$  при фіксованих значеннях  $I_A$  та  $A$ , параметри слід вибирати таким чином, щоб функція  $f(\xi, \gamma)$  приймала найбільше значення. Для трапецієподібних імпульсів (див. рис. 18) параметр  $\alpha$  дорівнює  $\xi(1 + \gamma)$ , тому при аналізі функції  $f(\xi, \gamma)$  слід розглядати не увесь діапазон зміни параметрів  $\xi, \gamma$ , а лише ті їх значення, які задовольняють рівняння  $\alpha = \xi(1 + \gamma)$ . Виражаючи з цього рівняння  $\gamma$  через  $\xi, \alpha$ , отримаємо  $f(\xi, \alpha) = \frac{4}{3}\alpha - \alpha^2 - \frac{2}{3}\xi$ . Ця функція монотонно зменшується зі збільшенням  $\xi$  і має найбільше значення при мінімальному значенні  $\xi_{\min}$ . У випадку трикутних імпульсів ( $\gamma = 0$ ) знаходимо  $\xi = \alpha$ , а в разі прямокутних імпульсів ( $\gamma = 1$ ) маємо  $\xi = \frac{\alpha}{2}$ . Таким чином, мінімальне значення  $\xi_{\min} = \frac{\alpha}{2}$ , що

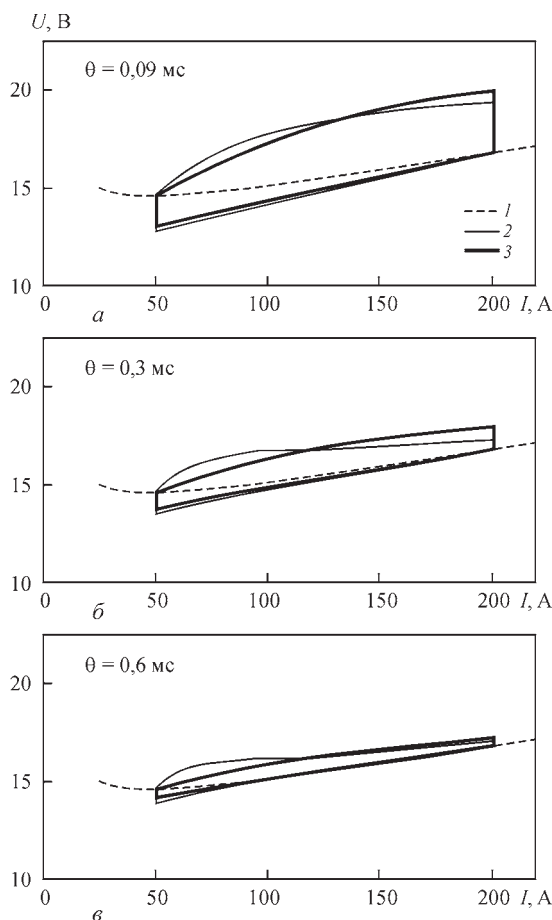


Рис. 17. Динамічні ВАХ дуги при тривалості фронтів імпульсу: 20 мкс (а); 100 мкс (б); 200 мкс (в); 1 – статична ВАХ дуги; 2 – динамічна ВАХ (модель з розподіленими параметрами); 3 – динамічна ВАХ (модель із зосередженими параметрами) [5]

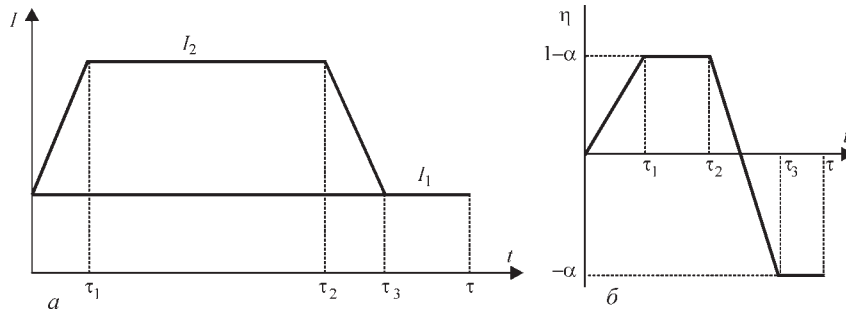


Рис. 18. Схематичне представлення імпульсу струму дуги: а – трапецієподібний імпульс з паузою; б – відповідний нормований імпульс (функція)  $\eta(t)$  [21]

забезпечує при заданому  $\alpha$  найбільше значення функції  $f(\xi_{\min}, \alpha) = \alpha - \alpha^2$ , досягається у випадку  $\gamma = 0$ . Функція  $\alpha - \alpha^2$  має максимум при  $\alpha = 0,5$ , що дає  $\xi = 0,25$ , тобто даний набір безрозмірних параметрів відповідає прямокутним імпульсам у вигляді меандру.

Оскільки на практиці досягти прямокутної форми імпульсів струму неможливо, у роботі [21] досліджено поведінку функції  $f(\xi, \gamma)$  для випадку трапецієподібного імпульсу струму. Позначивши через  $\tau_f = \tau_1 + \tau_3 - \tau_2$  сумарну тривалість переднього та заднього фронтів імпульсу (див. рис. 18, а), можна показати, що мінімальне значення  $\xi$  визначається наступним чином:

$$\xi_{\min} = \frac{\alpha}{2 - \bar{\tau}_f}, \text{ де } \bar{\tau}_f = \frac{\tau_f}{\tau_3}. \text{ Звідси випливає, що}$$

$$f(\xi_{\min}, \alpha) = \frac{2}{3} \left( 2 - \frac{1}{2 - \bar{\tau}_f} \right) \alpha - \alpha^2. \text{ Ця функція має}$$

$$\text{максимум, рівний } f(\bar{\tau}_f) = \frac{1}{9} \left( 2 - \frac{1}{\bar{\tau}_f} \right)^2, \text{ при}$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \left( 2 - \frac{1}{\bar{\tau}_f} \right).$$

Аналіз результатів робіт, присвячених моделюванню процесів ТІГ зварювання модульованим струмом, дозволяє зробити наступні висновки:

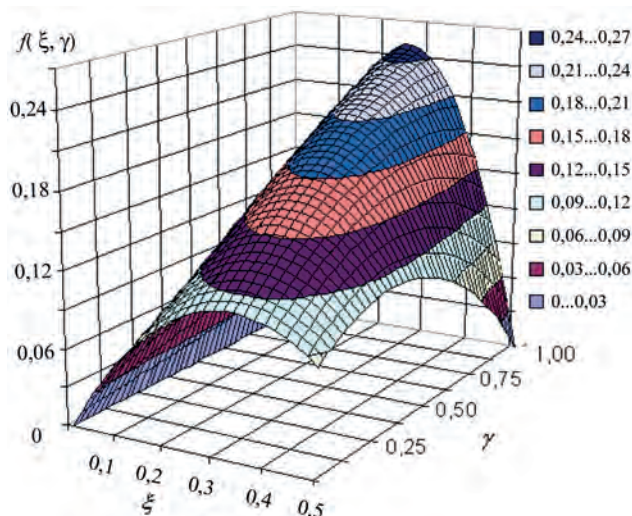


Рис. 19. Вигляд функції  $f(\xi, \gamma)$  [21]

1. Результати теоретичного аналізу характеристик дуги з тугоплавним катодом при височастотній імпульсній модуляції струму підтверджують ефекти стиснення дуги та підвищення тиску потоку дугової плазми на поверхню анода у порівнянні з тиском дуги постійного струму, що спостерігалися експериментально. Показано, наприклад, що тиск дуги з ВЧІ модуляцією струму зростає зі зменшенням коефіцієнта заповнення (при сталості середнього значення потужності дуги) пропорційно відношенню квадратів ефективного та середнього значень модульованого струму.

2. Відповідно до умов точкового ТІГ зварювання з низькочастотною ( $f < 10$  Гц) модуляцією зварювального струму, розроблені математичні моделі теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі (у тому числі при самоузгодженому врахуванні процесів, що протікають у дуговій плазмі). Проведено детальне комп'ютерне моделювання зазначених процесів, результати якого знаходяться у хорошій відповідності з експериментальними даними.

3. Питанням моделювання розподілених характеристик плазми нестационарної дуги з тугоплавним катодом та її дії на поверхню металу, що зварюється, при ТІГ зварюванні з ВЧІ модуляцією зварювального струму ( $f > 10$  кГц) в сучасній науково-технічній літературі не приділено достатньої уваги (за винятком робіт [5, 14]). Тому вважається за доцільне провести детальні теоретичні дослідження та математичне моделювання процесів енерго-, масо- і електропереносу в системі «нестационарна дуга – зварюваний матеріал» при ТІГ зварюванні з ВЧІ модуляцією струму.

## Список літератури / References

1. Бой У., Кривцун І.В. (2019) Процессы сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока (Обзор). Часть I. Особенности горения нестационарных дуг с тугоплавным катодом. *Автоматическая сварка*, **11**, 29–39. Boyi Wu, Krivtsun, I.V. (2019) Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review). Part 1. Peculiarities of burning of nonstationary arcs with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **11**, 23–32.
2. Бой У., Кривцун І.В. (2019) Процессы сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока (Обзор). Часть II. Эффекты дугового воздействия на свариваемый металл. *Там же*, **12**, 12–24. Boyi Wu, Krivtsun, I.V. (2019) Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review).

- Part 2. Effects of arc impact on the metal being welded. *The Paton Welding J.*, **12**, 11–23.
3. Yamaoto, T., Shimada, W., Gotoh, T. (1976) *Characteristics of high frequency pulsed DC TIG welding process*. Doc. IIW 212-628-76, 11–23.
  4. Cook G.E., Eassa H. E.-D. E. H. (1985) The effect of high-frequency pulsing of a welding arc. *IEEE Transactions on Industrial Application*, 1A-21, **5**, 1294–1299.
  5. Сидорец В.Н., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. и др. (2016) Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических вольт-амперных характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **2**, 7–13.
  - Sydorets, V.N., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. et al. (2016) Calculation and experimental research of static and dynamic volt-ampere characteristics of argon arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **2**, 2-8.
  6. Kim, W.H., Na, S.J. (1998) Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **41**(21), 3213–3227.
  7. Lee S.Y., Na S.J. (1996) A numerical analysis of a stationary gas tungsten welding arc considering various electrode angle. *Weld. J., Res. Suppl.*, 269–279.
  8. Kim W.H., Fan H.G., Na S.J. (1997) A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface. *Metall. Trans.*, **28B**, 679–686.
  9. Wu, C.S., Zheng, W., Wu, L. (1999) Modelling the transient behaviour of pulsed current tungsten-inert-gas weld pools. *Modelling and Simul. Mater. Sci. Eng.*, **7**(1), 15–23.
  10. Wu C.S. (2008) *Welding heat process and pool geometry*. Beijing, China Machine Press, pp. 102–104.
  11. Traidia A., Roger F., Guyot E. (2010) Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools. *Int. J. of Thermal Sciences*, **49**, 1197–1208.
  12. Traidia A., Roger F. (2011) Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **54**, 2163–2179.
  13. Yang M., Qi B., Cong B. et al. (2013) Study on electromagnetic force in arc plasma with UHFP-GTAW of Ti–6Al–4V. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, (9), 2561–2568.
  14. Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф. (2013) Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **7**, 14–25.
  - Krivtsun, I.V., Krikent, I.V., Demchenko, V.F. (2013) Modeling of dynamic characteristics of a pulsed arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **7**, 13–23.
  15. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. (2012) Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области дуги с тугоплавким катодом. *Там же*, **3**, 7–11.
  - Krikent, I.V., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. (2012) Modeling of processes of heat-, mass- and electric transfer in column and anode region of arc with refractory cathode. *Ibid.*, **3**, 2-6.
  16. Yang M., Yang Z., Cong B. et al. (2014) A study on the surface depression of the molten pool with pulsed welding. *Welding J., Res. Suppl.*, **93**, (8), 312–319.
  17. Yang, M., Yang, Z., Qi, B. (2015) The effect of pulsed frequency on the plasma jet force with ultra high frequency pulsed arc welding. *IIW*, **8**, 875–882.
  18. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. (2013) *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка».
  - Sydorets, V.N., Pentegov, I.V. (2013) Deterministic chaos in nonlinear circuits with electric arc. Kiev, IAW [in Russian].
  19. Соколов О.И., Гладков Э.А. (1977) Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом. *Сварочное производство*, **4**, 3–5.
  - Sokolov, O.I., Gladkov, E.A. (1977) Dynamic characteristics of free and constricted welding arcs of direct current with nonconsumable electrode. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 3–5 [in Russian].
  20. Трофимов Н.М., Синицкий Р.В. (1967) Динамические характеристики импульсной дуги при сварке в аргоне. *Там же*, **8**, 18–19.
  - Trofimov, N.M., Sinitsky, R.V. (1967) Dynamic characteristics of pulsed arc in argon arc welding. *Ibid.*, **8**, 18–19 [in Russian].
  21. Демченко В.Ф., Бои У., Кривцун И.В. и др. (2017) Действующие значения электродинамических характеристик процесса сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги. *Автоматическая сварка*, **8**, 3–14.
  - Demchenko, V.F., Boi, U., Krivtsun, I.V., Shuba, I.V. (2017) Effective values of electrodynamic characteristics of the process of nonconsumable electrode welding with pulse modulation of arc current. *The Paton Welding J.*, **8**, 2-11.

## PROCESSES OF NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING WITH WELDING CURRENT MODULATION (Review)

### Part III. Modeling of the Processes of TIG Welding by Modulated Current

U. Boyi<sup>1</sup>, I.V. Krivtsun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding).  
363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

A review of investigations devoted to the processes of inert-gas nonconsumable electrode welding with welding current modulation was performed. The third part of the review is devoted to analysis of the works, dealing with theoretical study and mathematical modeling of the processes of heat-, mass- and electric transfer in arc plasma and welded metal in TIG welding by modulated current. Different approaches to theoretical study of the above-mentioned processes are described, as well as respective mathematical models, allowing for the conditions of nonconsumable electrode welding with low-frequency (up to 10 Hz) and high-frequency (above 10 kHz) pulsed modulation of welding current. Results of numerical analysis of the distributed and integral characteristics of an argon arc with refractory cathode at pulse variation of current are given. It was performed on the base of models of a non-stationary arc with distributed and concentrated parameters. Results of computer modeling of thermal, hydrodynamic and electromagnetic processes in the welded metal (also at self-consistent accounting of the processes that proceed in arc plasma) were analyzed for the case of spot TIG welding with low-frequency pulse modulation of current. Presented are the analytical dependencies that describe the impact of the shape and parameters of welding current pulses on the characteristics of dynamic action of an arc with a refractory cathode on weld pool metal. 21 Ref., 4 Tabl., 19 Fig.

**Keywords:** arc with refractory cathode, TIG welding, arc plasma, welded metal, penetration, welding current modulation, pulse, frequency, fill factor, amplitude, mathematical modeling

Надійшла до редакції 21.12.2019



# ЧИСЕЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ БАЛКОВИХ ВИРОБІВ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ПРИ ПОШАРОВОМУ ФОРМУВАННІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ\*

О.С. Міленін<sup>1</sup>, О.А. Великоіваненко<sup>1</sup>, С.С. Козлітіна<sup>1</sup>, С.М. Кандаля<sup>1</sup>, А.Є. Бабенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Розроблено комплекс математичних моделей і засобів їх комп'ютерної реалізації для чисельного прогнозування кінетики температурних полів, фазового та структурного станів, механічних напружень і деформацій при пошаровому формуванні типових виробів зі сплавів на основі титану. На характерних прикладах електронно-променевого наплавлення балкових конструкцій таврового профілю з титанового сплаву ВТ6 за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer досліджено особливості кінетики їх стану в залежності від технологічних параметрів виробництва. Показано вплив товщини підкладки на закономірності розвитку температурного поля при пошаровому формуванні балкових елементів та на структурний стан металу після повного охолодження. На прикладі формування товстостінного таврового виробу показано, що важливим фактором, який дозволяє отримати низький рівень залишкових напружень, є оптимізація часу затримки між наплавленням кожного з валиків для забезпечення умов рівномірного охолодження конструкції. Бібліогр. 11, рис. 14.

*Ключові слова:* адитивні технології, електронно-променеве наплавлення, xBeam 3D Metal Printer, математичне моделювання, макроструктура, механічні властивості, напружено-деформований стан

Стійкою сучасною тенденцією при розробці схем виробництва відповідальних конструкційних елементів складної форми є широке використання адитивних технологій. Зокрема, свого впровадження дістали схеми електронно-променевого наплавлення (ЕПН) деталей з легких металів (перш за все, титанових та алюмінієвих сплавів) для потреб авіакосмічної галузі [1–3]. Характерним прикладом реалізації такої технології в Україні є xBeam 3D Metal Printer, розроблений ПрАТ «НВО «Червона Хвиля» [4]. Цей технологічний процес передбачає пошарове формування за допомогою ЕПН типових виробів в умовах глибокого вакууму, що дозволяє ефективно фокусувати електронний промінь і уникати забруднення металу домішками проникнення в разі його високої спорідненості з киснем і/або азотом. Підкладка формованого виробу поміщається в силове оснащення на рухомій платформі, яка переміщається відносно нерухомого джерела нагрівання із заданою швидкістю  $V_s$  (рис. 1). Джерело нагрівання є складовою комплексної системи фокусування променя та подачі присадного дроту, електронний промінь фокусується таким чином, щоб він мав форму гострого конуса, який сходиться максимально близько до поверхні формованої деталі. Це дозволяє реалізу-

вати ефективне та досить рівномірне розплавлення присадного дроту без істотного його перегрівання, а також забезпечує супутнє підігрівання області наплавлення для активації поверхні твердого металу перед його контактом з рідким присадним матеріалом.

Для отримання виробів гарантованої якості необхідним є оптимізування технологічних параметрів відповідних виробничих процесів. Зокрема, це стосується забезпечення сплавлення послідов-

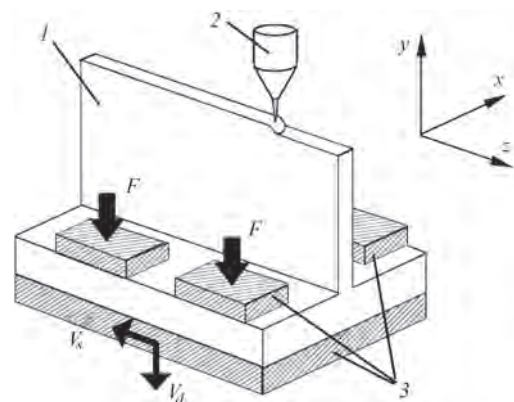


Рис. 1. Схема формування стінки балкової конструкції таврового профілю за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer: 1 — виріб, що формується; 2 — джерело нагрівання; 3 — технологічне оснащення

О.С. Міленін — <http://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, С.М. Кандаля — <http://orcid.org/0000-0002-2036-0498/>

\*За матеріалами доповіді, представленого на IX міжнародній конференції «Промислові технології в зварюванні та обробці матеріалів», 9–13 вересня 2019 р., м. Одеса (в роботі також приймали участь О.В. Махненко, Н.С. Ананченко, Д.В. Ковальчук).

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, С.С. Козлітіна, С.М. Кандаля, А.Є. Бабенко, 2020

них наплавлених шарів, гомогенності структури металу, низького рівня залишкових деформацій та напружень. Тому як проведення широкого спектра експериментальних досліджень пов'язано зі значними економічними втратами, раціональним є використання математичного та комп'ютерного моделювання процесів, що визначають кінцеву якість виробів.

В рамках цієї роботи було розроблено комплекс підходів для чисельного прогнозування кінетики температурних полів, фазового та структурного станів, механічних напружень і деформацій при пошаровому формуванні типових балкових конструкцій різного розміру за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer з метою вивчення особливостей впливу технологічних параметрів на поточний і кінцевий стан виробів.

**Розробка математичної моделі кінетики температурного та напружено-деформованого станів типових конструкційних елементів при пошаровому формуванні зразка.** Першим етапом чисельного дослідження кінетики стану виробу в процесі пошарового формування є прогнозування розвитку температурного поля. В свою чергу, нерівномірне нагрівання, зміна структурного складу, а також температурні залежності властивостей металу визначають просторовий розподіл напружень і деформацій у конструкції. Розподіл температур у часі та просторі визначається процесами кондуктивного поширення, для яких зв'язок між моментом часу  $t$  і полем температур  $T = T(x, y, z)$  описується тривимірним рівнянням теплопровідності [5]:

$$\begin{aligned} \text{ср}(x, y, z, T) \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = \\ = \nabla [\lambda(x, y, z, T) \nabla T(x, y, z)], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\lambda$ ,  $\text{ср}$  — відповідно, теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу конструкції в даній точці як функції від просторових координат і температури.

Джерелами тепла в розглянутому випадку є електронний промінь з потужністю  $q_i$ . Необхідно додатково зазначити, що використання присаджувального матеріалу означає, що частина енергії джерела витрачається на його розплавлення, і внесення тепла в конструкцію буде відбуватися двома шляхами: безпосередньо від джерела та переносом розплавленого металу на формований виріб. Це може бути враховано безпосередньою зміною профілю конструкції шляхом додавання ділянок, температура яких  $T_m$  трохи вища температури ліквідусу  $T_L$  для врахування перегрівання присаджувального матеріалу. При цьому величина ефективного тепловкладення джерела має бути зменшена на величину енерговитрат на розплавлення металу

присадки  $q_m$ . Таким чином, розподіл енергії в плямі нагрівання може бути описаний за допомогою нормального закону розподілу, який має наступний математичний вираз:

$$q(x, z) = \eta(q_i - q_m) \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2}{K_x} - \frac{(z - z_0)^2}{K_z} \right], \quad (2)$$

$$q_m = \int_{T_C}^{T_m} \text{ср}(T) v_m S_m dT + g_{fi} v_m S_m \rho(T_L),$$

де  $\eta$  — коефіцієнт корисної дії джерела нагрівання (теплова ефективність);  $x_0, z_0$  — координати центру джерела нагрівання;  $K_x, K_z$  — коефіцієнти концентрації потоку енергії у відповідних напрямках;  $\rho$  — густина металу конструкції як функція від температури;  $v_m$  — швидкість подачі присаджувального матеріалу,  $S_m$  — площа поперечного перерізу дроту;  $g_{fi}$  — прихована теплота плавлення присаджувального матеріалу.

Граничні умови, необхідні для розв'язання задачі (1), залежать від природи стоку тепла з поверхні виробу. Так, в області контакту з технологічним оснащенням стік тепла може бути описаний законом Ньютона, тоді як на вільній поверхні він характеризується тепловим випромінюванням (закон Стефана–Больцмана) з додатковим вкладенням енергії з поверхні виробу, що наплавляється, при розміщенні там джерела нагрівання. Таким чином, граничні умови для розв'язання задачі теплопровідності в даному випадку мають такий математичний вираз:

$$\begin{aligned} -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \\ = \begin{cases} \alpha_t (T - T_c), & \text{в області контакту з оснащенням} \\ \varepsilon \sigma_{SF} (T^4 - T_c^4) - q, & \text{на вільних поверхнях} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

де  $n$  — нормаль до поверхні;  $\alpha_t$  — коефіцієнт тепловіддачі;  $T_c$  — температура навколишнього середовища;  $\varepsilon$  — ступінь чорноти матеріалу;  $\sigma_{SF}$  — константа Стефана–Больцмана;  $q$  — потік енергії електронно-променевого нагрівання.

На основі результатів прогнозування кінетики температурного поля при пошаровому формуванні типових виробів з титанового сплаву ВТ6 можливо спрогнозувати розмір зерна металу та певні його властивості в різних частинах конструкції в залежності від технологічних параметрів процесу. Відомо, що зі збільшенням швидкості охолодження при кристалізації відбувається подрібнення структурних складових типових сплавів на основі титану. На рис. 2 показано залежність розміру зерна для сплаву ВТ6 від швидкості

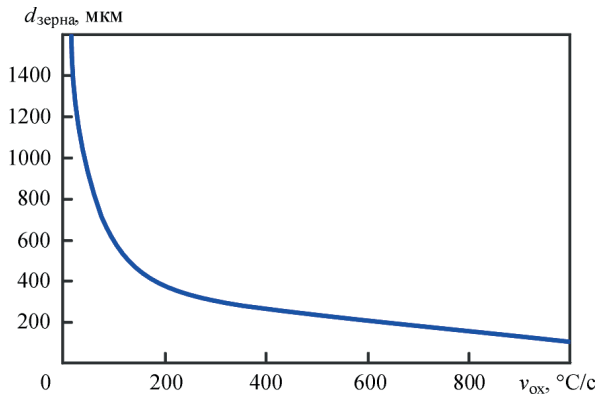


Рис. 2. Залежність розміру зерна титанового сплаву ВТ6 від швидкості охолодження [6]

охолодження [6], яка може бути апроксимована наступним рівнянням:

$$d_{\text{зерна}} = \begin{cases} 8220v_{\text{ох}}^{-0,58} \text{ мкм, при } v_{\text{ох}} \geq 6 \text{ }^{\circ}\text{C/c} \\ 2500 \text{ мкм, при } v_{\text{ох}} < 6 \text{ }^{\circ}\text{C/c} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $d_{\text{зерна}}$  — характерний розмір зерна металу;  $v_{\text{ох}}$  — швидкість охолодження.

Крім того, фактичні механічні характеристики сплаву ВТ6 залежать від швидкості охолодження при фазовому перетворенні, що визначає остаточне процентне співвідношення  $\alpha$ -фази в  $T, ^{\circ}\text{C}$

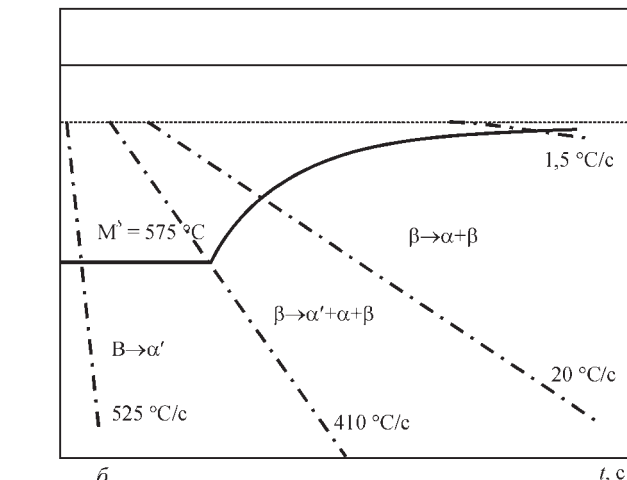
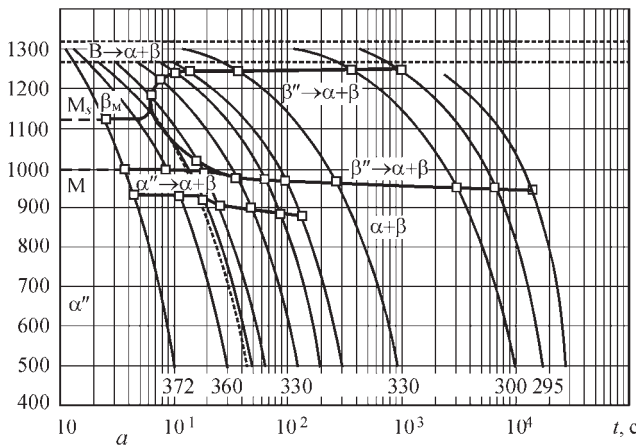


Рис. 3. Діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 при охолодженні: а — [7]; б — [8]

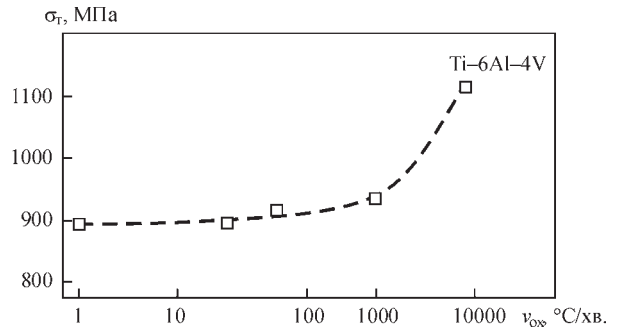


Рис. 4. Залежність границі текучості сплаву ВТ6 від швидкості охолодження [9]

( $\alpha+\beta$ )-сплавів. На рис. 3 представлені діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 при охолодженні [7, 8], швидкість охолодження визначається в діапазоні перетворень мікроструктури  $\beta$  в ( $\alpha+\beta$ ), яке відбувається в діапазоні від 1000 до 670  $^{\circ}\text{C}$ . Слід зазначити, що пошарове ЕПН за рахунок низького тепловкладення та високих швидкостей руху джерела нагрівання характеризується досить високою інтенсивністю охолодження наплавленого матеріалу, що сприяє утворенню мартенситної мікроструктури з вмістом  $\alpha'$ -фази. Як видно на рис. 4 [9] та при збільшенні швидкості охолодження, отже, і при зменшенні розміру зерна, границя текучості сплаву ВТ6 зростає. Дані на рис. 5 [8], які отримані стосовно адитивної технології пошарового формування зразків методом ЕПН показують, що збільшення відносного вмісту  $\alpha'$ -фази  $V_{\alpha'}$  викликає незначне зниження границі текучості сплаву ВТ6, а відносне подовження  $\delta$  при цьому знижується досить помітно (рис. 5, б). Ці залежності можуть бути апроксимовані наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= 995 - 0,107v_{\text{ох}} - 18V_{\alpha'}, \text{ МПа,} \\ \delta &= -9V_{\alpha'} + 10,9, \%, \end{aligned} \quad (5)$$

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля та розвитку НДС базується на скінченно-елементному описанні з використанням восьмиузлових скінченних елементів (СЕ). У межах об'єму СЕ розподіли температур, напружень і деформацій приймаються однорідними. Приріст тензора деформацій може бути представлено як суперпозиція наступних компонентів [10]:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + \delta_{ij}d\epsilon_T, \quad (i, j = x, y, z), \quad (6)$$

де  $d\epsilon_{ij}^e$ ,  $d\epsilon_{ij}^p$ ,  $\delta_{ij}d\epsilon_T$  — компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності, температурним розширенням, відповідно;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Тензори механічних напружень  $\sigma_{ij}$  і пружних деформацій  $d\epsilon_{ij}^e$  пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто



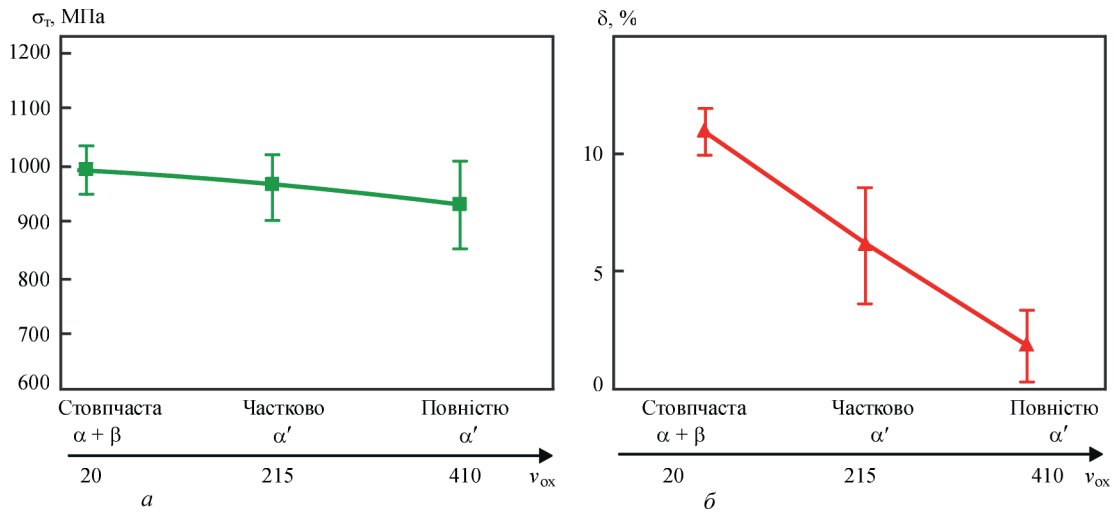


Рис. 5. Залежність границі текучості (а) та відносного подовження (б) сплаву ВТ6 від швидкості охолодження та кількості  $\alpha'$ -фази [8]

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K\sigma + \varphi), \tag{7}$$

де  $\sigma$  — середнє значення нормальних компонентів тензора напружень  $\sigma_{ij}$ , тобто  $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) / 3$ ;  $K = (1 - 2\nu) / E$  — модуль об’ємного стиску;  $G$  — модуль зсуву,  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коефіцієнт Пуасона;  $\varphi$  — об’ємні деформації.

Приріст деформацій миттєвої пластичності  $d\epsilon_{ij}^p$  в конкретному СЕ обчислювався за допомогою лінійної залежності скалярної функції  $\Lambda$  і дивіаторної складової тензора напружень, а саме:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\Lambda (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma). \tag{8}$$

Конкретне значення функції  $\Lambda$  залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні пластичного плину матеріалу  $\Phi$ , яка характеризується напруженням  $\sigma_s$ :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_s \text{ недопустимий,} \end{aligned} \tag{9}$$

де  $\sigma_i$  — інтенсивність напружень.

Виходячи зі сказаного вище, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{ij} &= \Psi (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \delta_{ij} (K\sigma + \Delta\epsilon_T) - \\ &- \frac{1}{2G} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \tag{10}$$

де символ «\*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування;  $\Psi$  — функція стану матеріалу визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T, \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \text{ стан } \sigma_i > \sigma_s \text{ недопустимий.} \end{aligned} \tag{11}$$

Визначення функції  $\Psi$  проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування у рамках крайової задачі нестационарної термопластичності, що дозволяє розв’язати нелінійність за пластичним плином матеріалу. Виходячи з конкретного значення функції  $\Psi$  із (11) визначається поле деформацій на кожному етапі навантаження з урахуванням залежності  $\sigma_s(T, \epsilon_p)$ :

$$\Delta\epsilon_{ij} = \left( \Psi - \frac{1}{2G} \right) \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma). \tag{12}$$

При цьому на кожному кроці ітерації по  $\Psi$  напруження  $\sigma_{ij}$  обчислюються згідно з наступним алгоритмом (за повторюваними індексами відбувається підсумовування):

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left( \Delta\epsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta\epsilon \right) + J_{ij}, \tag{13}$$

де

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon &= \frac{\Delta\epsilon_{ii}}{3}, \\ J_{ij} &= \frac{1}{\Psi} \left[ (b_{ij} - \delta_{ij} b) + \delta_{ij} \left( K\sigma^* - \frac{\Delta\epsilon_T}{K} \right) \right], \end{aligned} \tag{14}$$

$$b_{ij} = \left( \frac{\sigma_{ij}}{2G} \right)^* + \delta_{ij} [\sigma_m^* (K - \frac{1}{2G})^* - \Delta\varphi], \quad b = \frac{b_{ii}}{3}.$$

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянням статки для внутрішніх СЕ і граничним умовам — для поверхневих. У свою чергу, компоненти вектора переміщень  $\Delta U_i = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$  задовольняють відповідним умовам на границі. Розв’язувана система рівнянь у змінних вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному

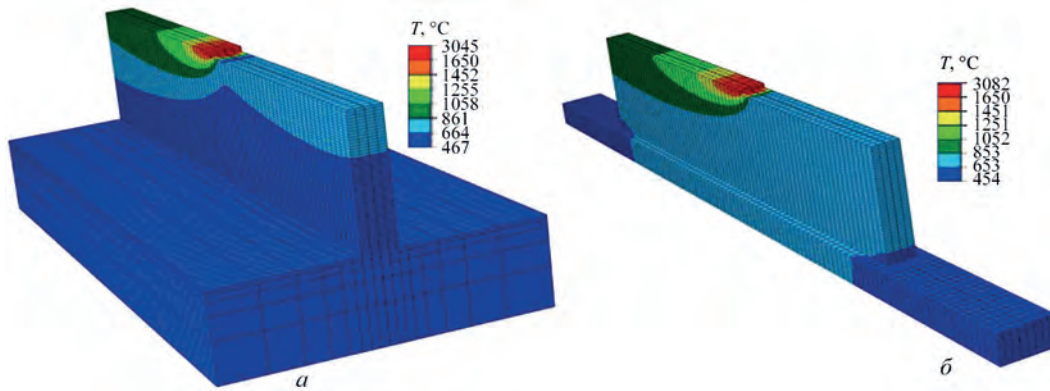


Рис. 6. Порівняння розподілу температур в тавровому зразку з великою (а) та малою (б) підкладками в процесі пошарового формування деталі

кроці простежування та ітерацій по  $\Psi$  визначається мінімізацією наступного функціонала (варіаційний принцип Лагранжа):

$$\Theta_1 = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_P^{m,n,r}, \quad (15)$$

де  $\sum_V$  — оператор суми по внутрішніх СЕ;  $\sum_{S_p}$  — оператор суми по поверхневих СЕ, на яких задані компоненти силового вектора  $P_i$ , тобто наступна система рівнянь дозволяє отримати розв'язок в компонентах вектора приростів переміщень на кожному кроці простежування та ітерацій по  $\Psi$  для конкретного СЕ:

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \Delta U_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial \Delta V_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial \Delta W_{m,n,r}} = 0. \quad (16)$$

**Результати моделювання температурних полів при пошаровому формуванні таврового зразка та прогнозування структури і механічних властивостей матеріалу.** Особливості кінетики температурного поля досліджувались на характерному прикладі пошарового формування балкового виробу таврового профілю. Рекомендовані параметри процесу наступні: присаджувальний матеріал — титановий пруток діаметром 1,6 мм, потужність електронного променя — 4,5 кВт, швидкість подачі присаджувального матеріалу — 14 мм/с, швидкість переміщення підкладки — 14 мм/с. Для визначення впливу геометричних особливостей виробу розглядалося ЕПН на підкладки різної товщини, а саме масивний розміром 8×30×70 мм та малій — 3×6×110 мм. Результати розв'язання задачі нестационарної теплопровідності показали, що кінетика температурного поля при пошаровому формуванні таврового зразка на масивній підкладці має істотно тривимірний характер, тоді як для випадку малої підкладки відбувається більш рівномірне прогрівання зразка за об'ємом (див. рис. 6), що можна пояснити ефектом накопичення тепла.

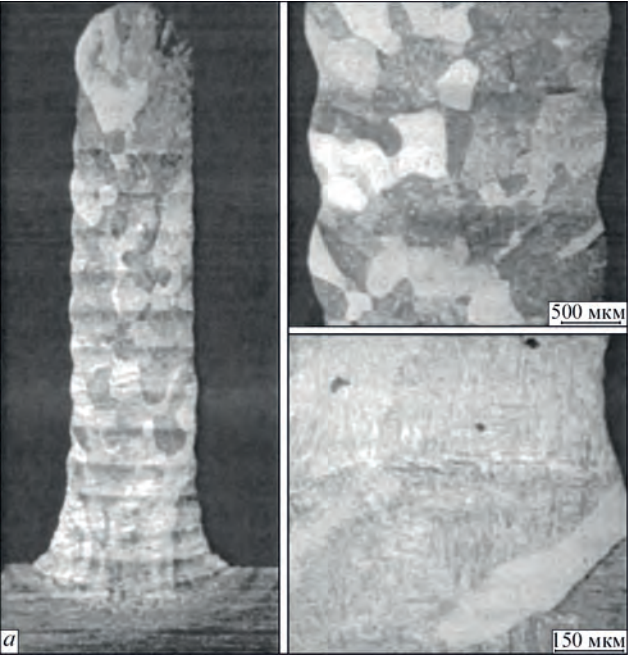
Як показав аналіз термоциклів (рис. 7), в діапазоні мікроструктурних перетворень від 1000 до 670 °С матеріал нагрівається та охолоджується 3 рази: перший раз під час наплавлення шару, потім — під час наплавлення наступних двох шарів. Останній цикл охолодження в зазначеному діапазоні температур визначає залишкову мікроструктуру та розмір зерна. Максимальна температура нагрівання в розглянутій області від наплавлення наступного третього та більш віддалених шарів — нижче температури 1000 °С, тому мікроструктурні перетворення та значна зміна розміру зерна не відбуваються. Крім того, даний процес характеризується досить високими швидкостями охолодження (160...660 °С/с), тому згідно діаграми мікроструктурних перетворень сплаву ВТ6 (див. рис. 2) в наплавленому матеріалі таврового зразка прогнозується мартенситна мікроструктура з вмістом  $\alpha'$ -фази. За даними розрахунків в матеріалі першого шару, де отримана найвища швидкість охолодження через наявність масивної холодної підкладки, утворюється зерно розміром 180 мкм, а в точках при формуванні 5 і 20 шарів, де матеріал наплавляється на вже розігрітий зразок, розмір зерна значно більший і досягає 300...450 мкм.

Ці результати відповідають наявним експериментальним даним [4] про макроструктуру зразка титанового сплаву ВТ6, отриманого за технологією пошарового формування xBeam 3D Metal Printer: розмір зерна в верхніх шарах зразка ста-



Рис. 7. Характерний термоцикл в матеріалі таврового зразка (5-й шар) при багатшаровому формуванні

новить приблизно 300...450 мкм, а в шарах біля основи зразка 150...250 мкм (рис. 8). Таким чином, результати прогнозування показали задовільну точність у порівнянні з експериментом, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування макроструктури та механічних властивостей металу конструкцій, отриманих за допомогою подібних технологій.



Як було показано авторами в попередніх роботах, одним з ефективних шляхів оптимізації температурних полів при пошаровому формуванні типових балкових конструкцій є використання змінного по висоті виробу часу затримки  $\Delta t$  наплавлення кожного з валиків [11]. Це дозволяє забезпечити природну дисипацію надлишкового тепла, яке накопичується по мірі наплавлення ви-

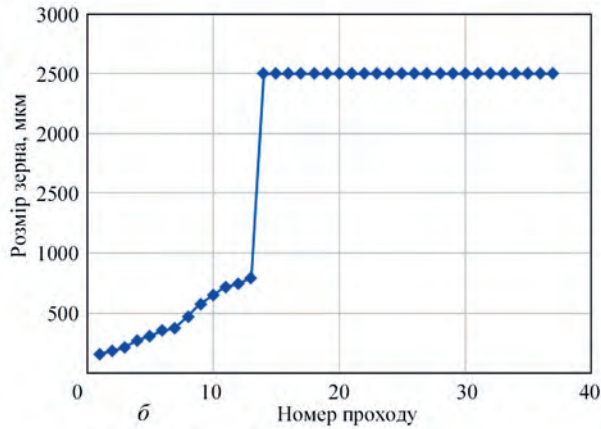


Рис. 8. Макроструктура таврового зразка з титанового сплаву ВТ6: *a* — експериментальні дослідження [11]; *б* — результати розрахунку

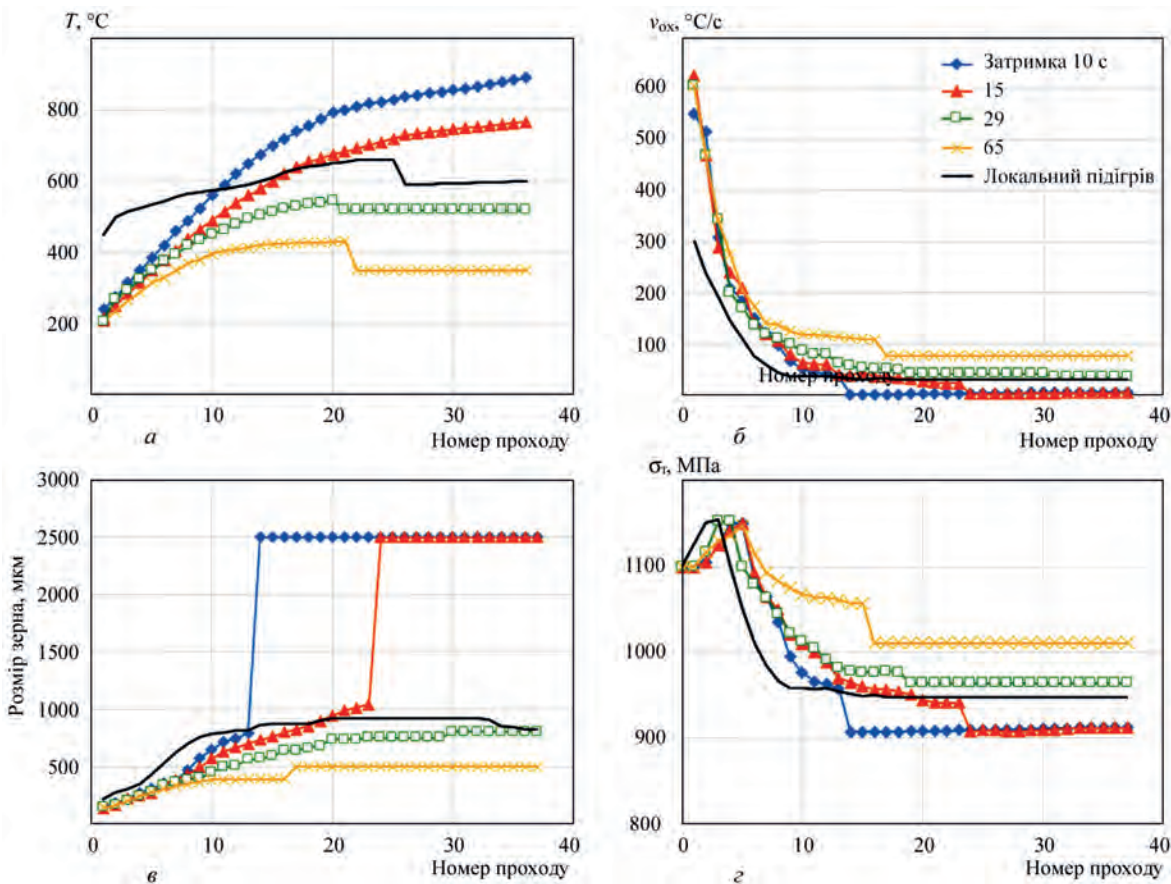


Рис. 9. Залежність температури у точці перед наплавленням наступного шару (*a*), швидкості охолодження (*б*), розміру зерна (*в*) і границі текучості матеріалу (*г*) від номера проходу для різного часу затримки між проходами



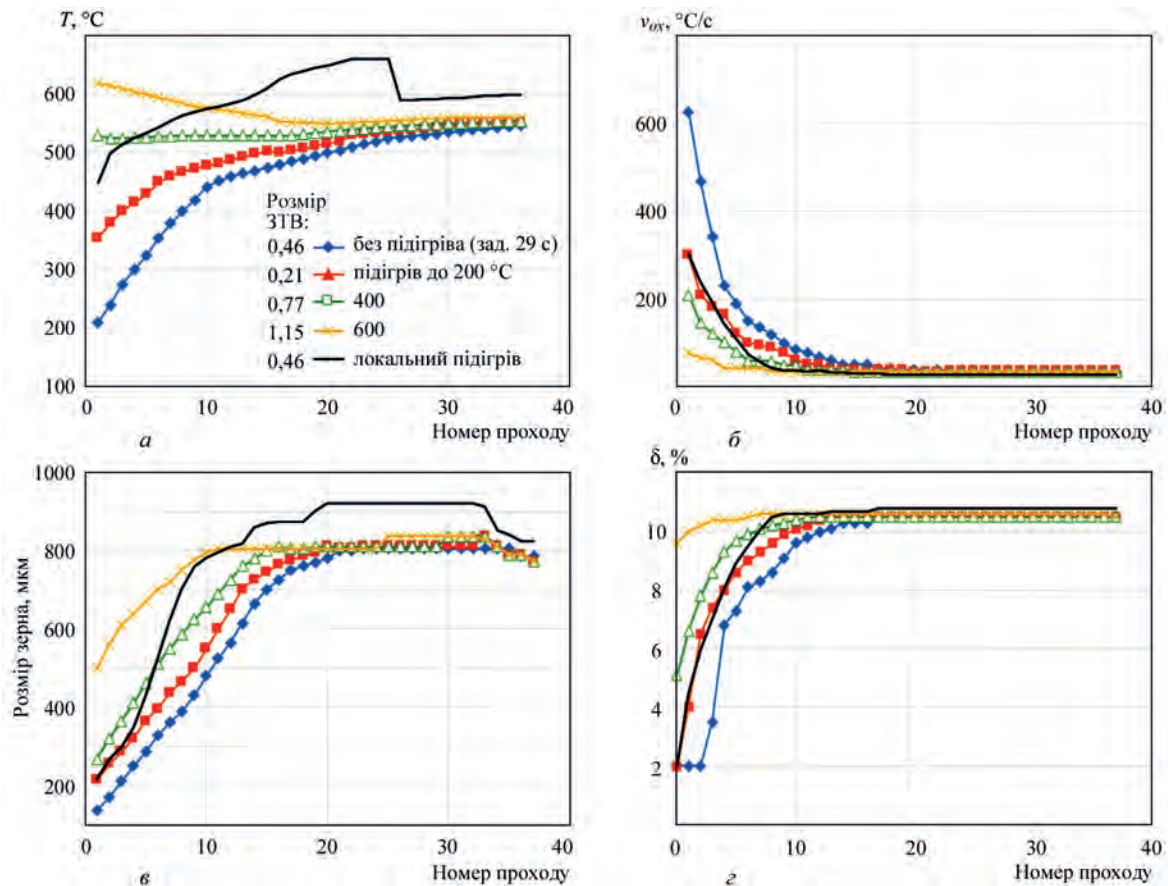


Рис. 10. Залежність температури у точці перед наплавленням наступного шару (а), швидкості охолодження (б), розміру зерна (в) і відносного видовження (г) від номера проходу для різного попереднього підігрівання підкладки

робу, та уникнути його перегрівання без необхідності варіювання потужності (швидкості) джерела нагрівання. Цей технологічний параметр суттєво впливає на швидкість охолодження, розмір зерна і, як наслідок, на границю текучості матеріалу виробу (рис. 9, а–в). З наведених даних видно, що кращі міцнісні характеристики та більш рівномірна структура матеріалу визначені в зразку, виготовленому з більшим часом  $\Delta t$ , тоді як недостатній час між наплавленням валиків  $\Delta t = 10\text{ с}$  та  $15\text{ с}$  має наслідком понижені міцнісні характеристики металу на верхніх шарах, і нерівномірність зерна по висоті. З іншого боку, завеликий час між проходами (65 с) веде до формування надлишку  $\alpha'$ -фази, і зменшення пластичності матеріалу. Попереднє підігрівання підкладки дозволяє отримати більш рівномірною структуру на нижніх шарах і суттєво покращує пластичність матеріалу (рис. 10, а–в). Для часу між наплавленням валиків  $\Delta t = 10\text{ с}$  та  $15\text{ с}$  розмір зерна суттєво збільшується, починаючи з номера валика, на якому температура між проходами перевищує  $670\text{ }^\circ\text{C}$ : тоді зерно остаточно формується після повного охолодження зразка, і швидкість охолодження при цьому низька. При часі між наплавленням валиків  $\Delta t = 29\text{ с}$ , температура між валиками не перевищує  $670\text{ }^\circ\text{C}$ , отже отримане зерно більш рівномірне.

**Характерні особливості формування залишкового напружено-деформованого стану при пошаровому формуванні товстостінних виробів таврового профілю за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer.** У попередніх роботах авторами було досліджено особливості кінетики напружено-деформованого стану (НДС) при пошаровому формуванні балкових, циліндричних і сферичних конструкційних елементів при використанні технології xBeam 3D Metal Printer [11].

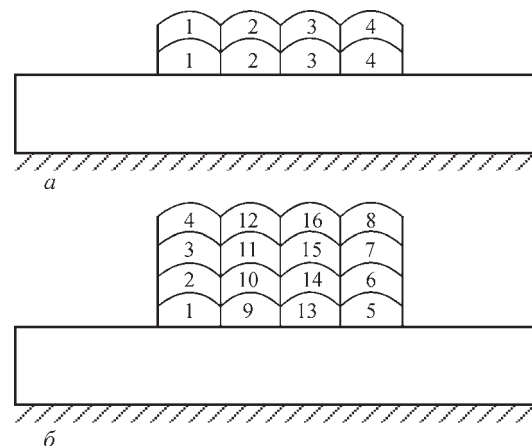


Рис. 11. Характерні схеми послідовності наплавлення валиків при формуванні балкової конструкції таврового профілю: а – наплавлення шарами (схема А); б – наплавлення стовпцями (схема Б)

Зокрема, підкреслювалося, що однією з переваг даної технології є можливість наплавлення досить вузьких валиків рідкого металу та виробництво тонкостінних конструкційних елементів (з товщиною стінки 2...3 мм) з невеликими геометричними допусками. Але застосовність xBeam 3D Metal

Printer не обмежується тільки тонкостінними виробами: при необхідності отримання товстостінних деталей можуть бути використані різні схеми послідовності накладення формуючих валиків, які дозволяють отримувати конструкції з різною товщиною стінки без істотної зміни відповідних тех-

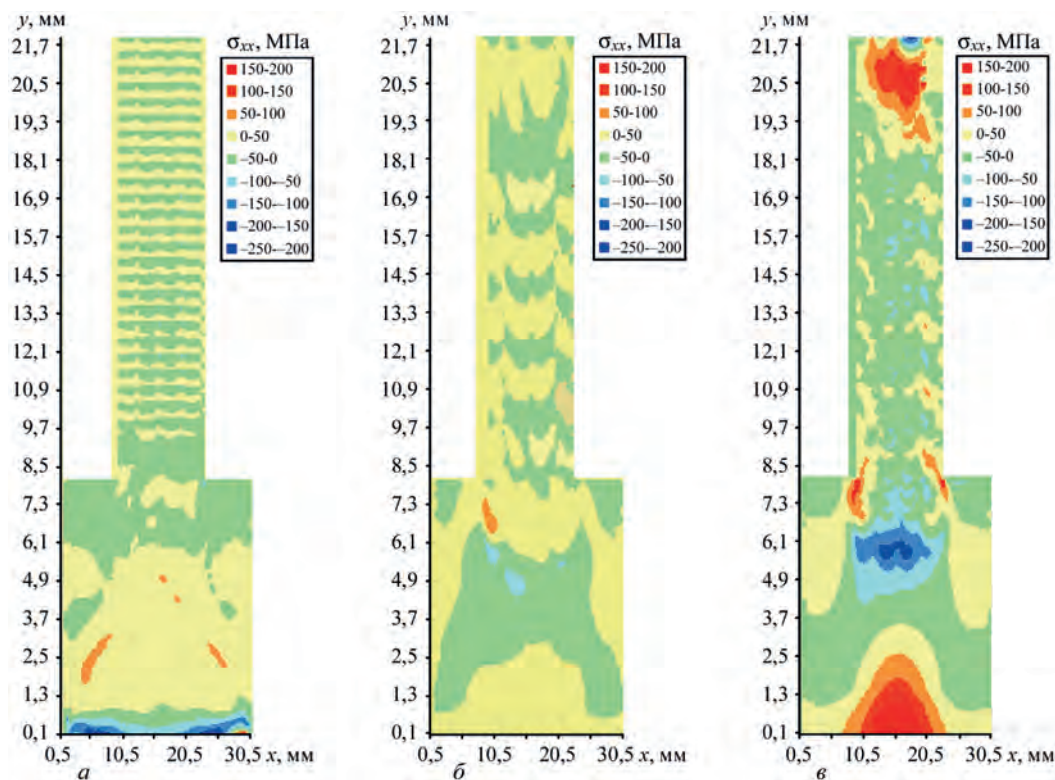


Рис. 12. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{xx}$  (МПа) в перерізі виробу таврового профілю: а — схема А з оптимізацією; б — схема Б з оптимізацією; в — схема Б без оптимізації (див. рис. 11)

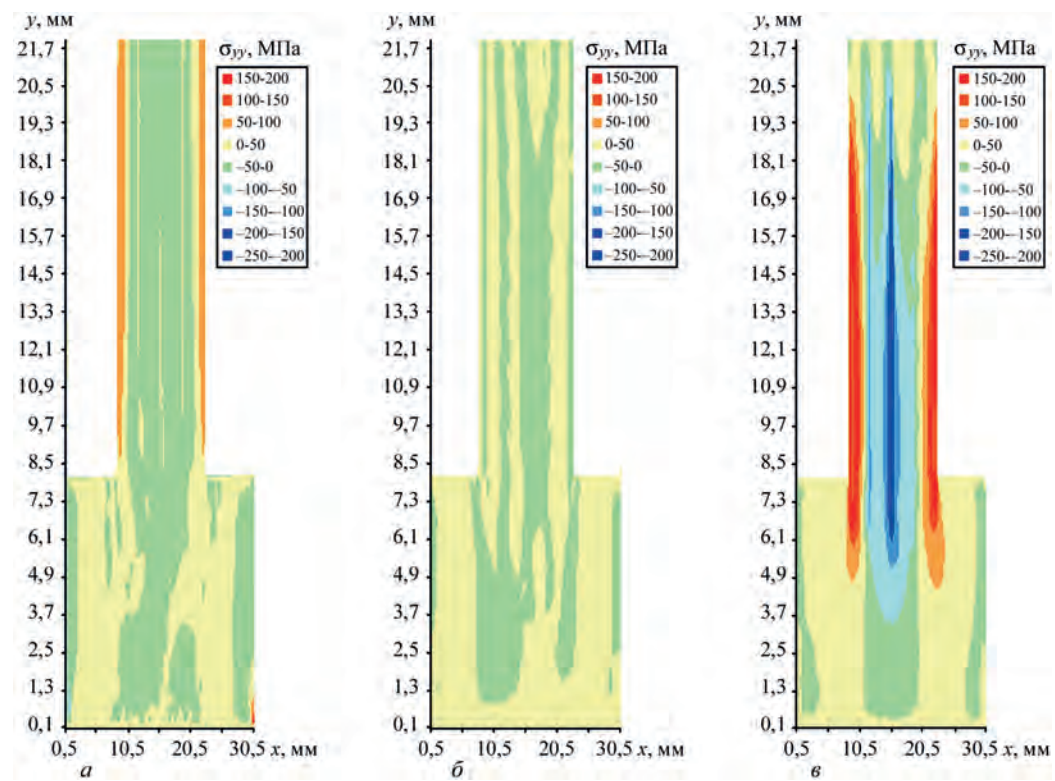


Рис. 13. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{yy}$  (МПа) в перерізі виробу таврового профілю: а — схема А з оптимізацією; б — схема Б з оптимізацією; в — схема Б без оптимізації (див. рис. 11)



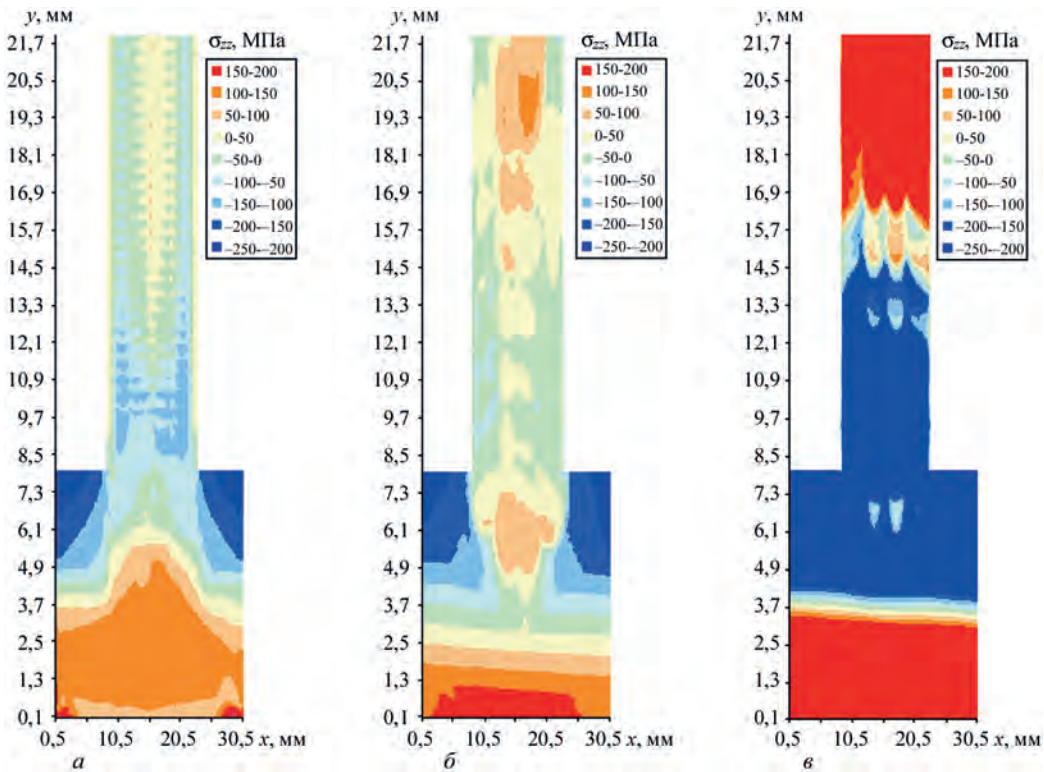


Рис. 14. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{zz}$  (МПа) в перерізі виробу таврового профілю: а — схема А з оптимізацією; б — схема Б з оптимізацією; в — схема Б без оптимізації (див. рис. 11)

нологічних параметрів. Проте такий процес, безумовно, вимагає оптимізації, в тому числі, з точки зору раціонального вибору часу початку формування кожного валика (час затримки  $\Delta t$ ) та формування сприятливого залишкового НДС.

В рамках цієї роботи на прикладі товстостінної балки таврового профілю було досліджено особливості залишкового НДС в залежності від технологічних умов виробництва. Так, було розглянуто дві характерні схеми наплавлення стінки тавра товщиною 12,8 мм, яка складається з чотирьох паралельних валиків шириною 3,2 мм і висотою 0,8 мм (рис. 11), матеріал конструкції – титановий сплав ВТ6. Принципова різниця між цими схемами полягає в тому, що для схеми А стінка формується послідовними горизонтальними шарами, тоді як для схеми Б формуючими є вертикальні стовпці.

На рис. 12–14 показані результати прогнозування залишкових полів напружень в перерізі товстостінної балки для схем А і Б з урахуванням оптимізації температурних полів шляхом вибору оптимального часу затримки  $\Delta t$ , а також наплавлення за схемою Б без такої оптимізації. Як видно з наведених результатів, оптимізація температурного поля дозволяє отримати достатньо рівномірне за товщиною прогрівання конструкції, незважаючи на різну послідовність накладення валиків. Таким чином, реалізуються умови рівномірного охолодження виробу і, відповідно, низький рівень залишкових напружень. Природним концентратором напружень в такому випадку є область пе-

реходу полиці таврового профілю в стінку, де умови рівномірного охолодження не виконуються з причини масивності підкладки (полиці тавра). Якщо вимоги оптимізації температурного поля не дотримуються і конструкція прогривається нерівномірно, то це призводить до формування високих напружень, особливо, в поздовжньому напрямку (див. рис. 14, в). Тому раціональний вибір часу затримки між наплавленням валиків є важливим не тільки з точки зору гарантування сприятливих для якісного формування виробу умов, а й для зниження залишкових напружень, що необхідно для високих показників роботоздатності одержуваних конструкційних елементів.

## Висновки

1. Розроблено комплекс математичних моделей для чисельного прогнозування кінетики температурних полів, фазового та структурного станів, механічних напружень і деформацій при пошаровому формуванні типових балкових конструкцій з титанового сплаву ВТ6 за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer. Порівняння з даними експериментальних досліджень показало задовільну точність отримуваних розрахункових результатів прогнозування макроструктури та механічних властивостей металу конструкцій.

2. Досліджено вплив розміру підкладки на кінетику температурного поля в процесі пошарового наплавлення стінки таврового профілю. Показано, що при масивній підкладці товщиною 8 мм розподіл тем-



ператур має істотно тривимірний характер, тоді як для випадку малої підкладки товщиною 3 мм відбувається більш рівномірне прогрівання зразка за об'ємом, що пояснюється ефектом накопичення тепла.

3. Показано, що кращі міцнісні характеристики та більш рівномірна структура матеріалу деталі, отриманої пошаровим формуванням, можна досягти при максимальному збільшенні часу затримки між наплавленням валиків, тоді як недостатній час має наслідком понижені міцнісні характеристики металу на верхніх шарах, і нерівномірність зерна по висоті. Проте, збільшення часу між проходами може привести до формування надлишку  $\alpha'$ -фази і зменшення пластичності матеріалу. Ефективним шляхом для отримання більш рівномірною структури та покращення пластичності матеріалу є попереднє підігрівання пластини перед початком виготовлення конструкції.

4. На характерному прикладі пошарового формування балкової конструкції таврового профілю досліджено закономірності залишкового напруженого стану при виготовленні товстостінних конструкцій. Показано, що важливим фактором, який дозволяє отримати низький рівень залишкових напружень, є оптимізація часу затримки наплавлення кожного з валиків. При цьому забезпечуються умови рівномірного охолодження конструкції (за винятком області переходу полиці тавра в стінку) і суттєве зниження залишкових напружень. Порушення оптимального теплового режиму може призвести до істотного зростання залишкових напружень (особливо, поздовжніх), зумовивши негативний ефект на роботоздатність такої конструкції.

## Список літератури/References

1. Edwards P. et al. (2013). Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, 6. DOI: 061016/1-061016/7.
2. Juechter V., Franke M.M., Merenda T. et al. (2018) Additive manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by selective electron beam melting for automotive applications. *Additive Manufacturing*, 22, 118–126. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.008.
3. Dutta B., Froes F.H. (2016) *Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges and Opportunities*. Oxford: Butterworth-Heinemann. DOI: 10.1016/C2015-0-02470-4.
4. Ковальчук Д.В., Мельник В.И., Мельник И.В. (2017) Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing. *Сборник трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*, Киев, сс. 45–52.
5. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
6. Мохненко В.И. (2006) *Safety service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
7. Полькин И.С. (2006) Повышение свойств металлических материалов за счет применения новых технологических процессов. *Перспективные технологии легких и специальных сплавов*. Москва, Физматлит, сс. 66–73.
8. Polkin, I.S. (2006) Improvement of properties of metallic materials due to application of new technological processes. *In: Advanced technologies of light and special alloys*. Moscow, Fizmatlit, 66-73 [in Russian].
9. Sieniawski J., Ziaja W., Kubiak K. (2013) Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys. *Titanium alloys*, 69–79.
10. Liu S., Shin Y.C. (2019) Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials and design*, 164, 1–23.
11. Patil S., Kekade S., Phapale K. (2016) Effect of  $\alpha$  and  $\beta$  phase volume fraction on machining characteristics of titanium alloy Ti6Al4V. *16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry*, 65.
12. Velikoivanenko E.A., Milenin A.S., Popov A.V. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 1, 117–127. DOI: 10.1007/s10559-019-00117-8.
13. Makhnenko O.V., Milenin A.S., Velikoivanenko E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding Journal*, 3, 7–14. DOI: 10.15407/tpwj2017.03.02.

## NUMERICAL PREDICTION OF KINETICS OF THE STATE OF BEAM PRODUCTS OF DIFFERENT THICKNESSES DURING LAYER-BY-LAYER ELECTRON BEAM SURFACING

O.S. Milenin<sup>1</sup>, O.A. Velikoivanenko<sup>1</sup>, S.S. Kozlitina<sup>1</sup>, S.M. Kandala<sup>1</sup>, A.E. Babenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Pobedy Ave., Kyiv-56, Ukraine

A complex of mathematical models and their computer means for numerical prediction of the kinetics of temperature fields, phase and structural states, mechanical stresses and deformations in layer-by-layer formation of typical products of titanium-based alloys was developed. On the typical examples of electron beam surfacing of T-shaped beam structures of titanium VT6 alloy produced with the help of xBeam 3D Metal Printer technology, the peculiarities of their kinetics depending on the technological parameters of production were investigated. The influence of the thickness of the substrate on regularities of the temperature field development during layer-by-layer formation of beam elements and on the structural state of the metal after complete cooling was shown. On the example of forming a thick-walled T-shape product it was shown, that an important factor, that allows obtaining a low level of residual stresses, is the optimization of the delay time between the surfacing of each of the beads to provide the conditions of uniform cooling of the structure. 11 Ref., 14 Fig.

**Keywords:** additive technologies, electron beam surfacing, xBeam 3D Metal Printer, mathematical modelling, macrostructure, mechanical properties, stress-strain state

Надійшла до редакції 21.11.2019

# ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ НА РІВЕНЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗІ СТАЛІ AISI 321

А.В. Бернацький, В.Д. Шелягін, О.В. Сіора, В.М. Сидорець, О.М. Берднікова

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

Метою дослідження було встановлення впливу просторового положення при лазерному зварюванні корозійностійкої жароміцної аустенітної сталі AISI 321 на мікроструктуру та рівень якості зварних з'єднань. У пластинах товщиною 3 мм робили провари при різних кутах нахилу до горизонтальної площини. Лазерне зварювання виконували «на підйом» та «на спуск», при неперервному та імпульсному режимах генерації лазерного випромінювання. За результатами візуального, радіографічного контролю та аналізу даних металографічних досліджень виконували оцінку рівня якості одержаних зразків на відповідність вимогам діючих стандартів. При зварюванні «на підйом» та «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, при всіх кутах нахилу, не було виявлено внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор та включень. Встановлено тенденцію збільшення як кількості, так і розміру пор, при зменшенні кута нахилу від 90 до 0° при зварюванні «на спуск» та «на підйом» в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. За даними металографічних досліджень у структурі зварних з'єднань, одержаних у різних просторових положеннях у сталі AISI 321 товщиною 3 мм, суттєвих відмінностей не спостерігається. При різних значеннях кута нахилу мікротвердість та розміри кристалітів відрізняються приблизно на 10 %. Натомість форма шва одержаних проварів відрізняється досить суттєво. Вперше одержано залежності показників якості зварних з'єднань зі сталі AISI 321 при лазерному зварюванні для різних просторових положень. Одержані залежності дозволяють визначити тенденції зміни форми та якості зварних з'єднань при зміні просторового положення або технологічних параметрів процесу лазерного зварювання. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* лазерне зварювання; корозійностійка сталь; жароміцна сталь; аустенітна сталь; технологічні параметри; просторове положення; якість; структура; пористість

**Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка задачі.** Номенклатура виробів для енергетики, авіакосмічної, хімічної, харчової та інших галузей промисловості включає деталі як малого, так і великого розміру із корозійностійких жароміцних сталей [1–3]. Їх конструкція часто має складну просторову форму із криволінійними профілями поверхні. Тому виникає потреба виконання різноманітних видів зварних з'єднань таких конструкцій у різних просторових положеннях [4–6]. У таких умовах треба не тільки враховувати фізичні ефекти, які супроводжують зварювання, але і намагатися задіяти їх на користь. Наприклад, враховуючи сили гравітації та поверхневого натягу можливо впливати на ступінь розкриття каналу проплавлення при переміщенні зварювальної ванни у різних напрямках [7]. Світові тенденції показують все більш широке застосування технологій лазерного зварювання для виготовлення таких конструкцій [8–10]. За допомогою сканування, регулювання швидкості переміщення та імпульсного керування потужністю лазерного випромінювання, можливо впливати на вкладення тепла у зону обробки та на стабільність формування каналу про-

плавлення і ступінь поглинання випромінювання у приповерхневій плазмі [7, 11–13]. Таким чином, виникає задача врахування вищезгаданих особливостей, що повинно дозволити отримати сукупність необхідних показників процесу лазерного зварювання у різних просторових положеннях.

Відсутність знань про залежність форми шва та характеристик зварних з'єднань від просторового положення не дозволяє визначити технологічні параметри лазерного зварювання, які є найбільш раціональними з точки зору досягнення високої якості та відповідності вимогам діючих стандартів.

Метою дослідження було встановлення впливу просторового положення при лазерному зварюванні корозійностійкої жароміцної аустенітної сталі AISI 321 на рівень якості та структуру зварних з'єднань.

**Методи, об'єкт та предмет дослідження.** Об'єктом досліджень виступав процес лазерного зварювання сталі AISI 321 у різних просторових положеннях.

Предметом дослідження є вплив просторового положення при лазерному зварюванні сталі

А.В. Бернацький – <http://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, В.Д. Шелягін – <http://orcid.org/0000-0001-8153-6533>,  
О.В. Сіора – <http://orcid.org/0000-0003-1927-790X>, В.М. Сидорець – <http://orcid.org/0000-0002-8498-4726>  
О.М. Берднікова – <http://orcid.org/0000-0001-9754-9478>

© А.В. Бернацький, В.Д. Шелягін, О.В. Сіора, В.М. Сидорець, О.М. Берднікова, 2020

AISI 321 на рівень якості та структуру зварних з'єднань.

Рівень якості зварних з'єднань визначали за ДСТУ EN ISO 13919–1:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь», згідно якому встановлено три рівня якості, що відповідають певному діапазону гранично допустимих розмірів дефектів і відносяться до зварних з'єднань.

Матеріалом дослідження були пластини розміром  $300 \times 100 \times 3$  мм з корозійностійкої жароміцної аустенітної сталі AISI 321 (аналог 12X18H10T) з межею міцності  $\sigma_b = 520 \dots 560$  МПа та наступним хімічним складом, мас. %: до 0,12 % C; до 0,8 % Si; 1...2 % Mn; 10...11 % Ni; до 0,2 % S; до 0,035 % P; 17...19 % Cr; до 0,6 % Ti; Fe – залишок).

Згідно з методикою експерименту, дослідження з лазерного зварювання в різних просторових положеннях проводили з використанням лабораторного станду (рис. 1), який був змонтований на базі Nd: YAG-лазеру «DY044» виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина).

По схемі, що наведена на рис. 2, у пластинах зі сталі AISI 321 робили провари, при різних кутах нахилу  $\alpha$  до горизонтальної площини механізму переміщення лазерної головки та струбцини зі зразком, а саме: у нижньому положенні; у вертикальному положенні; під кутами 60; 45; 30°. В усіх варіантах (крім нижнього положення), зварювання проводили «на підйом» (рис 2, а) та «на спуск» (рис. 2, б). Зварювання виконували у неперервному та імпульсному режимах генерації лазерного випромінювання на попередньо обраних режимах зварювання. Кут падіння лазерного випромінювання  $I$  на пластину 2 (рис. 2) залишався незмінним при різних просторових положеннях та становив 90°.

За результатами візуального, радіографічного контролю та металографічних досліджень одержаних зразків виконували оцінку їх рівня якості



Рис. 1. Лабораторний стенд для лазерного зварювання в різних просторових положеннях

на відповідність вимогам стандарту ДСТУ EN ISO 13919–1:2015.

**Технологічний експеримент та його результати.** При неперервному режимі генерації лазерного випромінювання технологічні параметри процесу зварювання були наступними: потужність лазерного випромінювання 4,4 кВт; швидкість зварювання 100 мм/с, заглиблення положення фокальної площини лінзи відносно поверхні зразків, що зварюються, 1 мм; витрати захисного газу (аргону) 500 см<sup>3</sup>/с.

При імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання технологічні параметри процесу зварювання були наступними: максимальна потужність лазерного випромінювання 4,4 кВт, відношення тривалостей імпульсу та паузи (прогальність) 1,67; частота слідування імпульсів 120 Гц; інші параметри аналогічні режимам зварювання при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання.

За результатами візуального контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321 встановлено наступне:

- в залежності від напрямку руху спостерігаються значні відмінності у зовнішньому вигляді поверхні шва, а саме, при зварюванні «на спуск» не зафіксовано кольорів мінливості при формуванні зварного шва, а при зварюванні «на підйом» спостерігаються кольори мінливості на поверхні зварного з'єднання;

- бризки зафіксовані при використанні неперервного та імпульсного режиму в усіх просторових положеннях, їхня кількість мінімальна при проплавленні у нижньому положенні, дещо зростає при куті нахилу 60° та вертикальному положенні та найвища кількість бризок спостерігаються при лазерному зварюванні на кутах нахилу 30 та 45°;

- при зварюванні «на підйом» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при всіх кутах нахилу, верхній валик зварного з'єднання формується з незначним заниженням та з утворенням «гребінця», висота «гребінця» та величина заниження зростає зі збільшенням кута нахилу до горизонтальної площини;

- при зварюванні «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання верх-

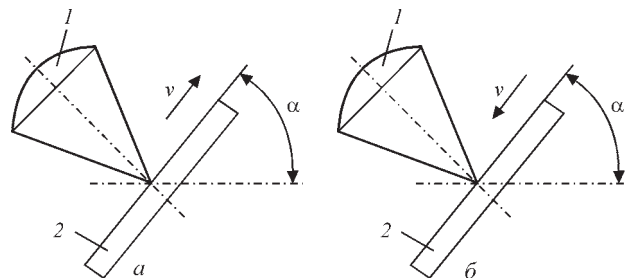


Рис. 2. Схеми виконання проварів у пластинах при лазерному зварюванні «на підйом» (а) та «на спуск» (б): 1 – лазерне випромінювання, що фокусується лінзою; 2 – пластину;  $\alpha$  – кут нахилу пластини до горизонтальної площини



ній валик зварного з’єднання формується з незначним заниженням та з утворенням «гребінця» лише при куті нахилу 30°.

За результатами радіографічного контролю одержаних проварів встановлено, що при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, при всіх кутах нахилу, не було виявлено внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор та неметалевих включень.

Радіографічний контроль проварів, одержаних при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання показав наявність внутрішніх дефектів у вигляді поодиноких пор або ланцюжків пор при всіх кутах нахилу (табл. 1).

На рис. 3 наведено макроструктура шва зварного з’єднання, одержаного у нижньому просторовому положенні при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, мікроструктура металу у центрі та на лінії сплавлення.

Структура металу шва зварного з’єднання, звареного у нижньому положенні, дисперсна, лита. На рис. 3 чітко видно дві зони: в центральній частині шва по всій висоті комірчасто-дендритна структура, в середній частині шва ближче до лінії сплавлення спостерігається зона тонких стовпчастих кристалітів, що ростуть в напрямку відводу тепла. Зони розділені смужкою більш дрібних кристалітів. Мікроструктура в центральній частині шва являє собою аустенітну матрицю з невеликою кількістю δ-фериту (1,5...1,7%). Розмір

–комірок становить, в основному, 12...13 мкм. Твердість металу шва зварного з’єднання у центральній частині складає HV1–2950...3090 МПа, є ділянки, де твердість підвищується до HV1–3200...3380 МПа. В нижній частині шва твердість підвищується до HV1–3320...3650 МПа. На лінії сплавлення зварного з’єднання мікроструктура також містить аустеніт і δ-ферит, вона дрібніша ніж в центрі шва. Ширина кристалітів становить 2...9 мкм. Твердість металу на лінії сплавлення зварного з’єднання становить HV1–2990...3030 МПа. Є окремі ділянки, де твердість підвищується до HV1–3160 МПа. У металі шва спостерігаються нітриди (в незначній кількості) і поодинокі шлакові включення. Зона термічного впливу (ЗТВ) не виражена, її структура містить аустеніт, бал зерна в ЗТВ зварного з’єднання №6. Твердість ЗТВ зварного з’єднання становить HV1–2650...2840 МПа.

Як показали металографічні дослідження, у структурі зварних з’єднань, одержаних в різних просторових положеннях у сталі AISI 321 товщиною 3 мм, суттєвих відмінностей не спостерігається. При різних значеннях кута нахилу значення мікротвердості у відповідних зонах, розміри кристалітів, бал зерна у ЗТВ зварного з’єднання відрізняються приблизно на 10%. Натомість форма одержаних проварів змінюється досить суттєво, як видно з табл. 2.

**Обговорення отриманих результатів.** Аналіз рентгенограм (рис. 4) показує тенденцію збільшення як кількості, так і розміру пор

Таблиця 1. Внутрішні дефекти у вигляді поодиноких пор або ланцюжків пор, виявлені при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання

| Напрямок зварювання | Кут нахилу α, ° | Кількість одиночних пор | Ланцюжки пор/їх сумарна довжина, мм | Максимальний розмір пори, мм |
|---------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| На спуск            | 30              | –                       | *                                   | 0,4                          |
|                     | 45              | 1                       | –                                   | 0,3                          |
|                     | 60              | 7                       | –                                   | 0,5                          |
|                     | 90              | –                       | 2/25                                | 0,5                          |
| На підйом           | 30              | –                       | *                                   | 0,3                          |
|                     | 45              | –                       | –                                   | -                            |
|                     | 60              | –                       | 2/8                                 | 0,3                          |
|                     | 90              | 3                       | –                                   | 0,3                          |
| Нижнє положення     | 0               | –                       | *                                   | 0,5                          |

\* – по всій довжині шва

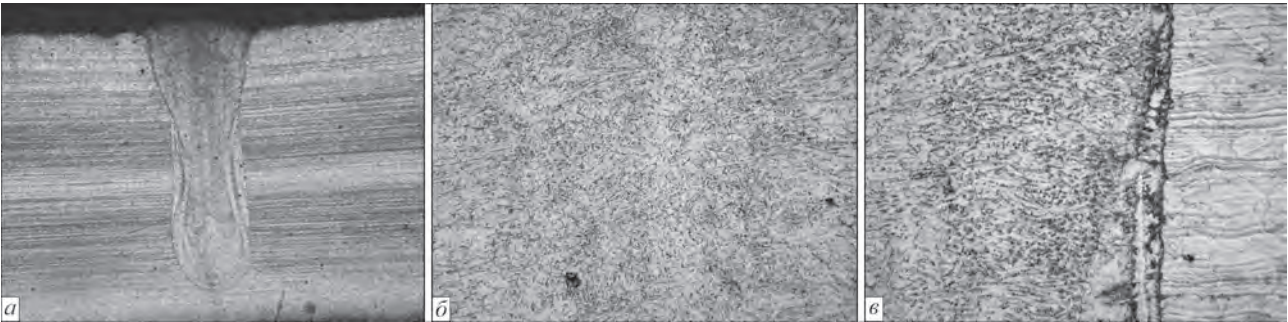


Рис. 3. Структура металу зварного з’єднання, звареного у нижньому положенні: а – поперечний переріз шва, ×30; б – центр шва, ×400; в – лінія сплавлення, ×400

у зразках зі сталі AISI 321 при зменшенні кута нахилу з 90 до 0° при зварюванні «на спуск» та «на підйом» в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. Треба відзначити малі значення сумарної проекції пор при зварюванні неперервним лазерним випромінюванням та під кутами 0 та 90° в імпульсному режимі зварювання. У той же час варто відзначити тенденцію зменшення кількості та розміру одиночних пор (чи протяжності ланцюжків пор) при зварюванні «на підйом» у порівнянні з режимом зварювання «на спуск» при одному й тому ж куті при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання.

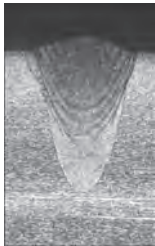
Згідно вимогам ДСТУ EN ISO 13919–1:2015, значення сумарної проекції пор для зварних з’єднань зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, для одержання найвищого рівня якості «В» не повинно перевищувати значення 0,7%. Аналіз одержаних даних дозволяє стверджува-

ти, що за цим показником всі одержані шви відповідають вказаним вимогам.

Встановлено, що залежність площі провару від кута нахилу при збільшенні його від 0 до 90° має немонотонний характер при зварюванні як «на спуск», так і «на підйом», незалежно від режиму генерації лазерного випромінювання (рис. 5). Встановлено, що максимальні значення площі провару на всіх режимах спостерігаються при куті нахилу 45°. Дане явище можна пояснити як зміною характеру течій у ванні розплаву, так і зміною ступеню впливу газового захисту зони зварювання. Однак для формулювання остаточних висновків це явище потребує додаткового всебічного вивчення.

Треба відзначити, що для залежностей площі поперечного перерізу швів зварних з’єднань зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях (рис. 5), було характерним те, що при неперервному режимі «на підйом» величина площі поперечного перерізу зварних з’єднань при

Таблиця 2. Форми проварів в пластинах зі сталі AISI 321 з кутами нахилу до горизонтальної площини від 90 до 0° при лазерному зварюванні «на спуск» та «на підйом» з різними режимами генерації лазерного випромінювання

| Напрямок зварювання | Кут нахилу, ° | Імпульсний режим                                                                    |  | Неперервний режим                                                                     |  |
|---------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                     |               | Форма провару, збільшення                                                           |  | Форма провару, збільшення                                                             |  |
| На спуск            | 30            |  |  |  |  |
|                     | 45            |  |  |  |  |
|                     | 60            |  |  |  |  |
|                     | 90            |  |  |  |  |

| Напрямок зварювання | Кут нахилу, ° | Імпульсний режим                                                                        | Неперервний режим                                                                         |
|---------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     |               | Форма провару, збільшення                                                               | Форма провару, збільшення                                                                 |
| На підйом           | 30            |  ×50   |  ×30   |
|                     | 45            |  ×40   |  ×30   |
|                     | 60            |  ×25  |  ×25  |
|                     | 90            |  ×50 |  ×30 |
| Нижнє положення     | 0             |  ×50 |  ×30 |

різних кутах зварювання відрізняється не більше ніж у 1,31 рази. У той час, коли при зварюванні «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання максимальні та мінімальні значення залежностей відрізняються майже у 2,1 рази (рис. 6). При цьому максимальні площі поперечного перерізу швів, одержані при зварюванні «на спуск» та «на підйом» з кутом нахилу 45° у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, відрізняються майже у 1,5 рази. Вочевидь, це відбувається за рахунок більш тривалого перебування металу зварного з'єднання при температурах вищих за температуру плавлення. Це призводить до збільшення об'єму ванни розплавленого металу та, як результат, й площі зварного

з'єднання. Встановлено, що при зміні режиму генерації лазерного випромінювання з неперервного на імпульсний при куті нахилу зварювання 45°, відсутня тенденція значного збільшення площі провару.

При зварюванні у різних просторових положеннях з використанням імпульсного режиму генерації лазерного випромінювання, вказані дані щодо площі поперечного перерізу швів значно відрізняються (див. рис. 5). Так, при імпульсному зварюванні як «на підйом», так і «на спуск», максимальні та мінімальні значення площі поперечного перерізу швів відрізняються для кутів 0 та 45° приблизно у 2,5 рази (рис. 5). При цьому площі поперечного перерізу зварних з'єднань, одержаних при зварюванні «на спуск» та «на підйом» при однакових кутах зварю-



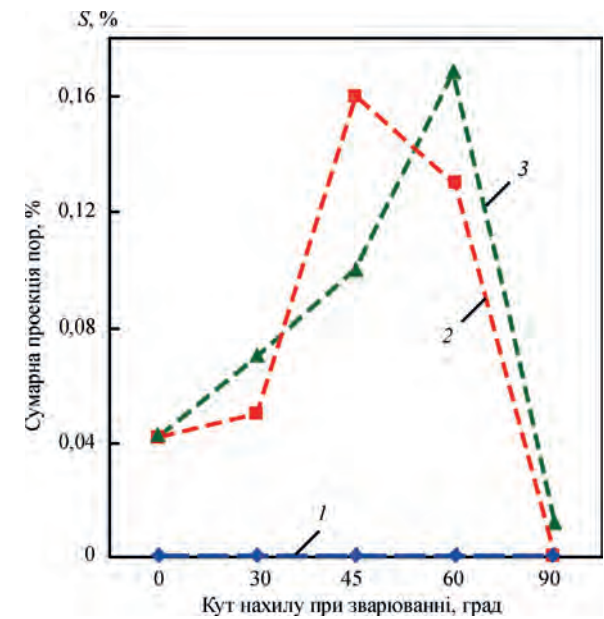


Рис. 4. Залежність сумарної площі проєкцій пор від параметрів режимів лазерного зварювання сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних у різних просторових положеннях: 1 – неперервний режим; 2 – імпульсний режим «на підйом»; 3 – імпульсний режим «на спуск»

вання у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання, відрізняються менш ніж на 5%.

На рис. 6 показана залежність висоти шва у різних просторових положеннях від кута нахилу. Як й для площі провару, характер залежностей немонотонний. Але різниця значень, одержаних для зварювання «на підйом» та «на спуск», для переважної більшості контрольних точок не перевищує 15%, при одному й тому ж режимі генерації лазерного випромінювання. Цікавим є той факт, що максимально високі значення спостерігаються при зварюванні з кутом нахилу 45° у імпульсному

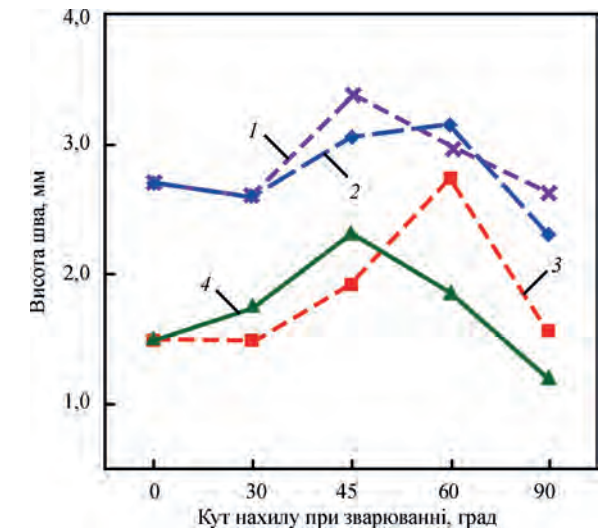


Рис. 6. Залежність висоти шва у зварних з'єднаннях зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, від кута нахилу: 1 – неперервний режим «на підйом»; 2 – неперервний режим «на спуск»; 3 – імпульсний режим «на підйом»; 4 – імпульсний режим «на спуск»

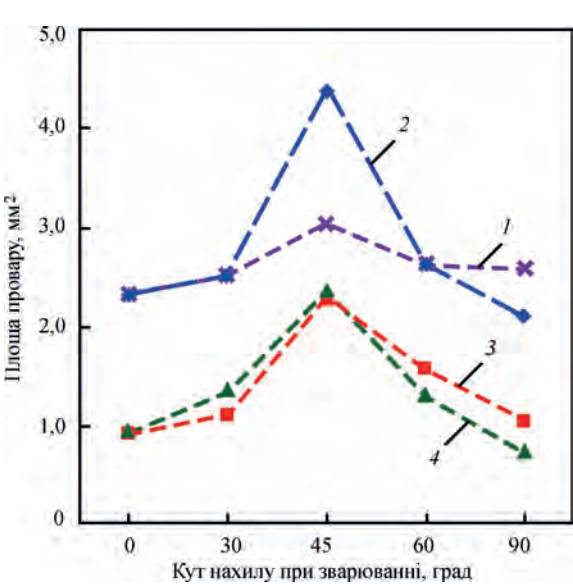


Рис. 5. Залежність площі поперечного перерізу швів зварних з'єднань зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, від кута нахилу: 1 – неперервний режим «на підйом»; 2 – неперервний режим «на спуск»; 3 – імпульсний режим «на підйом»; 4 – імпульсний режим «на спуск»

режимі «на спуск» та неперервному режимі «на підйом» (рис. 6). У той час, коли при зварюванні у неперервному режимі «на спуск» та імпульсному режимі «на підйом» максимальні значення одержані при куті нахилу 60°. Величини, які перевищують товщину 3,0 мм пластин, що зварювались, пояснюються утворенням верхнього та нижнього валиків зварного з'єднання при повному проварі зразків. Варто відзначити, що зміна висоти шва у зварних з'єднаннях зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі «на підйом» не перевищує 22%. У той час, коли при зварюванні «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання це значення складає 27%, а при зміні режиму генерації на імпульсний наближається до 100%.

Аналіз результатів досліджень, виконаних на пластинах та описаних вище, дозволив зробити науково обґрунтований вибір просторових положень та підібрати технологічні параметри, на яких планується виготовити контрольні стикові з'єднання зі сталі AISI 321 товщиною 3,0 мм. При виборі просторових положень керувалися наступними показниками: досягнення максимальної глибини провару; якісне формування зварного з'єднання; відсутність (або мінімальна кількість бризок); відсутність (або мінімальна величина) заниження шву; відсутність (або мінімальна висота) «гребінця» верхнього валика. Виходячи з цих положень, були обрані нижнє та вертикальне просторові положення як найбільш перспективні для одержання стикових зварних з'єднань, що від-

повідують вимогам найвищого рівня якості «В», згідно ДСТУ EN ISO 13919–1:2015.

## Висновки

Просторове положення при лазерному зварюванні корозійностійкої жароміцної аустенітної сталі AISI 321 кардинально впливає на рівень якості та структуру зварних з'єднань.

Зменшення кута нахилу від 90 до 0° при зварюванні «на спуск» та «на підйом» в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання призводить до збільшення як кількості пор, так і їх розміру. У той час, як при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання дефекти у вигляді пор не спостерігаються.

При лазерному зварюванні стикових з'єднань зі сталі AISI 321 найбільш перспективними є нижнє та вертикальне просторові положення, як такі, що забезпечують найвищий рівень якості.

## Список літератури/References

1. Serdar, M., Meral, C., Kunz, M., Bjegovic, D., Wenk, H. R., Monteiro, P. J. (2015) Spatial distribution of crystalline corrosion products formed during corrosion of stainless steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, **71**, 93–105.
2. Vasantharaja, P., Vasudevan, M., Palanichamy, P. (2015) Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints. *J. of Manufacturing Processes*, **19**, 187–193.
3. Chater, J. (2016) What prospects for stainless steel in 2016. *Stainl. Steel World*, **1**(2), 1–5.
4. Kumar, A., DebRoy, T. (2007) Heat transfer and fluid flow during gas-metal-arc fillet welding for various joint configurations and welding positions. *Metallurg. and Mater. Transact. A*, **38**(3), 506–519.

5. Tsai, M. J., Lee, H. W., Ann, N. J. (2011) Machine vision based path planning for a robotic golf club head welding system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **27**(4), 843–849.
6. Лесков Г. И., Живага Л. И. (1980) Формирование швов при электронно-лучевой сварке сталей большой толщины в различных пространственных положениях. *Автоматическая сварка*, **10**, 1–5.
7. Leskov, G.I., Zhivaga, L.I. (1980) Formation of joints in electron beam welding of thick steels in different spatial positions. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 1–5 [in Russian].
8. Sohail, M., Han, S. W., Na, S. J., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2015) Numerical investigation of energy input characteristics for high-power fiber laser welding at different positions. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **80**(5–8), 931–946.
9. Shelyagin, V., Khaskin, V., Bernatskyi, A., Siora, A., Sydorets, V., Chinakhov, D. (2018) Multipass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints. *Mater. Sci. Forum*, **927**, 64–71.
10. Kah, P., Lu J., Martikainen, J., Suoranta, R. (2013) Remote laser welding with high power fiber lasers. *Engineering*, **5**(09), 700.
11. Seyffarth, P., Krivtsun, I. (2014) *Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment*. CRC Press.
12. Artinov, A., Bakir, N., Bachmann, M., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2018) Weld pool shape observation in high power laser beam welding. *Procedia CIRP*, **74**, 683–686.
13. Krivtsun, I., Reisgen, U., Semenov, O., Zabirov, A. (2016) Modeling of weld pool phenomena in tungsten inert gas, CO<sub>2</sub>-laser and hybrid (TIG+ CO<sub>2</sub>-laser) welding. *J. of Laser Applications*, **28**(2), 022406.
14. Khaskin, V., Korzhyk, V., Sydorets, V., Peleshenko, S., Dolyanovskaya, O. (2016) The influence of the absorption coefficient of laser radiation on the process of laser-arc welding. *American Sci. J.*, **4**, 81–87.

## IMPACT OF SPATIAL POSITION IN LASER WELDING ON QUALITY LEVEL OF WELDED JOINTS OF AISI 321 STEEL

A.V. Bernatskii, V.D. Shelyagin, O.V. Siora, V.M. Sydorets, O.M. Berdnikova

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 objective of the study was determination of the impact of spatial position in laser welding of corrosion-resistant austenitic steel AISI 321 on the microstructure and quality level of welded joints. Penetration beads were made in plates of 3 mm thickness at different angles of inclination to the horizontal plane. «Uphill» and «downhill» laser welding was performed both in the continuous and pulse modes of laser radiation generation. Results of visual and radiographic testing and analysis of the data of metallographic studies were used for assessment of quality level of the produced samples for compliance with the requirements of valid standards. In «uphill» and «downhill» welding in the continuous mode of laser radiation generation no internal defects in the form of cracks, pores and inclusions were found at all the angles of inclination. A tendency to increase of both the quantity and size of pores at reduction of the angle of inclination from 90 to 0 deg was found in «downhill» and «uphill» welding in the pulse mode of laser radiation generation. By the data of metallographic studies, no significant differences were observed in the structure of welded joints made in different spatial positions on steel AISI 321 3 mm thick. At different values of the angle of inclination, the microhardness and dimensions of the crystallites differ by approximately 10 %. Contrarily, the shape of welds in the produced penetration beads differs quite significantly. Dependencies of quality characteristics of welded joints of AISI 321 steel in laser welding were derived for the first time for different spatial positions. Derived dependencies allow determination of the tendencies of the change of the shape and quality of welded joints at the change of position or technological parameters of laser welding process. 13 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

**Keywords:** laser welding; corrosion-resistant steel; heat-resistant steel; austenitic steel; technological parameters; spatial position; quality; structure; porosity

Надійшла до редакції 25.10.2019

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА SLM НА ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНИЧНОГО СЛОЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА INCONEL 718\*

С.В. Аджамский<sup>1,2</sup>, А.А. Кононенко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

49000, г. Днепр, просп. Гагарина, 72. E-mail: pk\_dnu@i.ua

<sup>2</sup>LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, г. Днепр, ул. Рыбинская, 144. E-mail: info@alt-print.com

<sup>3</sup>Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

49000, г. Днепр, пл. Академика Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

В работе выполнен анализ разновидностей аддитивных технологий, их преимущества и недостатки. Более подробно изложены эксперименты по выборочному лазерному плавлению (SLM) с целью обеспечения требуемой микроструктуры синтезированного материала. Экспериментально установлены режимы, обеспечивающие стабильную печать единичного слоя. Определены оптимальные значения скорости сканирования, мощности лазера для сплава Inconel 718. Библиогр. 12, рис. 6.

*Ключевые слова:* процесс SLM, сплав Inconel 718, мощность лазера, единичный трек, удельная объемная энергия, максимальная плотность слоя

Аддитивные технологии – обобщенное наименование группы технологий, которые предполагают изготовление изделий по цифровым моделям методом послойного добавления материала. При этом получение изделия происходит шаг за шагом, посредством формирования слоя материала, его отверждения или фиксации в соответствии с данными 3D модели и соединении с предыдущим слоем. В качестве источника энергии может выступать электронный или лазерный луч.

Есть различные аддитивные производственные процессы, такие как выборочное лазерное плавление, прямое лазерное осаждение, электронно-лучевое плавление, подача проволоки, моделирование осаждения формы, ультразвуковое уплотнение, вихревое переплетение и свободная форма трения для изготовления металлических компонентов.

В первую очередь интерес к аддитивным технологиям и непосредственной печати или выращиванию металлических деталей, в качестве альтернативы традиционным технологиям, возник в авиации, космической промышленности, медицине и энергетическом машиностроении. При этом основным движущим фактором являлась экономическая целесообразность. Особенно это касается единичных сложных изделий, производство которых традиционными методами оказывается существенно дороже, чем посредством аддитивных технологий.

Преимущества аддитивных технологий:

- улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия име-

ют уникальный набор свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своим механическим свойствам, плотности, остаточным напряжениям и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки;

- большая экономия сырья. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80...85 %. Построение происходит с помощью послойного добавления в «тело» изделия необходимого количества материала. 97...99 % незадействованного при построении порошка после просеивания пригодно к повторному использованию. 3...9 % материала, задействованного на построение поддержек, утилизируется вместе с некондиционным несплавленным порошком, не прошедшим операцию просеивания;

- возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет изготавливать предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (этого не получить ни литьем, ни штамповкой);

- мобильность производства и ускорение обмена данными. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего из-

\*По материалам доклада, представленного на IX международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., г. Одесса.

© С.В. Аджамский, А.А. Кононенко, 2020



деля, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира — и сразу начать производство;

- высокая точность и повторяемость;
- сокращает цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивая создание сложнопрофильных деталей без использования оснастки;
- позволяет уменьшить массу за счет создания объектов с внутренними полостями;
- технология позволяет работать с широким ассортиментом металлопорошковых композиций: нержавеющей и инструментальными сталями, алюминием, титаном, никелевыми, кобальт-хромовыми, медными сплавами, и многими другими.

Аддитивные технологии также имеют и некоторые недостатки, в частности:

- качество поверхности изделий, их размерная точность и минимальная толщина элементов в значительной степени зависят от конкретного метода и технологических параметров процесса;
- необходимость изготовления вместе с деталью поддерживающих конструкций с последующим их удалением;
- зависимость структуры и свойств от направления выращивания, конкретной технологии и оборудования;
- ограниченные размеры изделий (ограничивается рабочей камерой или областью оборудования).

Однако несмотря на эти недостатки, удобство использования аддитивных технологий подтверждено многочисленными исследованиями и применениями в реальных областях промышленности.

Метод выборочного лазерного плавления (SLM) – инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим 3D моделям. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традицион-

ным технологиям, поэтому эта технология является одной из самых популярных и успешных с использованием порошка.

При выборочном лазерном плавлении соединение металлического порошка достигается путем плавления и затвердевания небольшого объема материала в дорожке с использованием одного или нескольких мощных лазеров. Другими словами, лазерный луч сканирует слой порошка и плавит частицы порошка под пучком и создает небольшую ванну расплавленного металла и тонкий трек затвердевшего металла позади. При повторении одиночных треков с четко определенным перекрытием (расстояние между треками), создается слой поперечного сечения. При повторении этого послойного осаждения строится вся деталь. Управляет работой установки и всего процесса компьютер, на котором загруженная математическая модель проходит несколько стадий подготовки с созданием поддерживающих структур, траекторий и методик сканирования лучом каждого сгенерированного слоя модели, настройки технологического процесса для работы с тем или иным выбранным материалом и т. п. Процесс построения изделий происходит в камере SLM машины, заполненной инертным газом – аргоном или азотом в зависимости от типа порошка, из которого происходит построение, при ламинарном его течении. Допустимое содержание кислорода – менее 0,15 %. Практически полное отсутствие кислорода позволяет избежать окисления расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как алюминий и титан.

Слои в зависимости от геометрии разбиваются на зоны, каждой зоне присваивается индивидуальный идентификатор, согласно которому строятся траектории движения и устанавливаются параметры лазерного луча. Данные идентификаторы можно разнести на три основные группы: нижний слой (down-skin), внутренний слой (in-skin), верхний слой (up-skin) (рис. 1, а). При этом в каждой группе создаются свои подгруппы: заливка (hatches), контур (border), постконтур (fill border) как показано на рис. 1, б.

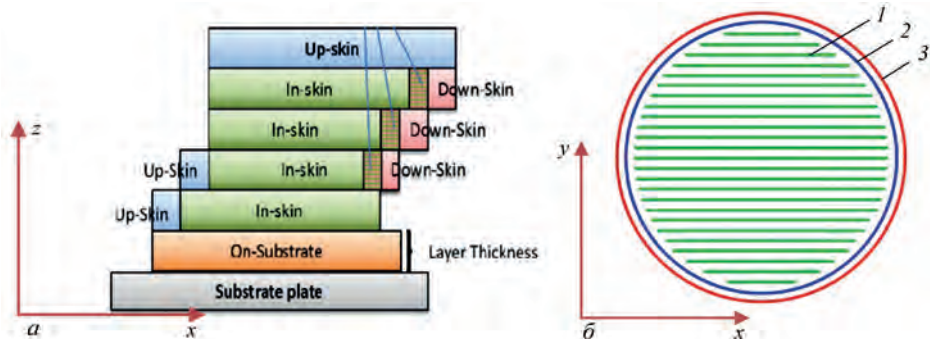


Рис. 1. Формирование слоев в направлении роста детали (а), подгруппы треков (б): 1 – заливка; 2 – постконтур; 3 – контур

Перемещение луча лазера осуществляется с помощью системы зеркал на быстродействующем приводе, однако, одной из проблем технической стороны процесса является обеспечение стабильности диаметра пятна лазерного луча. Диаметр пятна определяется как диаметр в перетяжке пучка, который составляет 86,5 % общей мощности и соответствует диаметру пучка  $1/e^2$  в рабочей плоскости для гауссовых пучков. Он зависит от источника света (длина волны лазера и качество сопряженного лазерного луча), а также от апертуры и фокусного расстояния сканирующей системы. В результате формируется криволинейная фокусная поверхность, радиус которой соответствует фокусному расстоянию системы. Существует принципиально два разных подхода к решению этой проблемы: применение корректирующих F-Theta линз и управление перемещением лазера по оси z.

С материаловедческой точки зрения проблемой SLM-технологии является обеспечение требуемой микроструктуры синтезированного материала, уменьшение пористости получаемого материала, характерной для данной технологии. Значения пористости зависят от используемого материала, параметров режима сплавления, качества исходного порошка и т. д. Значения пористости для алюминиевых сплавов могут достигать 4...5 %, для титановых сплавов – до 2 %, для сталей и никелевых сплавов – менее 0,2 %. В изделиях, полученных по технологии выборочного лазерного плавления, могут присутствовать дефекты. Главным образом это поры и микротрещины.

Существует два типа пор: поры круглой формы и поры неправильной формы (отсутствие слияния) [1]. Круглые поры образуются по таким основным причинам: газы атмосферы абсорбированные расплавленной ванной, и газ, смешанный с порошком, который не успевает высвободиться из расплавленной ванны до затвердевания. Пузырьки газа в жидкости имеют сферическую форму, которую они сохраняют и после затвердевания металла [2, 3]. Другой причиной является захват газа внутри частиц порошка в процессе распыления газа [4]. Однако основным дефектом является неправильная пора, которая образуется из-за нестабильной формы расплавленной ванны или в результате недостаточного проплавления порошкового слоя. В результате в местах, где частицы расплавились не полностью, либо не произошло слияния расплавленных частиц порошка с ранее обработанным слоем образуются плоские поры, расположенные перпендикулярно направлению выращивания [2, 5–7]. Поры второго вида оказывают значительно большее влияние на меха-

нические свойства материала вследствие их большего размера, а также их плоской формы [3, 5]. Для уменьшения пористости в конечных изделиях ответственного назначения применяется горячее изостатическое прессование, во многих случаях позволяющее существенно повысить качество изделий после SLM [8].

Большая мощность и локализованность источника нагрева и высокая скорость его перемещения способствуют образованию больших тепловых градиентов в металле после построения методом SLM. Хотя эти тепловые градиенты напрямую влияют на образующуюся микроструктуру металла, они также способствуют образованию высоких термических напряжений, которые могут быть достаточно большими и приводить к короблению изделий, а также изменению их механических свойств. Остаточные напряжения, обычно, не учитываются напрямую, а рассматриваются как скрытый параметр, а иногда и не учитываются вовсе.

Эти дефекты оказывают существенное влияние на механические свойства, такие как пластичность при испытании на растяжение, вязкость разрушения и усталостная прочность. Для получения качественных изделий необходимо подбирать параметры изготовления таким образом, чтобы свести к минимуму образующиеся несплошности в металле. Структура и свойства конечного изделия, полученного методом выборочного лазерного плавления, зависят от большого количества технологических параметров. На сегодняшний день выделяют до 120 различных факторов, влияющих на качество и эксплуатационные характеристики получаемых объектов [9, 10]. Разнообразие влияющих факторов показывает сложность физических процессов, протекающих при SLM, и необходимость научно обоснованного выбора оптимальных значений основных технологических параметров. Среди наиболее важных из них можно назвать мощность лазерного излучения, скорость сканирования лазерного луча по поверхности порошка, толщину насыпанного слоя порошка, расстояние между проплавленными треками, диаметр фокусного пятна лазера, стратегию плавления, т. е. траекторию движения лазерного луча, а также химический состав, структуру и дисперсность исходного порошка.

Пористость считается одной из главных проблем объектов, получаемых методом SLM. Однако обеспечив постоянство геометрических характеристик каждого отдельного трека, таких как ширина, высота, диаметр и его хорошую адгезию с предыдущим слоем, которая определяется глубиной проплавления, возможно получение объектов с пористостью менее 1 %.

Трек с постоянной геометрической формой, без разрывов по всей длине и с проплавлением в подложку называется стабильным. Для получения объектов с минимальной пористостью требуется кристаллизация стабильных треков.

На первом этапе изучалось влияние следующих параметров: мощность лазера и скорость его перемещения на размеры и форму единичных треков. Данный набор варьируемых параметров был выбран ввиду их непосредственного вклада в объемную плотность энергии и вследствие возможности их одновременного варьирования при изготовлении набора образцов. При этом интервалы варьирования параметров составляли: для мощности лазера – 50...400 Вт с шагом 30 Вт, для скорости лазера – 450...1000 мм/с с шагом 50 мм/с. При этом толщина наносимого порошкового слоя составляла 50 мкм.

Был проанализирован внешний вид и геометрические параметры единичных треков, полученные в ходе эксперимента. При малой мощности не происходило сплавления порошка с подложкой. При большой скорости сканирования наблюдали эффект образования шариков или комков. При большой мощности расплав кипит и давление его пара вызывает искажение спекаемых дорожек. Исследовали микроструктуру поперечного сечения единичных треков. По результатам эксперимента были установлены режимы, обеспечивающие формирование ванны расплава оптимальной геометрии: глубина зоны плавления должна превышать толщину слоя примерно в полтора – два раза, соотношение глубины к ширине трека должно быть на уровне от 1 до 1,5:

$P = 110 \text{ Вт}, V = 450 \dots 500 \text{ мм/с};$

$P = 140 \text{ Вт}, V = 600 \dots 700 \text{ мм/с};$

$P = 170 \text{ Вт}, V = 600 \dots 700 \text{ мм/с};$

$P = 200 \text{ Вт}, V = 650 \dots 800 \text{ мм/с};$

$P = 230 \text{ Вт}, V = 800 \dots 950 \text{ мм/с}.$

В литературе, для оценки энергетического вклада источника нагрева, используется объемная плотность энергии, поскольку она позволяет учесть вклад основных технологических параметров выборочного лазерного плавления и их влияние на сплавляемый материал [11, 12]. Для расчета объемной плотности энергии использовано следующее уравнение:

$$E = P / (Vdt), \quad (1)$$

где  $E$  – плотность энергии, Дж/мм<sup>3</sup>;  $P$  – мощность лазера, Вт;  $V$  – скорость сканирования лазером, мм/с;  $d$  – толщина слоя, мм;  $t$  – расстояние между проходами лазера, мм.

Плотность энергии должна быть такой, чтобы обеспечить полное переплавление порошка и его сплавление с подложкой. Однако, как видно из приведенных данных, удельная объемная энергия указанных режимов при расчете для интервала между треками 0,1 мм и толщине слоя 50 мкм изменяется в широком диапазоне: от 44 до 61 Дж/мм<sup>3</sup>. Кроме того, при создании единичного слоя происходит перекрытие соседних треков, в результате чего расплавленная ванна создаваемого трека получает дополнительное термическое воздействие от остывающего металла предыдущего трека, что будет влиять на его геометрию, свойства и структурообразование. В эксперименте были рассчитаны режимы с удельной объемной энергией на 30 % меньше оптимальных для единичных треков.

Цель эксперимента: уточнить режимы, обеспечивающие стабильную качественную печать единичного слоя и объемных образцов для соблюдения оптимальности геометрии ванн треков в единичных слоях и минимальной пористости в объемных образцах.

В эксперименте создавали единичные слои из шести единичных треков, напечатанных с интервалом 0,1 по траектории zig-zag. Единичные слои, изготовленные по рассчитанным режимам с энергией, уменьшенной относительно оптимальных для единичных треков имели нестабильную форму. Особенно это было выражено для первого трека. При увеличении удельной объемной энергии внешне треки имели стабильную форму. Были выполнены микроструктурные исследования в поперечном сечении образцов. На рисунках можно видеть, что при уровне энергии 28...33 Дж/мм<sup>3</sup> количества энергии оказывалось недостаточно для качественного перекрытия соседних треков (рис. 2), а при уровне удельной энергии выше 48...50 Дж/мм<sup>3</sup> глубина проплавления соседних треков становилась неравномерной (рис. 3).

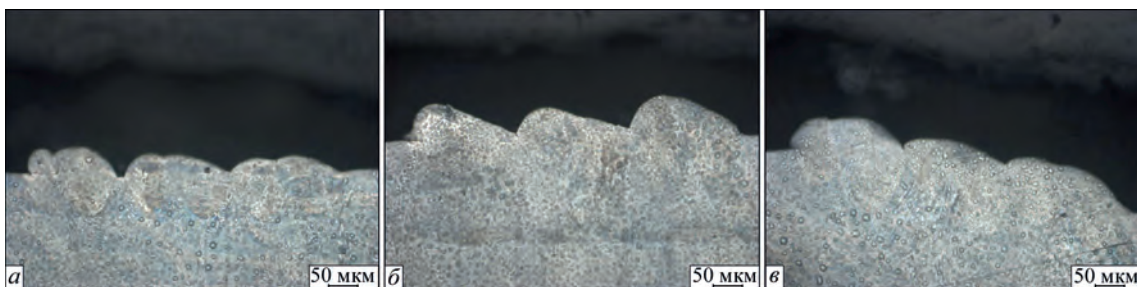


Рис. 2. Микроструктура единичного слоя при мощности лазера 140 Вт и скорости сканирования: а – 1000 мм/с ( $E = 28 \text{ Дж/мм}^3$ ); б – 950 мм/с ( $E = 31 \text{ Дж/мм}^3$ ); в – 850 мм/с ( $E = 33 \text{ Дж/мм}^3$ )



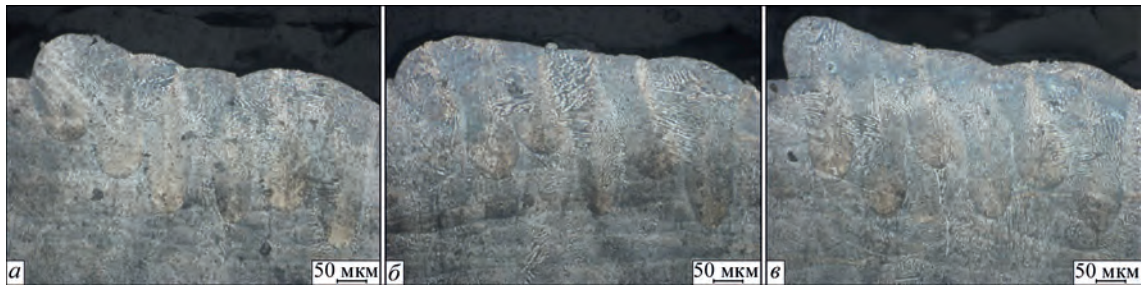


Рис. 3. Микроструктура єдиного слоя при потужності лазера 200 Вт і швидкості сканування: а – 800 мм/с ( $E = 50$  Дж/мм<sup>3</sup>); б – 750 мм/с ( $E = 53$  Дж/мм<sup>3</sup>); в – 700 мм/с ( $E = 57$  Дж/мм<sup>3</sup>)

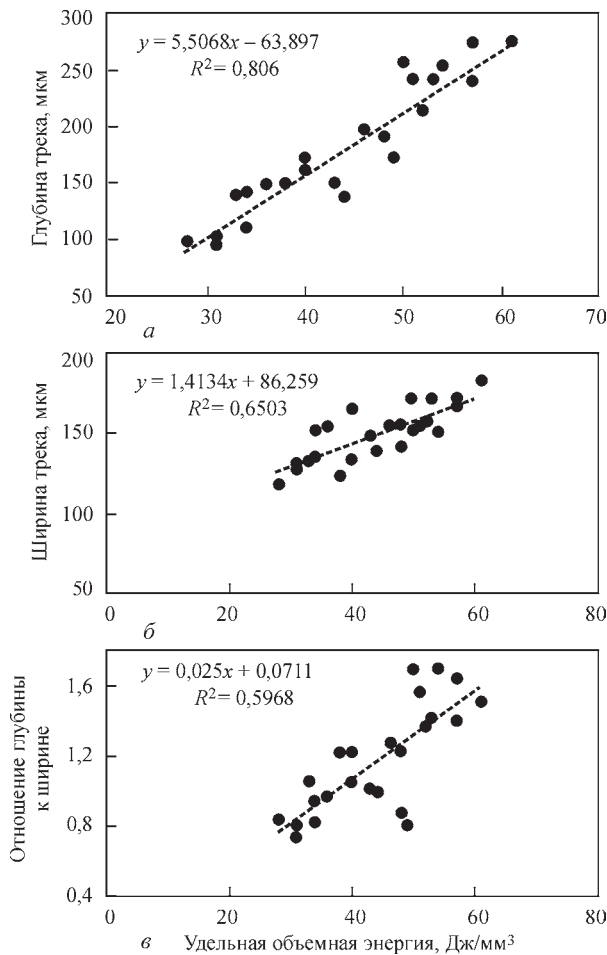


Рис. 4. Геометрические параметры трека в единичном слое при различном уровне удельной объемной энергии

После кристаллизации трека рядом с ним есть области, обедненные порошком. Поэтому при плавлении соседнего трека было использовано меньшее количество порошка, что привело

к уменьшению его высоты. Кроме того, коэффициенты поглощения и отражения лазерного излучения у порошка и переплавленного материала значительно отличаются, что оказало дополнительное влияние на физику процесса.

В работе определяли среднюю глубину и ширину трека в единичном слое. На рис. 4 приведены результаты исследования. Установлена функциональная зависимость глубины трека от удельной объемной энергии с достаточным уровнем коэффициента достоверности аппроксимации. Получено уравнение, с помощью которого был определен оптимальный уровень энергии, необходимый для обеспечения проплавления на величину не более двух слоев. Он составил 39 Дж/мм<sup>3</sup>.

Для этого уровня энергии среднее соотношение глубины к ширине треков находится на оптимальном уровне. На рис. 5 показана микроструктура единичных слоев с оптимальным уровнем энергии, перекрытие соседних треков и их глубина проплавления равномерные.

При анализе объемных образцов, изготовленных по таким же режимам, как и единичные слои, подтверждается вывод об оптимальном уровне удельной объемной энергии 38...40 Дж/мм<sup>3</sup>. Показано, что при большем уровне энергии реализуются условия глубокого проплавления, а при меньшей объемной энергии не обеспечивается гарантированного перекрытия соседних треков (рис. 6).

Однако нашими предыдущими исследованиями для единичных треков было установлено, что интенсивность влияния скорости сканування на их геометрические параметры существенно выше, чем мощности лазера. А одного и того же уровня объ-

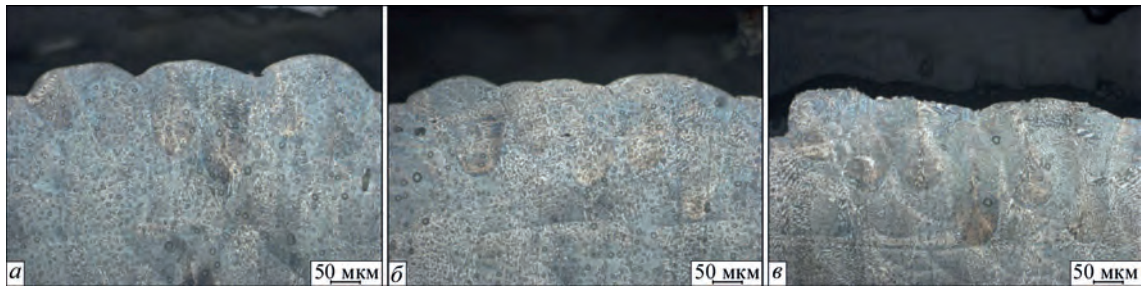


Рис. 5. Микроструктура єдиного слоя при потужності лазера 170 Вт і швидкості сканування: а – 900 мм/с ( $E = 38$  Дж/мм<sup>3</sup>); б – 850 мм/с ( $E = 40$  Дж/мм<sup>3</sup>); в – 700 мм/с ( $E = 48$  Дж/мм<sup>3</sup>)

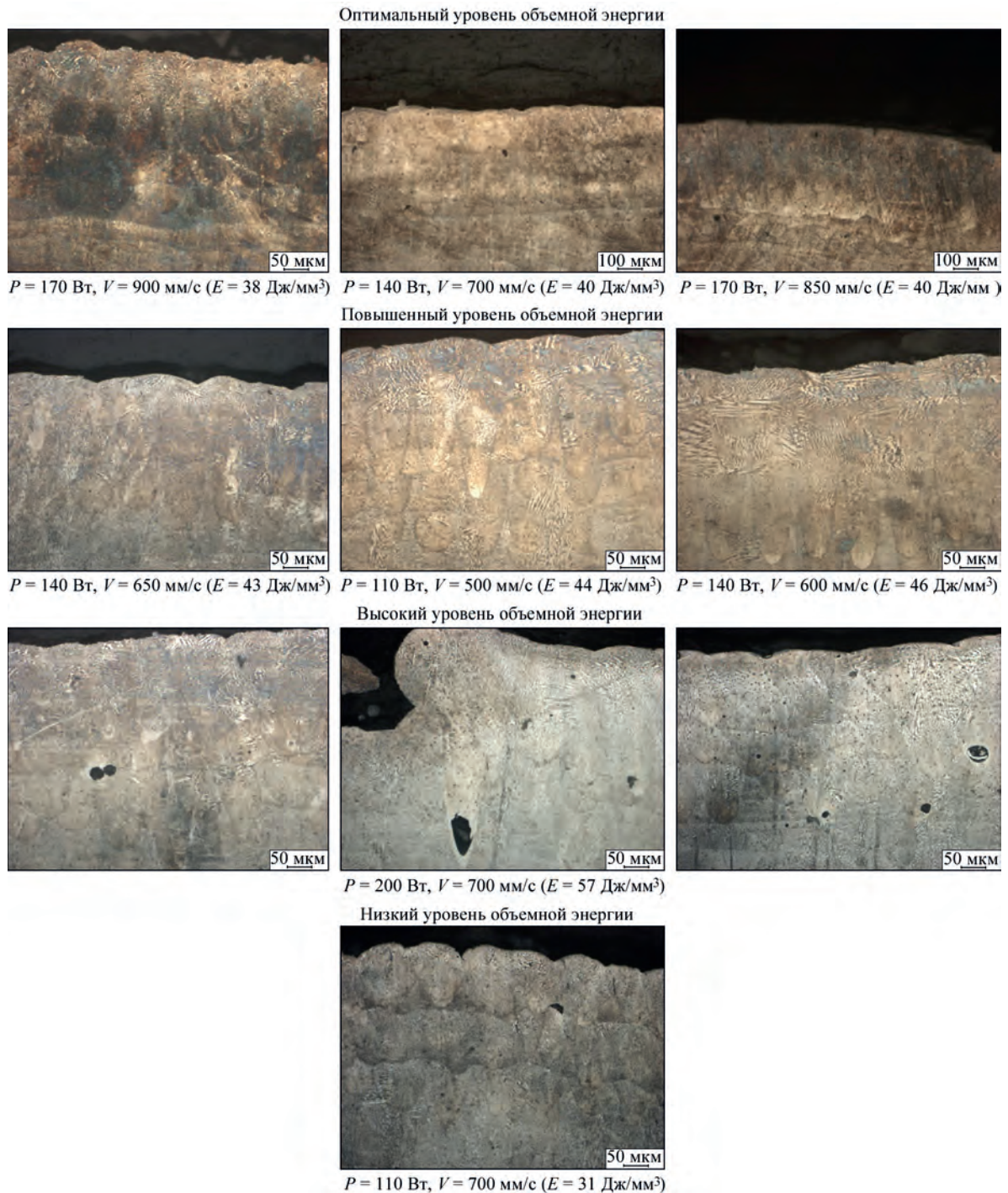


Рис. 6. Микроструктура объемных образцов, изготовленных при различных уровнях объемной мощности лазера

емной энергии можно достигать различным сочетанием мощности лазера и скорости сканирования. Установлению предпочтительного способа достижения оптимального уровня подводимой энергии будут посвящены дальнейшие исследования.

## Выводы

- В результате исследований определены оптимальные значения скорости сканирования, мощности лазера для сплава Inconel 718 с точки зрения получения стабильного единичного трека при условии формирования ванны расплава глубиной до двух слоев.

- Уточнены оптимальные режимы процесса для сплава Inconel 718 для получения единичных слоев с геометрией треков, соответствующей заданным условиям: средняя глубина треков до двух слоев, среднее соотношение глубины к ширине трека – до 1,5.

- Установлена зависимость средней глубины трека единичного слоя от удельной объемной энергии, установлен оптимальный уровень данной характеристики.

- Подтверждены результаты по оптимальному уровню удельной объемной энергии, полученные



при исследовании единичных слоев на объемных образцах: при реализации оптимальных режимов получены образцы максимальной плотности.

### Список литературы/References

1. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T. et al. (2010) A study of the micro-structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Mater.*, 58, 9, 3303–3312.
2. Simonelli M., Tse Y.Y., Tuck C. (2014) Effect of the build orientation on the Mechanical Properties and Fracture Modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1–11.
3. Frazier W.E. (2014) Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 6, 1917–1928.
4. Parimi L.L., R.G.A., Clark D., Attallah M.M. (2014) Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. *Mater. Charact.*, 89, 102–111.
5. Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. (2016) Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 650, 295–299.
6. Chlebus E. et al. (2011) Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting. *Materials Characterization*, 62, 5, 488–495.
7. Vilaro T., Colin C., Bartout J.D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42, 10, 3190–3199.
8. Qiu C., Adkins N.J.E., Attallah M.M. (2013) Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 578, 230–239.
9. Santos E.C. et al. (2006) Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1459–1468.
10. Zakiev S. et al. (2006) Modelling of the thermal processes that occur during laser sintering of reacting powder compositions. *Appl. Phys. A*, 84, 123–129.
11. Meier H., Haberland C. (2008) Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39, 9, 665–670. DOI: 10.1002/mawe.200800327
12. Islam M., Purtonen T., Piili H. (2013) Temperature profile and imaging analysis of laser additive. *Physics Procedia*, 41, 828–835.

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ SLM НА ФОРМУВАННЯ ОДИНИЧНОГО ШАРУ З ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 718

С.В. Аджамський<sup>1,2</sup>, Г.А. Кононенко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.  
49000, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 72. E-mail: pk\_dnu@i.ua

<sup>2</sup>LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Рибінська, 144. E-mail: info@alt-print.com

<sup>3</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.  
49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

В роботі виконано аналіз різновидів адитивних технологій, їх переваги та недоліки. Більш детально викладені експерименти з вибіркового лазерного плавлення (SLM) з метою забезпечення необхідної мікроструктури синтезованого матеріалу. Експериментально встановлено режими, що забезпечують стабільний друк одиничного шару. Визначено оптимальні значення швидкості сканування, потужності лазера для сплаву Inconel 718. Бібліогр. 12, рис. 6.

*Ключові слова:* процес SLM, сплав Inconel 718, потужність лазера, одиничний трек, питома об'ємна енергія, максимальна щільність шару

## REGULARITIES OF INFLUENCE OF SLM PROCESS PARAMETERS ON THE FORMATION OF SINGLE LAYER FROM THE HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY INCONEL 718

S.V. Adjamsky<sup>1,2</sup> G.A. Kononenko<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin Ave., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: pk\_dnu@i.ua

<sup>2</sup>LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 144 Rybinskaya Str., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: infor@alt-print.com

<sup>3</sup>Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the NAS of Ukraine. 1 Starodubov Sq., 49000, Dnipro, Ukraine.  
E-mail: office@isi@nas.ua

In the work the varieties of additive technologies, their advantages and disadvantages were analyzed. The experiments on selective laser melting (SLM) are described in more detail in order to provide the required microstructure of the synthesized material. The modes that provide stable printing of a single layer were experimentally established. The optimal values of scanning speed and laser power for the alloy Inconel 718 were determined. 12 Ref., 6 Fig.

*Keywords:* process SLM, alloy Inconel 718, laser power, single track, specific volume energy, maximum layer density

Поступила в редакцію  
29.10.2019



# ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПРОКОВКИ ТА АТМОСФЕРИ ПОМІРНОГО КЛІМАТУ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ТАВРОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З ПОВЕРХНЕВИМИ ВТОМНИМИ ТРІЩИНАМИ

В.В. Книш, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, А.О. Гришанов, В.П. Кузьменко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Приведено результати досліджень ефективності застосування технології високочастотної механічної проковки для збільшення залишкової довговічності таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими втомними тріщинами та корозійними пошкодженнями, характерними конструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України. Корозійні пошкодження на поверхні з'єднань отримували експонуванням у гідростаті Г4 при підвищеній температурі та відносній вологості протягом 1200 год. Експериментально встановлено, що зміцнення технологією високочастотної механічної проковки таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною до 10 мм та характерними корозійними пошкодженнями збільшує їх залишкову циклічну довговічність до 10 разів. Показано, що застосування технології високочастотної механічної проковки до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми довжиною 20 мм і більше, не призводить до підвищення циклічної довговічності і є неефективним. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

*Ключові слова:* таврове зварне з'єднання, корозійне середовище, втома, прискорені корозійні випробування, високочастотна механічна проковка, підвищення циклічної довговічності

Для підвищення характеристик опору втоми зварних з'єднань металоконструкцій тривалого строку служби (мости, шляхопроводи, морські платформи та ін.) як у вихідному стані, так і при ремонтно-відновлювальних роботах, широко застосовуються способи поверхневого пластичного деформування (ППД) металу, в тому числі технологія високочастотної механічної проковки (ВМП) [1–4]. Експериментальними дослідженнями встановлена висока ефективність застосування технології ВМП зварних з'єднань не тільки з накопиченими втомними пошкодженнями, але і з корозійними пошкодженнями внаслідок тривалого впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища [5]. З аналізу літературних даних [6–10] відомо, що застосування методів ППД сприяє підвищенню циклічної довговічності елементів конструкцій навіть з втомними тріщинами. Показано, що ефективність методів ППД залежить від виду зміцнюючої обробки та глибини тріщини. Наприклад, після застосування обробки пневмомолотом залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами глибиною 1,0...1,5 мм збільшується у 10 разів, з поверхневими втомними тріщинами глибиною біля 3,0 мм – у 1,1...1,25 разів, а з поверхневи-

ми втомними тріщинами глибиною більш 5,0 мм – циклічна довговічність не збільшується [8]. При зміцненні технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами глибиною до 1,0 мм залишкова довговічність збільшується у 10 разів, з поверхневими втомними тріщинами глибиною 2,0 мм – у 5 разів, а з поверхневими втомними тріщинами глибиною біля 4,5 мм – циклічна довговічність не збільшується [10]. Проте, на даний час відсутні дані щодо ефективності застосування технології ВМП до зварних з'єднань металоконструкцій, які експлуатуються в умовах впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища та містять поверхневі втомні тріщини незначної глибини.

Мета даної роботи – дослідити залишкову циклічну довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними зварним металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України, після їх зміцнення технологією ВМП.

**Матеріал і методика досліджень.** Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових зварних з'єднань низьколегованої сталі 15ХСНД ( $\sigma_T = 400$  МПа,  $\sigma_B = 565$  МПа), яка ши-

В.В. Книш – <http://orcid.org/0000-0003-1289-4462>; С.О. Соловей – <http://orcid.org/0000-0002-1126-5536>;  
Л.І. Ниркова – <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>; А.О. Гришанов – <http://orcid.org/0000-0003-1044-2374>;  
В.П. Кузьменко – <http://orcid.org/0000-0002-9395-7455>

© В.В. Книш, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, А.О. Гришанов, В.П. Кузьменко, 2020

роко застосовується для виготовлення елементів металоконструкцій тривалої експлуатації (наприклад, в прогонових будовах залізничних і автомобільних мостів), має підвищену міцність, добре зварюється, стійка в атмосферних умовах і працездатна в діапазоні температур від  $-70$  до  $45$  °С.

Заготовки під зразки зварних з'єднань вирізали з гарячекатаного листового прокату товщиною 12 мм 12 категорії в напрямку прокату. Таврові зварні з'єднання отримували шляхом приварки ручним дуговим зварюванням електродами марки УОНИ 13/55 поперечних ребер жорсткості (також зі сталі 15ХСНД) до заготовок розмірами  $350 \times 70$  мм з двох сторін кутовими швами. Корінь (перший шов) виконували електродами діаметром 3 мм, другий шов формували електродами діаметром 4 мм. Форма і геометричні розміри зразків таврових зварних з'єднань наведено на рис. 1. Товщина зразка обумовлена широким застосуванням в інженерних зварних металоконструкціях прокату товщиною 12 мм, а ширину робочої частини 50 мм вибирали виходячи з потужності випробувального устаткування.

Всі дослідження на втому проводили на випробувальній сервогідравлічній машині УРС-20 при віднульовому змінному розтягуванні з асиметрією циклу  $R_\sigma = 0$  і частотою 5 Гц при регулярному навантаженні. На першому етапі проводили втомні випробування при максимальних значеннях прикладених напружень циклу 180 МПа з метою ініціювання та розвитку на поверхні зразків втомних тріщин незначних розмірів. Даний рівень прикладених максимальних напружень близький до границі обмеженої витривалості даних з'єднань на базі

$2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень. Для уникнення складнощів, пов'язаних з достовірним визначенням глибини втомної тріщини під час досліджень, у якості критерію завершення втомних випробувань було вибрано досягнення тріщиною на поверхні зразка заданого розміру від 5 до 30 мм. Під час даних випробувань зразки в зоні зварного шва змащували індикаторною рідиною, що складалася з гасу та тонеру. Після утворення на поверхні зразка тріщини заданої довжини (всі тріщини утворювалися по лінії переходу металу шва на основний метал) залишки індикаторної рідини видаляли продуванням стиснутим повітрям. Індикаторну рідину при подальших випробуваннях зразків більш не застосовували, що дало змогу визначити чіткий фронт початкової тріщини на зламах зварних з'єднань. Після розвитку тріщин на поверхні зразків до заданого розміру проводили прискорені корозійні випробування в умовах, які моделюють вплив атмосфери помірного клімату центральних областей України, згідно методики [5]. Тобто зразки зварних з'єднань експонували в гідростаті Г4 при температурі  $40$  °С і відносній вологості повітря 100 % протягом 1200 год. Таким чином, внаслідок попередніх втомних та прискорених корозійних випробувань дослідні зразки мали пошкодження, характерні пошкодженням зварних з'єднань металоконструкцій після довготривалої експлуатації при змінному навантаженні в умовах помірного клімату.

При підготовці зразків з поверхневими втомними тріщинами та корозійними пошкодженнями для випробувань на втому їх захватні частини повторно зачищали від корозійних пошкоджень. Зачистку зони шва від продуктів корозії до металевго блиску не проводили. Одну частину зразків залишали у незміцненому стані, а другу зміцнювали технологією ВМП. Зміцнення зварних з'єднань технологією ВМП виконували обладнанням USTREAT-1.0, в якому ручний компактний ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем з'єднаний з ультразвуковим генератором вихідною потужністю 500 Вт. При обробці зварних з'єднань технологією ВМП поверхневого пластичного деформування піддавали не тільки лінії сплавлення, яка містила тріщину втоми, а всі чотири лінії переходу металу шва на основний метал таврового з'єднання. У якості пристрою для зміцнення використовували однорядну чотирьохбойкову насадку з діаметром бойків 3 мм. Зміцнення проводили без попереднього очищення поверхні від продуктів корозії.

Таким чином, випробування на втому проводили на двох серіях зразків:

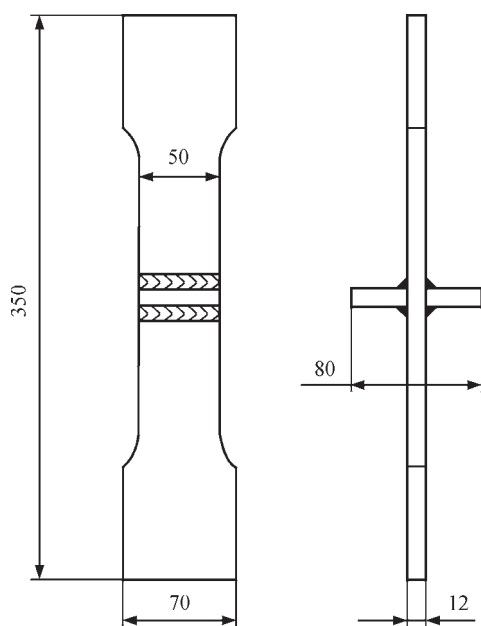


Рис. 1. Форма та геометричні розміри зразків таврового зварного з'єднання

- зразки таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами довжиною 5...30 мм і корозійними пошкодженнями (перша серія);
- зразки таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами довжиною 5...30 мм і корозійними пошкодженнями, які зміцнювали технологією ВМП (друга серія).

Експериментальні дослідження залишкової довговічності даних зварних з'єднань проводили до повного руйнування зразків або перевищення бази випробувань  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень.

**Результати випробувань.** Результати втомних випробувань таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з тріщинами втоми без зміцнення ВМП (перша серія) наведено в табл. 1 та на рис. 2. На рис. 2 також наведено дані таврових зварних з'єднань після напрацювання  $2 \cdot 10^6$  циклів при прикладених максимальних напруженнях 150 МПа (без утворення тріщин втоми), корозійних випробувань у гідростаті Г4 протягом 1200 год без та

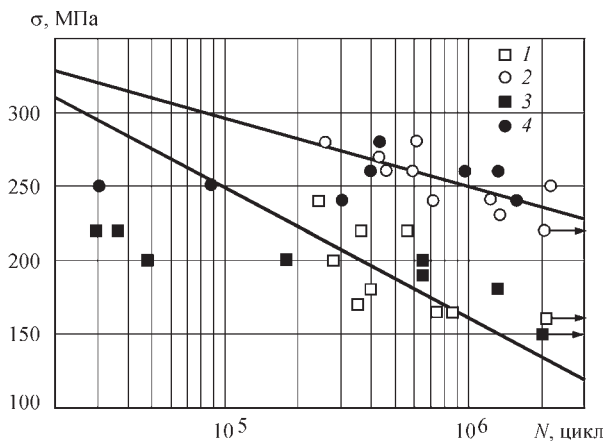


Рис. 2. Криві втоми таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД: 1 – після напрацювання 2 млн циклів та витримки у камері Г4 протягом 1200 год. [5]; 2 – після напрацювання 2 млн циклів, витримки у камері Г4 протягом 1200 год. та послідуєного зміцнення технологією ВМП [5]; 3 – після напрацювання до утворення поверхневих тріщин втоми та витримки у камері Г4 протягом 1200 год.; 4 – після напрацювання до утворення поверхневих тріщин втоми, витримки у камері Г4 протягом 1200 год. та послідуєного зміцнення технологією ВМП

**Таблиця 1.** Циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з корозійними пошкодженнями та поверхневими тріщинами втоми

| Номер зразка | $l_{тр}$ , мм | $N_{тр}$ , цикли | $\sigma_{незмц\max}$ , МПа | $N_{тр}^{незмц}$ , цикли | Результат                      |
|--------------|---------------|------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 2272         | 7             | 1531300          | 150                        | 2000000                  | Не зруйнувався                 |
| 2277         | 10            | 1164000          | 180                        | 1327500                  | Руйнування по лінії сплавлення |
| 2279         | 10            | 826700           | 190                        | 647600                   | –"                             |
| 2278         | 12            | 811800           | 200                        | 177800                   | –"                             |
| 2275         | 15            | 1137800          | 220                        | 35900                    | –"                             |
| 2273         | 7             | 1735700          | 200                        | 656300                   | –"                             |
| 2274         | 25            | 853100           | 220                        | 29500                    | –"                             |
| 2276         | 20            | 1626800          | 200                        | 48400                    | –"                             |

Примітка.  $l_{тр}$  – довжина тріщини до корозійних випробувань, встановлена за методом газової проби;  $N_{тр}$  – циклічна довговічність до зародження тріщини заданої довжини при максимальних прикладених напруженнях 180 МПа;  $\sigma_{незмц\max}$  – максимальні напруження циклу, які прикладалися до зразка з тріщиною після корозійних випробувань у камері Г4 протягом 1200 год;  $N_{тр}^{незмц}$  – залишкова циклічна довговічність зразка з тріщиною втоми заданої довжини та корозійними пошкодженнями.

з послідуєним зміцненням технологією ВМП, отримані у роботі [5].

Залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами довжиною до 10 мм після корозійних випробувань при підвищених температурі та відносній вологості протягом 1200 год знаходиться на рівні залишкової довговічності зварних з'єднань, які піддавали циклічним навантаженням  $2 \cdot 10^6$  циклів при максимальних напруженнях 150 МПа (без утворення тріщин) та корозійним випробуванням. Зі збільшенням довжини початкової тріщини залишкова довговічність з'єднань знижується (див. табл. 1, рис. 2). Оскільки зразок 2272 не зруйнувався до  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень, то з метою встановлення розмірів (глибини та довжини) початкової тріщини зразка проводили його руйнування при циклічному навантаженні з підвищеними до 280 МПа рівнями максимальних прикладених напружень. Злами зразків таврових з'єднань з поверхневими тріщинами та корозійними пошкодженнями наведено на рис. 3. Як видно, запропонована методика дозволяє чітко визначити на зламах геометричні розміри початкової тріщини після руйнування зразків. Проте, встановлена довжина початкових втомних тріщин на поверхні виявилася на 2...3 мм довшою ніж при визначенні безпосередньо під час циклічного навантаження. Не дивлячись на те, що всі тріщини втоми зароджувалися по зоні сплавлення в центрі зразка, коефіцієнт стискання поверхневої тріщини (відношення глибини тріщини до напівдовжини) в них різний. Вважаємо, що це пов'язано з розвитком тріщин в різних полях залишкових зварювальних напружень, обумовлених порядком виконання кутових швів.

Результати втомних випробувань таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД після утворення поверхневих тріщин втоми, корозійних випробувань у гідростаті Г4 протягом 1200 год та з послідуєного зміцненням технологією ВМП (дру-



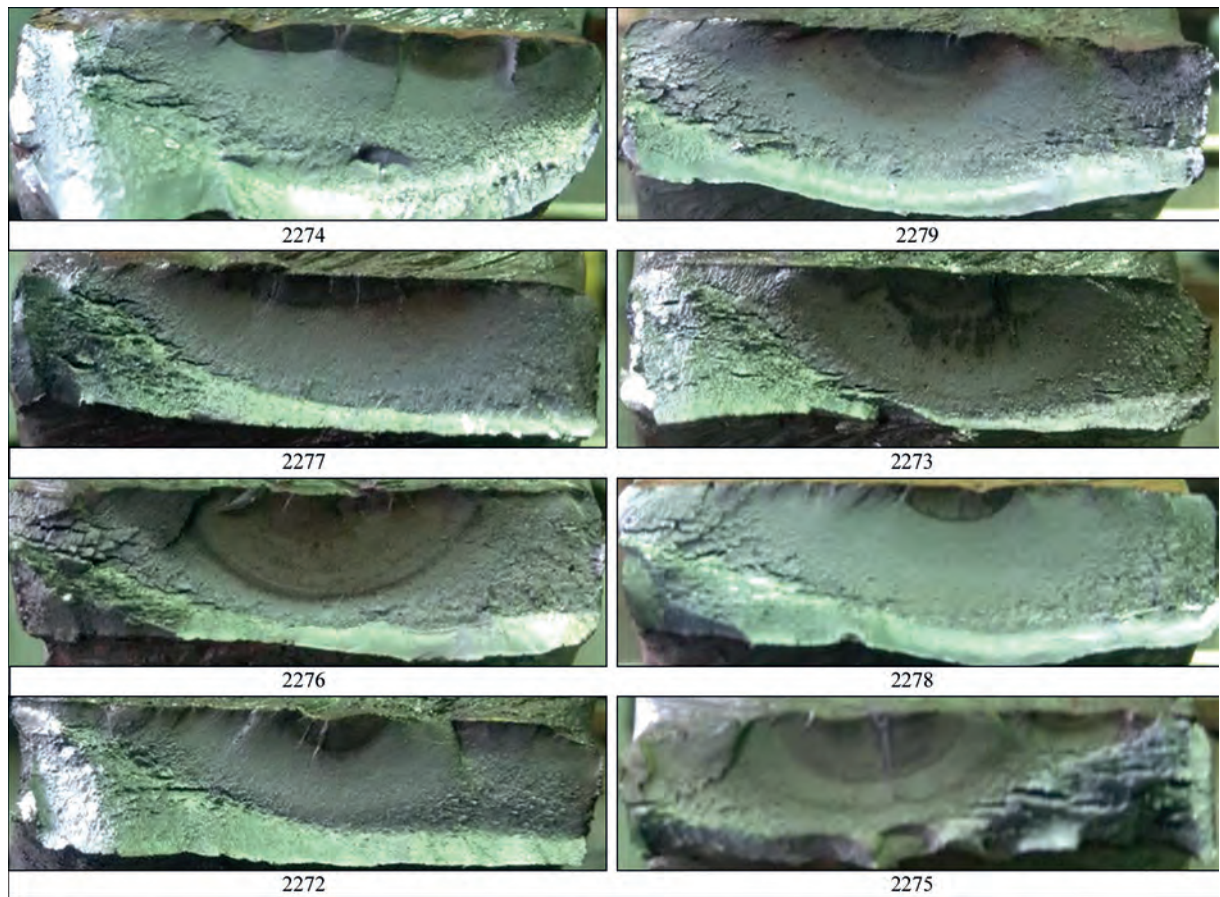


Рис. 3. Втомні злами зразків таврових зварних з’єднань сталі 15XCHD з поверхневими тріщинами втоми, які не зміцнювали ВМП після витримки у камері Г4 на протязі 1200 год. (див. табл. 1.)

га серія) приведені у табл. 2 та рис. 2. Отримані експериментальні дані вказують на те, що ефективність застосування технології ВМП до зразків другої серії фактично визначається геометричними розмірами тріщини втоми, яка утворилася до обробки. Так, зміцнення за технологією ВМП таврових зварних з’єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною до 10 мм збільшує їх циклічну довговічність до 10 разів. Розкид експериментальних даних таких з’єднань знаходиться в межах розкиду з’єднань без тріщин втоми, зміцнених ВМП при заданому рівні втомно-корозійних пошкоджень (напрацювання  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень + камера Г4 протягом 1200 год). Застосування технології ВМП до зварних з’єднань, які містять тріщини втоми довжиною 20 мм і більше, не призводить до підвищення циклічної довговічності і є неефективним (табл. 2). Три зразки

**Таблиця 2.** Циклічна довговічність таврових зварних з’єднань з корозійними пошкодженнями та поверхневими тріщинами втоми після їх зміцнення технологією ВМП

| Номер зразка | $l_{тр}$ , мм | $N_{тр}$ , цикли | $\sigma_{\max}^{зміц}$ , МПа | $N_{тр}^{зміц}$ , цикли | Результат                                                 |
|--------------|---------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 2155         | 5             | 432200           | 260                          | 1335200                 | Руйнування по основному металу на відстані 25 мм від шва  |
| 2156         | 5             | 292900           | 260                          | 972700                  | Руйнування по основному металу на відстані 40 мм від шва  |
| 2175         | 10+10*        | 960700           | 280                          | 434200                  | Руйнування по лінії сплавлення                            |
| 2180         | 10+8+6*       | 401800           | 260                          | 396000                  | -”-                                                       |
| 2177         | 20            | 1138000          | 250                          | 30700                   | -”-                                                       |
| 2178         | 5             | 261100           | 240                          | 1588100                 | Руйнування по основному металу в захватній частині зразка |
| 2179         | 10            | 643500           | 240                          | 306400                  | Руйнування по лінії сплавлення                            |
| 2176         | 30            | 463900           | 250                          | 88000                   | -”-                                                       |

Примітка: де  $l_{тр}$  – довжина тріщини до корозійних випробувань, встановлена за методом газової проби;  $N_{тр}$  – циклічна довговічність до зародження тріщини заданої довжини;  $\sigma_{\max}^{зміц}$  – максимальні напруження циклу, які прикладалися до зразка з тріщиною після корозійних випробувань у камері Г4 протягом 1200 год. та зміцнення за технологією ВМП;  $N_{тр}^{зміц}$  – залишкова циклічна довговічність зразка з тріщиною заданої довжини та корозійними пошкодженнями після зміцнення технологією ВМП; \* – зразки, які мали кілька окремих поверхневих тріщин вздовж однієї лінії сплавлення.



Рис. 4. Випробувані на втому зразки таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими втомними тріщинами, які зміцнювали ВМП після витримки у камері Г4 на протязі 1200 год.

(2155, 2156 та 2178), які містили тріщини втоми довжиною 5 мм, після зміцнення ВМП зруйнувалися віддалік від зварного шва по основному металу (рис. 4). Зародження тріщин в зразках 2155 та 2156 відбулось від каверн у поверхневому гарячекатаному шарі металу, а в зразку 2178 – від насічки на захватній частині зразка, що утворюється під час його затискання у випробувальній машині (рис. 5). Інші зразки руйнувалися по лінії сплавлення від тріщин втоми, які піддавалися зміцненню (див. рис. 4 та рис. 5).

Таким чином, встановлена висока ефективність застосування технології ВМП для підвищення циклічної довговічності таврових зварних з'єднань

металоконструкцій, які внаслідок тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України містять поверхневі тріщини втоми довжиною до 10 мм та характерні корозійні пошкодження.

## Висновки

1. Експериментально досліджено залишкову довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України. Тривалий вплив атмосфери помірного клімату моделювали експонуванням з'єднань в гідростаті Г4 при температурі 40 °С і відносній вологості повітря 100 % протягом 1200 год. Підтверджено, що зі збільшенням довжини початкової тріщини залишкова довговічність з'єднань знижується.

2. Встановлено, що зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною до 10 мм та корозійними пошкодженнями, характерними металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України, збільшує їх залишкову циклічну довговічність до 10 разів. При цьому значення залишкової довговічності знаходяться в межах розкиду експери-

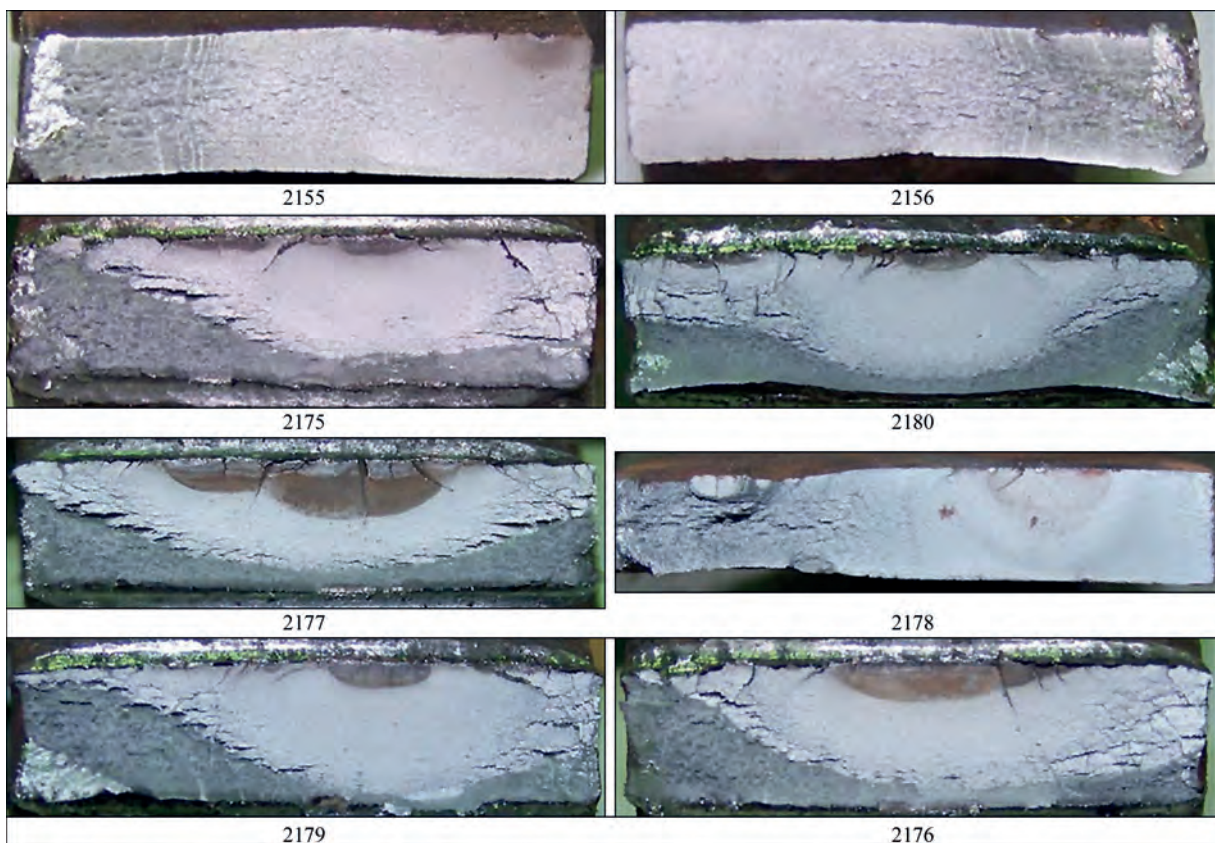


Рис. 5. Втомні злами зразків таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами втоми, які зміцнювали ВМП після витримки у камері Г4 на протязі 1200 год. (див. табл. 2)



ментальних значень з'єднань без тріщин втоми, зміцнених технологією ВМП при заданому рівні накопичених втомних і корозійних пошкоджень (напрацювання  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень при максимальних напруженнях 150 МПа та експонування у гідростаті Г4 протягом 1200 год). Показано, що застосування технології ВМП до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми довжиною 20 мм і більше, не призводить до підвищення циклічної довговічності і є неефективним.

### Список літератури / References

1. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Lugovskoy A. et al. (2007) Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening. *Welding in the World*, **51**, 7-8, 47-53.
  2. Vilhauer B., Bennett C.R., Matamoros A.B., Rolfe S.T. (2012) Fatigue behavior of welded coverplates treated with ultrasonic impact treatment and bolting. *Engineering Structures*, **34**, **1**, 163-172.
  3. Abston S. (2010) The technology and applications of ultrasonic impact technology. *Australasian Welding Journal*, **55**, 20-21.
  4. Kuhlmann U., Dürr A., Günther P. et al. (2005) Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus höher festen baustählen durch Anwendung der UIT-technologie. *Schweißen und Schneiden*, **57**, **8**, 384-391.
  5. Книш В.В., Осадчук С.О., Соловей С.О. та ін. (2019) Методика прискорених корозійних випробувань для моделювання тривалого впливу атмосфери помірного клімату на зварні з'єднання. *Автоматическая сварка*, **11**, 52-58.
  6. Knysh, V.V., Osadchuk, S.O., Solovei, S.O. et al. (2019) Procedure of accelerated corrosion testing for modeling the long-term effect of moderate climate atmosphere on welded joints. *The Paton Welding J.*, **11**, 44-48.
  7. Turnbull A., Rios E.R., Tait R.B. et al. (1998) Improving the fatigue crack resistance of waspaloy by shot peening. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **21**, 1513-1524.
  8. Branko C.M., Infante V., Bartista R. (2004) Fatigue behaviour of the welded joints with cracks, repaired by hammer peening. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **27**, 785-798.
  9. Farrahi G.H., Majzoubi G.H., Hosseinzadeh F., Harati S.M. (2006) Experimental evaluation of the effect of residual stress field on crack growth behaviour in C(T) specimen. *Eng. Fract. Mech.*, **73**, 1772-1782.
  10. Кныш В.В., Соловей С.А., Кузьменко А.З. (2009) Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами. *Автоматическая сварка*, **1**, 38-43.
- Knysh, V.V., Kuzmenko, A.Z., Solovej, A.S. (2009) Increase of cyclic fatigue life of tee welded joints with surface cracks. *The Paton Welding J.*, **1**, 29-33.

## IMPACT OF HIGH-FREQUENCY PEENING AND MODERATE CLIMATE ATMOSPHERE ON CYCLIC FATIGUE LIFE OF TEE WELDED JOINTS WITH SURFACE FATIGUE CRACKS

V.V. Knysh, S.O. Solovej, L.I. Nyrkova, A.O. Grishanov, V.P. Kuzmenko

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 paper presents the results of investigations of the effectiveness of application of the technology of high-frequency mechanical peening to improve the residual fatigue life of tee welded joints of 15KhSND steel with surface fatigue cracks and corrosion damage characteristic for structures after long-term service under the conditions of moderate climate of the central regions of Ukraine. Corrosion damage on the surface of joints was obtained by exposure in G4 hydrostat at higher temperature and relative humidity of air for 1200 h. It is experimentally established that strengthening by the technology of high-frequency mechanical peening of tee welded joints with surface fatigue cracks of up to 10 mm length and characteristic fatigue damage increases their cyclic fatigue life by up to 10 times. It is shown that application of the technology of high-frequency mechanical peening of welded joints, which contain fatigue cracks of 20 mm and greater length, does not lead to improvement of cyclic fatigue life and is not effective. 10 Ref., Tabl. 2, Fig. 5.

**Keywords:** tee welded joint, corrosive environment, fatigue, accelerated corrosion testing, high-frequency mechanical peening, improvement of cyclic fatigue life

Надійшла до редакції 06.11.2019

### Cutting World 2020

#### Ярмарка професійних технологій різки

С 28 по 30 апреля 2020 г. Cutting World будет открыта в Messe Essen. Это единственная выставка, которая концентрируется на всей технологической цепочке на тему резки. Многочисленные экспоненты уже воспользовались возможностью, чтобы обеспечить зоны стендов в новом зале 8. В их число входят следующие компании: Assfalg, Boschert, Cam Concept, Eckelmann, Kjellberg, MGM, ProCom and Rosenberger, Air Liquide Deutschland, BKE, IHT Automation, NUM, STM Waterjet and Yamazaki Mazak. Заинтересованные участники могут найти регистрационные документы на [www.cuttingworld.de](http://www.cuttingworld.de). Крайний срок регистрации 30 ноября 2019 г.

В 2020 г. Cutting World впервые пройдет в модернизированном зале 8 в Messe Essen. Экспоненты и посетители попадут в зал через новое, залитое светом стеклянное фойе. Восточный конгресс-центр расположен в непосредственной близости и будет принимать Немецкий конгресс по резке и Немецкую конференцию по газопламенной резке. Кроме того, участники Cutting World получат выгоду от благоприятного для инвестиций климата, потому что рынок режущих установок находится в состоянии постоянного изменения. Почти половине существующих металлорежущих станков уже более семи лет, и в этом секторе все больше требуются современные процедуры создания сетей и взаимосвязи последующих и начальных процессов обработки. Благодаря технологиям Industry 4.0 эксперты ожидают дополнительный потенциал получения прибыли в диапазоне миллиардов Евро для машиностроения в Германии в ближайшие годы.





# ПРЕСОВЕ ЗВАРЮВАННЯ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОЦИЛІНДРІВ

В.С. Качинський, С.І. Кучук-Яценко, М.П. Коваль

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Наведено матеріали по проведенню роботи в рамках дослідження зварюваності деталей гідравлічних циліндрів діаметром від 40 до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм, а також результати виконаних металографічних досліджень та механічних властивостей зварних з'єднань. Визначено основні умови для формування зварного з'єднання трубчастих деталей гідроциліндрів. Розроблено процес пресового зварювання магнітокерованою дугою труб гідроциліндрів діаметром до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 16.

*Ключові слова:* пресове зварювання магнітокерованою дугою, труби для гідроциліндрів, формування з'єднання, технологія зварювання

У різних галузях промисловості виконується великий обсяг робіт зі зварювання кільцевих швів труб і трубчастих деталей гідроциліндрів діаметром 40...220 мм з товщиною стінки від 4 до 10 мм, що працюють під високим тиском. При цьому використовується в основному електродугове зварювання.

Розробка технологій та обладнання для пресового зварювання в стаціонарних умовах дозволила б значно підвищити продуктивність праці в промисловості і поліпшити стабільність якості з'єднань. Досвід, накопичений ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України за останні десятиліття в області зварювання труб тиском свідчить про перспективність виконання таких розробок на основі методу пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД).

В останні десятиліття технології ПЗМД розроблені та успішно впроваджені при виготовленні різних трубчастих вузлів на автомобільних заводах України та інших країн, зварюванні труб при будівництві тепличних комплексів, при зварюванні трубопроводів в умовах вічної мерзлоти [1–6].

Метою проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона останнім часом досліджень була розробка технології та обладнання для зварювання ПЗМД труб з донцем різного сортаменту та хімічного складу сталі, діаметром до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм, що покриває найбільш затребуваний сортамент трубчастих деталей для виготовлення циліндрів (рис. 1).

Хімічний склад досліджених трубних сталей наведено в табл. 1, показники механічних властивостей основного металу і зварного з'єднання наведено в табл. 2. Типорозміри деталей, що зварюються, включали: діаметр 40...188 мм, товщина стінки 4...10 мм (32 типорозміри).

Всі зварні з'єднання випробовувалися відповідно до міжнародного стандарту API [7], а також проводилися додаткові випробування на загин згідно з відомчими методиками і стандартами.

Металографічні дослідження проводилися після травлення в 4%-му розчині  $\text{HNO}_3$  в спирті. Вимірювання мікротвердості проводилися на приладі М-400 фірми «Леко» при навантаженні 10; 100; 1000 г. Фотографування структури зварних з'єднань проводилися на оптичному мікроскопі «Neophot-32».

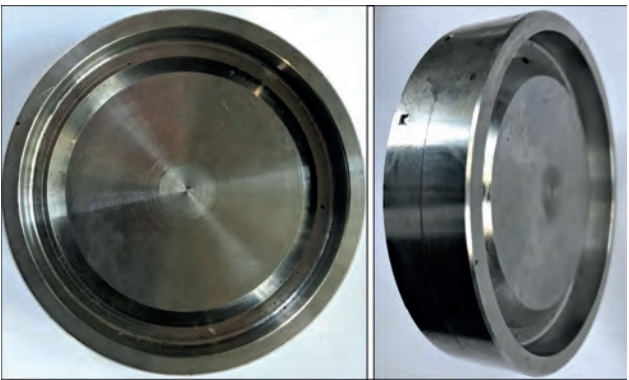


Рис. 1. Конструкція донця гідроциліндра (висота 35 мм)

Таблиця 1. Хімічний склад сталей, мас. %

| Марка сталі     | C     | Si    | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Mo   | Ti    | Nb    | B     | Al   |
|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| St52-3          | 0,18  | 0,52  | 1,35 | 0,02  | 0,03  | 0,28 | 0,24 | 0,23 | -    | -     | -     | -     | -    |
| 01Star520 (X80) | 0,159 | 0,172 | 1,19 | 0,012 | 0,006 | 0,13 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,03 |

В.С. Качинський – <http://orcid.org/0000-0001-9695-6434>; С.І. Кучук-Яценко – <http://orcid.org/0000-0002-1166-0253>

М.П. Коваль – <http://orcid.org/0000-0003-2066-3365>

© В.С. Качинський, С.І. Кучук-Яценко, М.П. Коваль, 2020

Таблиця 2. Основні технологічні параметри зварювання

| Марка сталі     | Діаметр труби × товщину стінки, мм | Час зварювання, с | Зусилля осадки, кН | Укорочення труб, мм |
|-----------------|------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| St52-3          | 40×4                               | 6                 | 40                 | 4,1                 |
| St52-3          | 60×5                               | 14                | 57                 | 5,4                 |
| St52-3          | 120×7,5                            | 37                | 257                | 8,2                 |
| 01Star520 (X80) | 121×7                              | 35                | 250                | 8                   |
| 01Star520 (X80) | 121×10                             | 43                | 278                | 10                  |

Процес ПЗМД характеризується тим, що дуга під дією зовнішнього керуючого магнітного поля рухається в зазорі між торцями трубчастих деталей, що зварюються. Відносно висока швидкість руху дуги, до 170 м/с, дозволяє перерозподіляти теплову енергію зварювальної дуги по всій поверхні торців деталей. Досягається відносно рівномірний нагрів зварювальних торців труб. Зварне з'єднання формується при стисканні та спільній пластичній деформації торців деталей [8]. Процес зварювання деталей гідроциліндрів виконується на повітрі, без застосування захисних газів.

З огляду на різні умови тепловідведення деталей, мета досліджень полягала в тому, щоб знайти способи керування процесом нагрівання, що дозволяють стійко переміщати зварювальну дугу по всій площі поперечного перерізу торців труби і донця, досягаючи їх рівномірного нагрівання.

В результаті проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона досліджень було розроблено спосіб, що дозволяє управляти переміщенням дуги по всій площі поперечного перерізу трубчастих деталей. Процес нагріву торців виконується при переміщенні зварювальної дуги по зовнішнім кромкам, в області з підвищеним значенням радіальної складової індукції управляючого магнітного поля (УМП) (рис. 2).

Після досягнення рівномірного нагріву, що забезпечує необхідні умови для пластичної деформації торців, виконується програмна зміна технологічних параметрів зварювання, що призводить до сканування зварювальної дуги по поверхні торців труб (рис. 3). Якісне формування зварного з'єднання труби з донцем може бути забезпечено без будь-якого газового захисту за умови, що частота обертання дуги в момент перед осадкою обрана такою, що шар розплаву металу в будь-якій точці на поверхні торців не встигає кристалізува-

тися за інтервали часу при проходженні дуги через ці ділянки. Потім виконується осадка.

На базі цих досліджень розроблена система автоматичного управління процесом ПЗМД труби з донцем, визначені оптимальні програми зміни основних параметрів в процесі зварювання, а також алгоритми їх управління з використанням зворотних зв'язків [5]. Розроблено технології ПЗМД деталей гідроциліндрів, а також обладнання для зварювання. Основні показники, які характеризують режими зварювання наведені в табл. 2.

Високоміцні сталеві трубчасті деталі, що працюють під високим тиском, використовуються при виготовленні гідравлічних циліндрів. Фотографія зовнішнього вигляду зварних з'єднань наведена на рис. 4.

Механічні випробування, такі як випробування на розтягання, вигин (рис. 5), розрив, вимірювання твердості та металографічні дослідження проводилися відповідно до стандарту API 1104 [7].

Механічні властивості зварних з'єднань труб наведено в табл. 3.

Проведені всебічні механічні випробування свідчать про практичну рівномірність зварних з'єднань і основного металу та задовольняють нормативним вимогам.

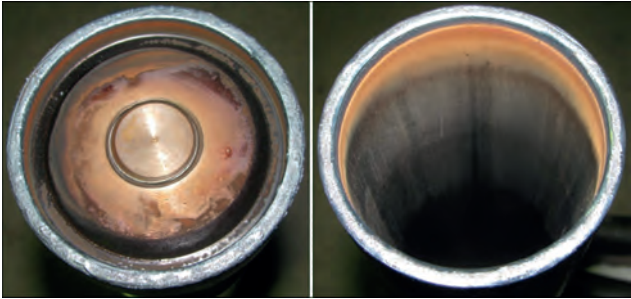


Рис. 3. Поверхні торців труб і донця, покриті шаром розплаву металу



Рис. 2. Сліди, залишені зварювальною дугою при нагріванні зовнішніх кромek труби

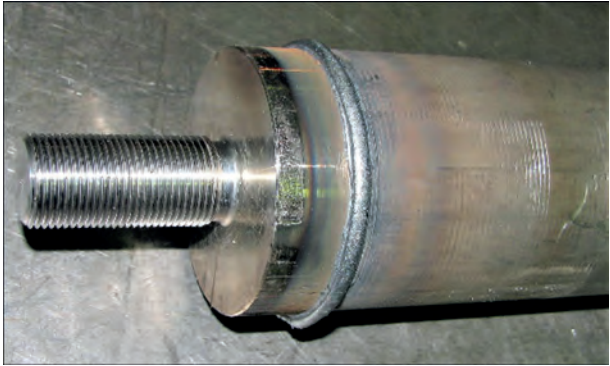


Рис. 4. Зварне з'єднання труби з донцем діаметром 120×7,5 мм



Таблиця 3. Механічні властивості зварних з’єднань труб

| Марка сталі | Діаметр труби×товщину стінки, мм | $\sigma_b$ , МПа        |                         | $KCV_{20}$ , Дж/см <sup>2</sup> |                        |
|-------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|
|             |                                  | Основний метал          | Зварне з’єднання        | Основний метал                  | Зварне з’єднання       |
| St52-3      | 90×5                             | <u>492...513</u><br>498 | <u>480...492</u><br>486 | —                               | —                      |
| 01Star520   | 121×10                           | <u>685...708</u><br>696 | <u>630...645</u><br>638 | <u>125...168</u><br>147         | <u>60...168</u><br>114 |
| 01Star520   | 191×7                            | <u>638...665</u><br>651 | <u>618...674</u><br>656 | <u>116...154</u><br>135         | <u>87...152</u><br>119 |
| St52-3      | 120×7,5                          | <u>491...512</u><br>497 | <u>478...489</u><br>483 | —                               | —                      |

Металографічні дослідження виконувалися на оплавленому торці виробу діаметром 90 мм (рис. 3) в момент перед осадкою та зварному з’єднанні діаметром 120×7,5 мм (рис. 4) зі сталі St52-3. Зразки для досліджень виготовили на високошвидкісних дисках за допомогою алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури проводили за допомогою хімічного травлення в 4%-му розчині HNO<sub>3</sub> в етиловому спирті. Дослідження проводили на мікроскопах «Neophot-32» і «Poluvar» при різних збільшеннях. Твердість товщини шару розплаву вимірювали на мікротвердомірі М-400 фірми «Лесо».

Зразок після нагрівання, без осадки (див. рис. 3). На оплавленому торці зразка є ділянка з литою структурою (рис. 6). Ширина ділянки становить

300...400 мкм. Структура металу феритно-перлітна, ферит виділяється уздовж границь кристалітів. На цій ділянці виявлено полігональний та відманштетів типи феритів, а по границям кристалітів поліедричний (в незначній кількості). Твердість на цій ділянці HV1–2240 МПа; HV1–1850 МПа; HV1–2280 МПа; HV1–2060 МПа. На ділянці перегріву структура складається з верхнього і нижнього бейніту з твердістю HV1–2830 МПа; HV1–3090 МПа; HV1–3360 МПа; HV1–3480 МПа. Ширина цієї ділянки–2000 мкм, далі в структурі з’являється перліт, кількість бейніту зменшується, твердість знижується до HV1–2490 МПа; HV1–2450 МПа.

На ділянці повної перекристалізації структура дрібна, що складається з фериту, перліту і невеликої кількості бейніту. У структурі з’являються сліди зі смугами (рис. 7), які відсутні на ділянці перегріву (рис. 8). Твердість HV1–2060...2240 МПа.

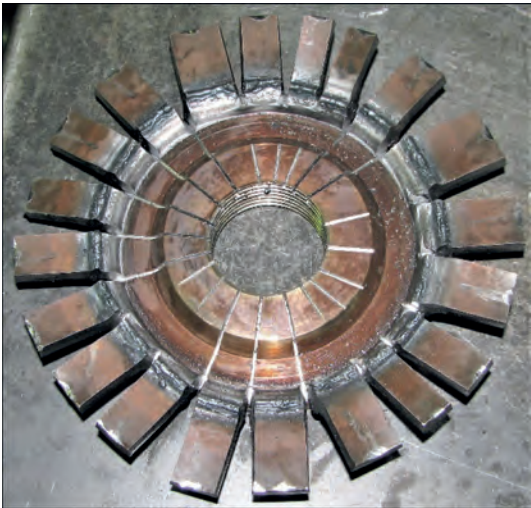


Рис. 5. Результати випробувань зварного з’єднання на вигин

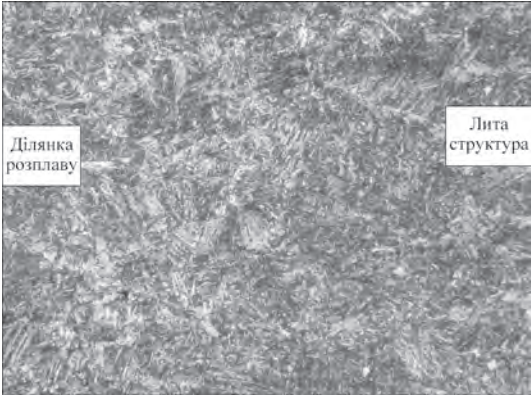


Рис. 6. Мікроструктура (×200) ділянки литого металу та ділянки розплаву

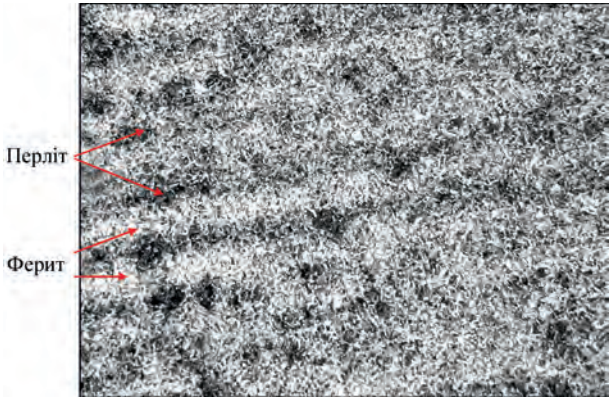


Рис. 7. Мікроструктура (×200) ділянки повної та часткової перекристалізації зі сторони донця

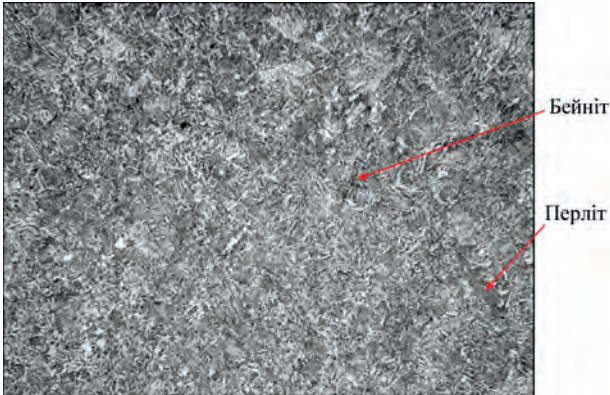


Рис. 8. Мікроструктура (×200) ділянки перегріву зі сторони донця



Ділянка неповної перекристалізації після осідання має дрібнозернисту феритно-перлітну структуру (бал 9 по ГОСТ 5639-82), де смуги фериту та перліту чергуються (рис. 7). Твердість металу на ділянці  $HV1 - 1880 \dots 1960$  МПа (ферит) та  $HV1 - 2060 \dots 2240$  МПа (перліт).

Основний метал має феритно-перлітну структуру у вигляді смуг із балом феритного зерна № 7-8 по ГОСТ 5639-82 та твердістю  $HV1 - 1870 \dots 1760$  МПа. Ширина зони термічного впливу становить 4000 мкм.

Макрошліф зварного з'єднання діаметром  $120 \times 7,5$  мм приведено на рис. 9. Лінія з'єднання – переривчаста біла смуга завтовшки до 40 мкм в центральній області зварного з'єднання і розширюється до 80 мкм до країв зразка. Структура лінії з'єднання феритна з твердістю  $HV1 - 1650 \dots 1810$  МПа. З розподілу твердості видно, що у з'єднанні є незначне підвищення твердості феритної смужки до  $HV1 - 1800$  МПа, що вище за твердість основного металу трубчастих деталей. Розподіл твердості в стику свідчить про відсутність суттєвих змін міцності на основних ділянках зварного шва. Показники твердості по лінії з'єднання також близькі до аналогічних показників основного металу. Структура металу в ЗТВ при ПЗМД більш однорідна. Дефектів по лінії з'єднання не виявлено (рис. 10).

Структура ділянки перегріву з боку кришки має невеликі ділянки перліту та фериту різних модифікацій, в основному це ферит з упорядкованою другою фазою. Крім цього, є полідрічний ферит, відманштетів ферит, полігональний ферит у вигляді фрагментів феритних смужок по границям колишніх аустенітних зерен.

Твердість металу на цій ділянці  $HV1 - 1830 \dots 2160$  МПа (рис. 10).

По мірі віддалення від лінії з'єднання структура подрібнюється, збільшується кількість полігонального та полідрічного фериту.

На ділянці повної перекристалізації структура дрібнозерниста (10-11 бал по ГОСТ 5639-82) феритно-перлітна.

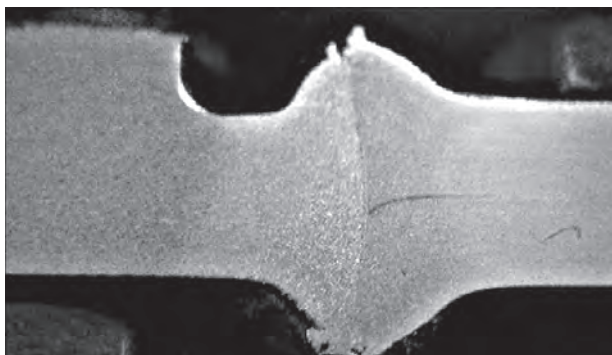


Рис. 9. Макрошліф зварного з'єднання труби і донця діаметром  $120 \times 7,5$  мм

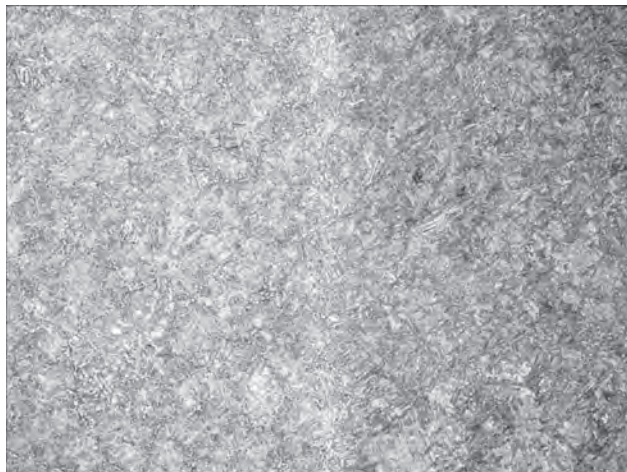


Рис. 10. Мікроструктура ( $\times 200$ ) зварного з'єднання

Основний метал має феритно-перлітну структуру з балом зерна № 8 та твердістю  $HV1 - 1560 \dots 1760$  МПа. Ширина ЗТВ приблизно 6000 мкм.

Ділянка перегріву з боку труби має майже таку ж структуру, як і ділянка з боку кришки (рис. 11, 12). Відмінність полягає в тому, що переважна кількість фериту з неупорядкованою другою фазою та структура на ділянці перегріву дрібніша. Твердість металу на ділянці перегріву  $HV1 - 1780 \dots 2060$  МПа. По мірі віддалення від лінії з'єднання структура подрібнюється. Ширина ділянки перегріву 2700 мкм. Ширина ділянки перегріву менше після осадки 2700 мкм, в порівнянні з 3500 мкм після нагрівання без осадки.

Структура ділянки повної перекристалізації фериту перлітна дрібнозерниста з переважанням феритної складової (рис. 12). Сліди смуг видно на ділянці неповної перекристалізації. Смуги з'являються в ділянці неповної перекристалізації. Структура на цій ділянці феритно-перлітна, що складається зі смуг фериту та перліту, які чергуються. Ширина ЗТВ приблизно 5000 мкм.

Основний метал являє собою дрібнозернисту (10-11 бал) феритно-перлітну структуру (рис. 13) з твердістю  $HV1 - 1660 \dots 1990$  МПа.

Дефектів в ЗТВ не спостерігається. Твердість перлітної смужки  $HV1 - 2050$  МПа,  $HV1 - 1990$  МПа,

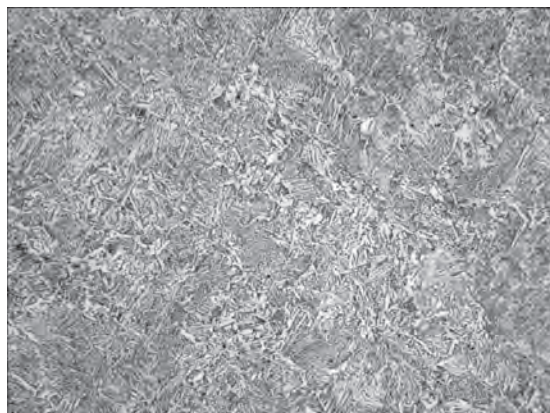


Рис. 11. Мікроструктура ( $\times 200$ ) ділянки перегріву зі сторони донця



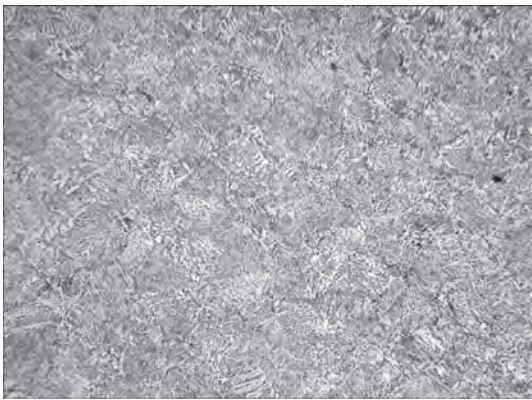


Рис. 12. Мікроструктура (×200) ділянки перегріву зі сторони труби

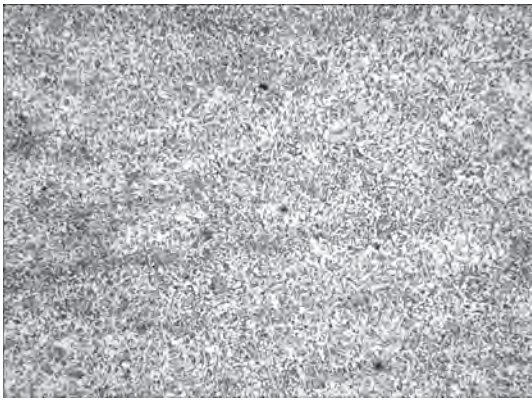


Рис. 13. Мікроструктура (×200) ділянки повної і неповної перекристалізації з боку труби

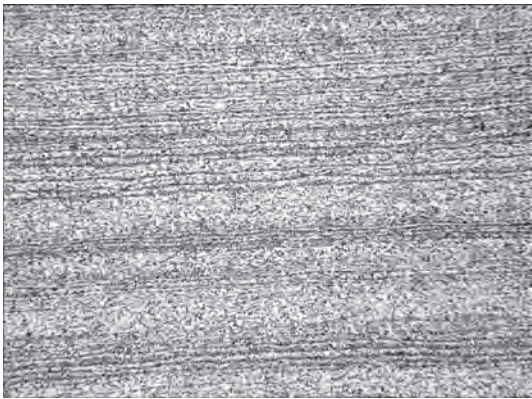


Рис. 14. Мікроструктура (×200) основного металу труби  
HV1 – 2050 МПа. Твердість поруч з перлітною феритною сумішшю HV1 – 1560...1600 МПа.

Для ПЗМД трубчастих деталей гідроциліндрів була розроблена машина МД-205, що забезпечує промислове зварювання в стаціонарних умовах (табл. 4). З використанням даної технології було зварено понад 17 тис. деталей гідроциліндрів діаметром від 42 до 178 мм (рис. 16).

Машина МД-205 (рис. 15) призначена для пресового зварювання трубчастих деталей різного призначення і складається зі:

- зварювальної головки;



Рис. 15. Готові до експлуатації гідроциліндри



Рис. 16. Зварювальна машина МД-205

- гідравлічної насосної станції;
- шафи управління з переносним пультом управління;
- джерела живлення зварювальної дуги.

Зварювальна машина МД-205 кліщового типу, характерною особливістю якої є роздільне затискання труб, що зварюються. Машина конструктивно має можливість завантаження-вивантаження труб, що зварюються, на сторону.

Висновки

1. Визначено оптимальні умови, що дозволяють стійко переміщати дугу у вузькому зазорі, для досягнення відносно рівномірного нагріву зварюваних торців труб.
2. Розроблено спосіб управління, що дозволяє переміщати дугу по всій зварювальній площі поперечного перерізу труб і формувати на ній рівномірно розподілений розплав.

Таблиця 4. Технічні характеристики машини для ПЗМД гідроциліндрів

| Індекс машини | Діаметр зварюваних труб, мм | Товщина стінки, мм | Продуктивність, стиків/год | Споживана потужність, кВт | Маса, кг |
|---------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|----------|
| МД-205        | 30...200                    | 3...10             | 80                         | 40                        | 1500     |

3. Визначено основні умови для формування зварного з'єднання трубчастих деталей гідроциліндрів.

4. Розроблено процес ПЗМД, який дозволяє зварювати труби з товщиною стінки, що перевищують розміри активних плям стовпа дуги.

5. Розроблено технології ПЗМД трубчастих деталей із високоміцних сталей при виробництві гідроциліндрів діаметром до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм.

## Список літератури / References

1. Ganovski F.J. (1974) The magnetarc welding process. *Welding and Metal Fabrication*, June, 206–213.
2. Edson, D.A. (1982) Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes. *IIW*, IM-726–82.
3. Takagi K., Aracida F. (1982) Magnetically Impelled Arc Butt Welding of gas pipeline. *Metal Construction*, **20**, 542–548.
4. Hiller F., Schmidt M., Breiksch J. (2003) Use of the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems. *ThyssenKrupp Techforum*, pp. 40–43.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachinskiy, V.S., Ignatenko, Yu. V. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of automobile parts. *Australasian Welding J.*, **55**, Second Quarter.
6. Kachinskiy V.S., Kuchuk-Yatsenko S.I., Ignatenko Yu.V., Koval M.P. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70. *Ibid*.
7. API STANDARD 1104 (2013) *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.
8. Kachinskiy V.S., Krivenko V.G., Ignatenko Yu. V. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. International Institute of Welding, III-1208-02. *Welding in the World*, **46**, 7/8, 49–56.

## PRESS MAGNETICALLY-IMPELLED ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH STEEL TUBULAR PARTS OF HYDRAULIC CYLINDERS

V.S. Kachynski, S.I. Kuchuk-Yatsenko, M.P. Koval

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

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

Materials for carrying out works in the framework of investigating welding of parts of hydraulic cylinders with diameters from 40 to 200 mm with a wall thickness of up to 10 mm, the results of performed metallographic examinations and mechanical properties of welded joints are presented. The basic conditions for forming welded joints of tubular parts of hydraulic cylinders were determined. The process of press magnetically-impelled arc welding of pipes of hydraulic cylinders with a diameter of up to 200 mm with a wall thickness of up to 10 mm was developed. 8 Ref., 4 Tabl., 16 Fig.

*Keywords:* press magnetically-impelled arc welding, pipes for hydraulic cylinders, joint forming, welding technology

Надійшла до редакції 06.11.2019

## Міжнародна конференція

# ТИТАН 2020: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

1–3 червня 2020 р.

Голова програмного комітету  
академік Б.Є. Патон



Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ  
Запорізький титано-магнієвий комбінат  
Інститут титану  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



### Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошків титану

- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ  
вул. Казимира Малевича, 11,  
м. Київ, 03150, Україна  
Тел./факс: (38044) 200-82-77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2020



Інформаційна підтримка:  
«Сучасна електрометалургія»  
«Автоматичне зварювання»





# ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ З ПРОГРАМУВАННЯМ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ ПОТУЖНОСТІ ПРОМЕНЯ

В.В. Скрыбінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник

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

В існуючих моделях процесу електронно-променевого зварювання форма і розміри зони проплавлення визначаються як енергетичними параметрами, так і формою джерела нагріву. Ефективно управляти розподілом густини потужності електронного променя, а, отже, формою джерела нагріву можливо за допомогою використання дискретних розгортток. Розроблено методику та комп'ютерну програму для розрахунку розподілу густини потужності при дискретному скануванні електронного променя з урахуванням координат точок розгортки, відносного часу його зупинки в точках і частоти розгортки. Спільне використання комп'ютерної програми для розрахунку розподілу густини потужності променя і математичної моделі електронно-променевого зварювання дозволяє отримувати задану форму і розміри зони проплавлення. Наведено результати розрахунку режимів зварювання та поперечні шліфи швів з паралельними боковими стінками і великим радіусом закруглення кореня при неповному проплавленні зразків з нержавіючої сталі. Також наведено методику розрахунку параметрів режиму електронно-променевого зварювання та поперечний шліф з'єднання різноименних сплавів. Бібліогр. 11, рис. 7.

*Ключові слова:* електронно-променеве зварювання, густина потужності променя, комп'ютерне проектування розгортток, форма зони проплавлення, зварювання різноименних сплавів

При електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ) основними параметрами режиму є прискорювальна напруга, струм променя, швидкість зварювання та положення фокальної плями променя відносно поверхні виробу, що зварюється. У разі використання осциляції променя до них додаються траєкторія, амплітуда і частота розгортки. Одночасний облік цих параметрів ЕПЗ для отримання високої якості з'єднань є складним, але актуальним завданням.

Метою даної роботи є демонстрація можливості управління формою парогозового каналу і, відповідно, формою зони проплавлення за допомогою комп'ютерного проектування розгортток променя зі спільним використанням математичної моделі ЕПЗ.

Інтенсивність впливу електронного променя в будь-якій точці оброблюваної поверхні пропорційна його густині потужності. Багато дослідників основним ефектом від розгортки називають можливість змінювати розподіл густини потужності електронного променя (тут і далі мова йде не про миттєву, а про усереднену за період розгортки густину потужності променя). При цьому змінюється форма парогозового каналу, його стійкість до зовнішніх збурень, форма зони проплавлення і, відповідно, ймовірність утворення кореневих дефектів [1–4].

Ефективно управляти розподілом густини потужності електронного променя а, отже, формою джерела нагріву при ЕПЗ можливо за допомогою

цифрових систем розгортки [5, 6]. У таких системах електронний промінь переміщується дискретно по заданій матриці точок, що складають траєкторію розгортки. Координати точок траєкторії та відносний час зупинки променя в цих точках за один період розгортки записують в постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП). Система управління перетворює цифровий код розгортки в електричні сигнали і подає їх на котушки відхилення електронно-променевої гармати.

Оцінка розподілу густини потужності електронного променя є досить складною задачею навіть при використанні найпростіших траєкторій розгортки (коло, півколо та ін.). Для цього крім траєкторії необхідно враховувати ступінь фокусування променя та амплітуди розгортки по осях  $X$  та  $Y$ . При використанні дискретних розгортток в розрахункову формулу також входять координати точок зупинки променя та відносний час його зупинки. У зв'язку з тим, що перехід променя з однієї точки в іншу здійснюється з кінцевою швидкістю (що визначається загальною інерційністю системи відхилення), розподіл густини потужності променя буде визначатися, в тому числі і частотою розгортки [7].

Беручи розподіл потужності в статичному промені близьким до Гаусового, відносну густину потужності скануючого електронного променя в  $i$ -й точці  $q(x_i, y_i)$  можна визначити як суму впливу  $N$  нормальних точкових і  $N$  лінійних джерел:

В.В. Скрыбінський – <http://orcid.org/0000-0003-4470-3421>; В.М. Нестеренков – <http://orcid.org/0000-0002-7973-1986>; М.О. Русиник – <http://orcid.org/0000-0002-7591-7169>

© В.В. Скрыбінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник, 2020

$$q(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{r_{ij}^2}{2r_e^2}\right) t_j + A(f) \sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{r_{ik}^2}{2r_e^2}\right) t_{j(j-1)}, \quad (1)$$

де  $A(f)$  – співвідношення між інтенсивністю точкових і лінійних джерел, залежне від частоти розгортки ( $f$ );  $N$  – кількість точок розгортки;  $r_e$  – ефективний радіус променя;  $r_{ij}$  – відстань від розрахункової точки  $i$  до  $j$ -ої точки розгортки;  $r_{ik}$  – відстань від розрахункової точки  $i$  до лінійного джерела;  $t_j$  – відносний час перебування променя в  $j$ -й точці розгортки;  $t_{j(j-1)}$  – час переходу променя з точки  $j-1$  в точку  $j$ .

Схема для розрахунку представлена на рис. 1. Функцію  $A(f)$  розраховують чисельними методами, з огляду на загальну інерційність системи відхилення променя. У нашому випадку інерційність системи залежить від параметрів котушок відхилення, генератора розгортки і підсилювачів струму, що відхиляє.

Комп'ютерні програми для проектування розгортки і оперативного контролю розподілу густини потужності променя при ЕПЗ дозволяють з високою точністю проводити розрахунки і виводити на екран та/або записувати в ПЗП отримані результати [7, 8]. При проектуванні розгортки користувач задає координати  $N$  дискретних положень променя, а також час його перебування в кожному з обраних положень (рис. 2).

Водночас на екрані комп'ютера зображується форма джерела нагріву (горизонтальна проекція і об'ємне зображення). Існує можливість вільно перетягувати точки розгортки по екрану або завантажувати з ПЗУ і редагувати вже існуючі траєкторії. Важливо відзначити, що в процесі проектування користувач не тільки розставляє точки траєкторії розгортки і задає відносний час зупинки променя, але і може перевірити вплив зміни фокусування,

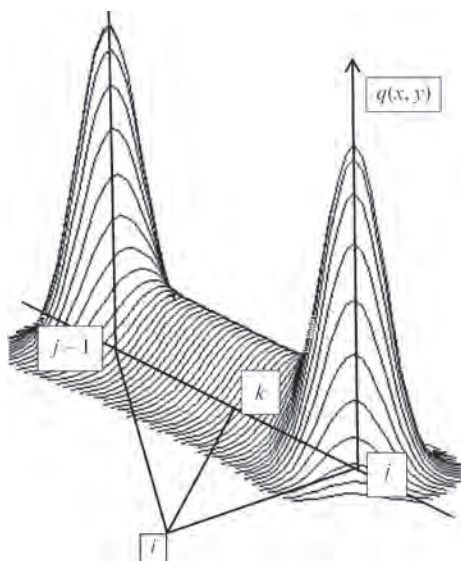


Рис. 1. Схема для розрахунку розподілу густини потужності електронного променя, що враховує частоту розгортки

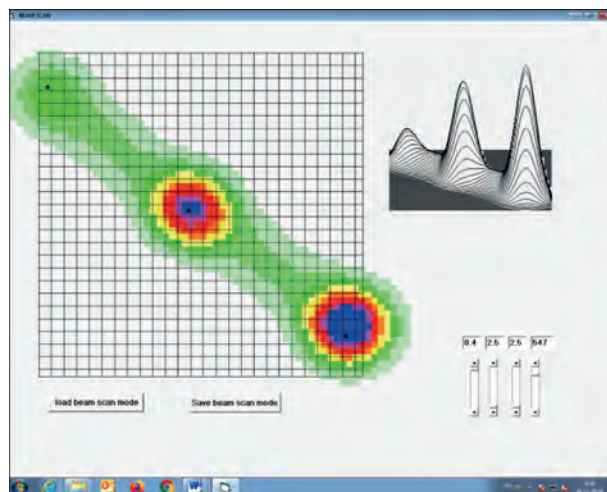


Рис. 2. Форма джерела нагріву (горизонтальна проекція та об'ємне зображення) при проектуванні розгортки на екрані комп'ютера. Параметри розгортки: кількість точок – 3; відносний час зупинки променя в точках 1, 2, 3; частота – 550 Гц

амплітуди і частоти розгортки на результуючий розподіл потужності променя.

Кожен з цих параметрів проявляє свій специфічний вплив на результат розрахунку за формулою (1) і, отже, на процес ЕПЗ. Для з'ясування цього впливу за допомогою комп'ютерної програми було проведено розрахунки наведених розподілів потужності променя при почерговій зміні амплітуди розгортки ( $D$ ), ступеня фокусування (ефективного радіусу променя  $r_e$ ) і часу зупинки променя ( $T$ ) в точках сканування (рис. 3).

Розрахунки проводили для кругової траєкторії сканування. Збільшення амплітуди розгортки призводить до пропорційного збільшення ширини зони впливу променя при різкому зниженні його інтенсивності та утворення западини в центральній частині графіка. Розфокусування променя (збільшення  $r_e$ ) також збільшує ширину зони впливу, нівелюючи центральну западину на графіку. Зміна часу зупинки променя в точках траєкторії розгортки дозволяє в широких межах регулювати розподіл густини потужності, практично не впливаючи на його ширину. Так, тепловкладення в центральній частині шва можна змінити в два рази змістивши точки з подвоєним часом зупинки променя від центральної до бокових частин зварювальної ванни як показано на рис. 4.

Де і як можна використовувати комп'ютерне управління розподілом густини потужності електронного променя? Інформація про форму джерела нагріву може знадобитися для проведення подальших розрахунків, пов'язаних з математичним моделюванням процесу ЕПЗ. Наприклад, управління формою і розмірами зони проплавлення завжди становило актуальну задачу з точки зору як теорії, так і практики ЕПЗ. Ряд існуючих моделей процесу ЕПЗ дозволяють не тільки оцінити глибину і ширину зварного шва, а й розраховують

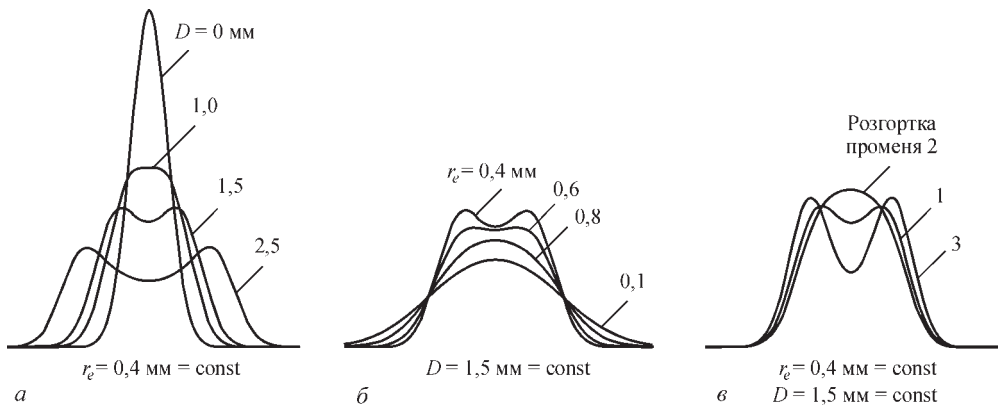


Рис. 3. Розподіл густини потужності електронного променя для кругової розгортки при зміні: амплітуди кругової розгортки (а); фокусування променя (б); відносного часу зупинки променя в точках траєкторії розгортки (в). Розгортки променя для розрахунку кривих на рис. 3, в показані на рис. 4

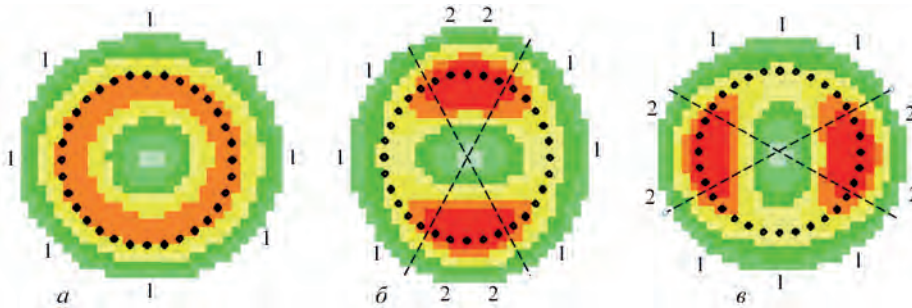


Рис. 4. Кругові розгортки електронного променя (32 точки) з різним відносним часом зупинки променя в точках траєкторії. Цифри на малюнку показують відносний час зупинки променя в точках: а – розгортка променя 1; б – 2; в – 3

форму зони проплавлення. У них при проведенні розрахунків не передбачається можливість регулювання розподілу енергії в джерелі нагріву, а основні висновки, як правило, стосуються ступеня відповідності розрахункових і експериментальних даних [9–11].

Програмування розподілу густини потужності променя дозволяє в широких межах змінювати форму джерела нагріву і, отже, є зручним інструментом для управління формою зони проплавлення. Практичний інтерес представляло ввести в математичну модель змінну величину (в нашому випадку розподіл густини потужності променя), змінюючи яку, можна регулювати форму зони проплавлення.

У даній роботі для передбачення форми зони проплавлення вибрали математичну модель, наведену в роботі [3]. У ній на підставі закону збереження енергії для елемента поверхні каналу проплавлення виводиться рівняння, що описує форму передньої стінки каналу в циліндричній системі координат для будь-якого розподілу густини потужності електронного променя:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\rho V_{\text{св}} G_{\text{тм}} \cos \varphi - q_{\text{т}}}{\eta_{\text{и}} q(r, \varphi)}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питома вага металу;  $V_{\text{св}}$  – швидкість зварювання;  $G_{\text{тм}}$  – зміст тепла в одиниці маси металу;  $q_{\text{т}}$  – густина потужності тепловідведення;  $\eta_{\text{и}}$  – ефективний ККД процесу;  $q(r, \varphi)$  – розподіл густини потужності променя.

Практичну перевірку способу управління формою зони проплавлення провели наступним чином. Комп'ютерну програму для розрахунку розподілу густини потужності електронного променя по формулі (1) доповнили рівнянням каналу проплавлення (2) і вивели зображення передньої стінки каналу на екран. Провели розрахунок форми зони проплавлення для ЕПЗ нержавіючої сталі з неповним проплавленням на режимі: прискорювальна напруга 60 В; струм променя 170 А; швидкість зварювання 10 м/с; дискретна кругова розгортка променя (кількість точок  $N = 32$ ) з амплітудою 1,5 мм, частотою 500 Гц і рівномірним тепловкладенням по траєкторії. З огляду на відносно невисоку теплопровідність матеріалу, було вирішено знехтувати втратами на тепловідведення від передньої стінки каналу проплавлення. Траєкторії розгортки, розподіл густини потужності променя, розрахункові та експериментальні форми зони проплавлення показано на рис. 5, 6.

На згаданому вище режимі провели зварювання дослідного зразка з нержавіючої сталі та виготовили макрошліф 1 (рис. 6, б). Розрахункові та експериментальні геометричні характеристики зони проплавлення відрізнялися незначно. Ширина шва становила близько 2,0 мм при глибині проплавлення 24 мм. Корінь шва був гострим. Відомо, що при такій формі зони проплавлення формування швів часто супроводжується утворенням кореневих дефектів у вигляді незаповнених металом порожнин.



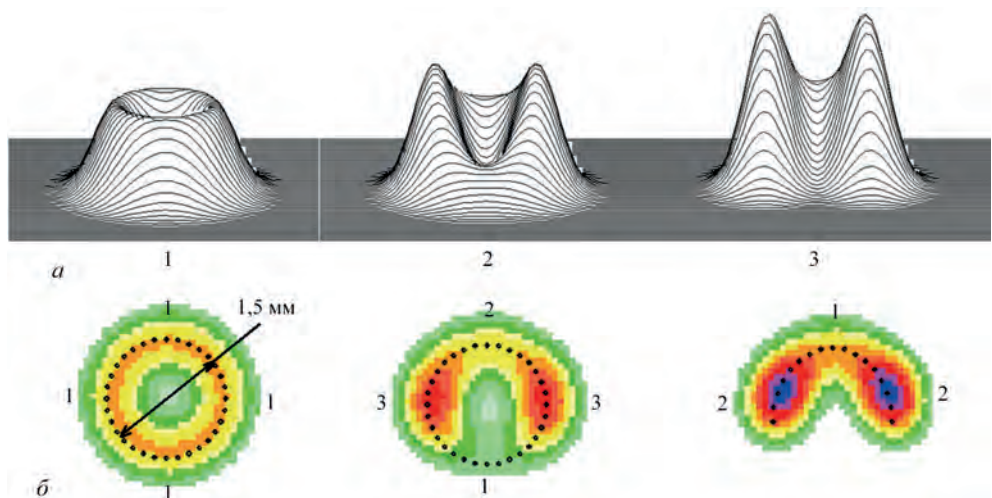


Рис. 5. Розподіл густини потужності електронного променя (а) і траєкторії розгортки (б) при ЕПЗ нержавіючої сталі (опис 1–3 див. у тексті)

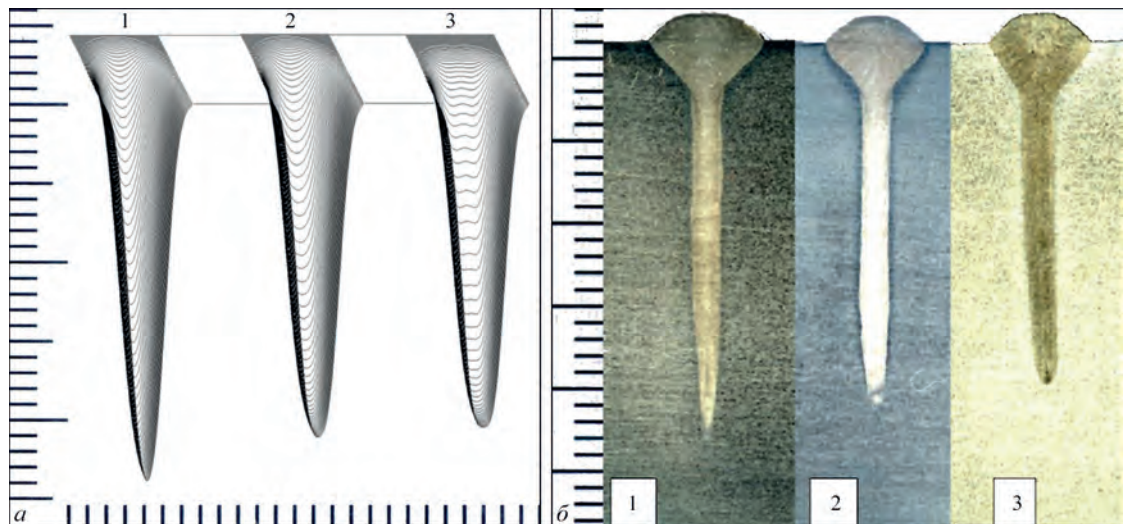


Рис. 6. Розрахункова форма передньої стінки каналу проплавлення (а) і поперечні шліфи (б) при ЕПЗ нержавіючої сталі (опис 1–3 див. у тексті)

Розподіл енергії в плямі нагріву змінили, збільшивши відносний час зупинки променя в точках кругової траєкторії розгортки, у бокових частин зварювальної ванни. Кількість точок, їх координати та інші параметри режиму ЕПЗ залишалися незмінними. При кожній зміні часу зупинки (як і будь-якого іншого параметра) комп'ютерна програма відображала відповідні зміни розподілу густини потужності променя і форми зони проплавлення. Після певного зміщення нагріву від осі шва до бокових частин зварювальної ванни ми збільшили радіус закруглення кореня шва орієнтовно в два рази. Глибина проплавлення при цьому зменшилася з 24 до 22 мм (див. рис. 6, а – 2). Параметри розгортки променя зберігали в ПЗП.

Аналогічно, за допомогою комп'ютерної програми, проектували траєкторію розгортки електронного променя у вигляді півкола. Тобто спочатку на рівній відстані один від одного розставили на екрані точки зупинки променя по обраній траєкторії сканування (в нашому випадку по дузі кола зі зворотно-поступальним рухом променя). Далі вве-

ли в програму параметри режиму ЕПЗ, характеристики зварюваного матеріалу і отримали на екрані комп'ютера зображення форми зони проплавлення. Так само як і в попередньому випадку, поступово збільшуючи відносний час зупинки променя в бокових частинах траєкторії розгортки, домагалися максимального збільшення радіусу заокруглення в корені шва (див. рис. 6, а, – 3). Режим ЕПЗ, включаючи спроектовані розгортки променя, застосували при ЕПЗ вакуумних камер з нержавіючої сталі. Ультразвуковий контроль зварних з'єднань показав відсутність несплавлення та кореневих дефектів по всій протяжності швів.

Комп'ютерне проектування розгорток електронного променя може бути корисним при ЕПЗ різномірних металів. Звичайним прийомом при зварюванні різномірних металів і сплавів є зміщення аксіально симетричної плями нагріву в сторону більш тугоплавкого металу. Величину цього зміщення або розраховують, або визначають експериментально. Таким чином, зменшують ймовірність утворення несплавлення в кореневій частині шва.

При ЕПЗ з програмуванням густини потужності променя необхідно збільшувати вкладення тепла в тугоплавкий метал, регулюючи параметри розгортки. Теплофізичні розрахунки ґрунтуються на тому, що співвідношення потужностей променя, що припадає на кромки, повинно бути пропорційно співвідношенню кількості тепла, необхідного для розплавлення одиниці об'єму кожного металу. Частину потужності електронного променя, що йде на нагрів металу 1, можна розрахувати за формулою:

$$Q_{Me1} = 0,24\eta_{\text{и}} I_{\text{л}} U_{\text{yc}} \iint_{Me1} q(x, y) dx dy, \quad (3)$$

де  $\eta_{\text{и}}$  – ефективний ККД процесу;  $I_{\text{л}}$  – струм променя;  $U_{\text{yc}}$  – прискорювальна напруга;  $Me1$  – область впливу променя, яка припадає на метал 1;  $q(x, y)$  – розподіл щільності потужності променя.

Аналогічно розраховується потужність променя і для металу 2. Таким чином, регулюючи розподіл густини потужності між різними областями впливу променя, ми можемо створити умови для формування симетричної форми зони проплавлення.

Реалізацію способу ЕПЗ різномісних сплавів з регулюванням тепловкладення провели при зварюванні зразків алюмінієвих сплавів 1201 (система легування Al–Cu) і 1460 (система легування Al–Cu–Li) товщиною 18 мм. Теплофізичний розрахунок показав, що для одночасного розплавлення рівних обсягів металу цих сплавів необхідно близько 55 % потужності електронного променя направляти на кромку сплаву 1201 і близько 45 % потужності на сплав 1460. Зварювання проводили з круговою розгорткою променя амплітудою 2,5 мм. Вибір параметрів розгортки променя для забезпечення необхідного зсуву потужності променя в бік сплаву 1201 проводили за допомогою комп'ютерної програми. Обчислення за формулою (3) не завдавали труднощів тому інформація щодо густини потужності електронного променя  $q(x, y)$  в програмі записується у вигляді двовимірного масиву, який не складно проінтегрувати (підсумувати) по будь-якій області.

Для зварювання використовували прискорювальну напругу 30 кВ та струм променя 350 мА на

швидкості 11 мм/с. Розподіл густини потужності променя та поперечний переріз зони проплавлення показано на рис. 7.

Зварний шов має практично паралельні бокові стінки, а рентгеноспектральний аналіз різних ділянок зварного з'єднання показав, що вміст легуючих елементів в металі шва коливається навколо середнього арифметичного від їх вмісту в сплавах, що зварюються. Це свідчить про те, що при оплавленні обидві кромки стику в рівній мірі брали участь у формуванні зварного шва.

## Висновки

1. Комп'ютерне проектування розгортки променя зі спільним використанням математичної моделі ЕПЗ дає можливість управляти формою парогозового каналу, а, отже, формою зони проплавлення.

2. Керуючи розподілом густини потужності променя, можна зварювати різномісні метали і сплави з формуванням симетричної зони проплавлення.

## Список літератури

1. Рыжков Ф.Н., Суворин В.Я. (1971) Технологические особенности сварки в вакууме колеблющимся поперек шва электронным пучком. *Автоматическая сварка*, **1**, 16–21.
2. Нестеренков В.М., Кравчук Л.А. (1981) Выбор параметров вращения пучка по окружности и их влияние на геометрию шва при электронно-лучевой сварке. *Там же*, **10**, 25–28.
3. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.М. и др. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Наукова думка.
4. Варушкин С.В., Беленький В.Я., Зырянов Н.А., Кылосов А.А. (2017) Осцилляция электронного луча как средство улучшения формирования корня сварного шва и облегчения контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке. *Машиностроение, материаловедение*, **19**, **2**, 151–59.
5. Ланкин Ю.Н., Бондарев А.А., Байштрук Е.Н., Скрыбинский В.В. (1985) Управление распределением плотности мощности электронного пучка по его сечению. *Автоматическая сварка*, **6**, 12–15.
6. Ланкин Ю.Н., Бондарев А.А., Довгодько Е.И., Дьяченко В.А. (2009) Система управления разверткой для электронно-лучевой сварки. *Там же*, **9**, 16–20.
7. Скрыбинский В.В. (1994) *Розробка технології електронно-променевого зварювання високомісних алюмінієвих сплавів 1570 і 1460 з регулюванням розподілу густини потужності променя*. дис. ... канд. техн. наук. АН України. Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона, Київ, 1994.
8. Ланкин Ю.Н., Соловьев В.Г., Семикин В.Ф. и др. (2017) Компьютерная система графического проектирования разверток и моделирование результирующего распределения плотности тока электронного луча. *Лучевые технологии в сварке и обработке материалов. Восьмая международная конференция. Сборник трудов, 11–15 сентября 2017 г., Одесса, Украина*, сс. 59–60.
9. Zhang Hong, Men Zhengxing, Li Jiukai et al. (2018) Numerical Simulation of the Electron Beam Welding and Post Welding Heat Treatment Coupling Process. *High Temp. Mater. Proc.*, **37**(9-10), 793–800.
10. Cerveraa M., Dialamia N., Wub B. et al. (2016) Numerical modeling of the electron beam welding and its experimental validation. *Finite Elements in Analysis and Design*, **11**, 121, 118–133.
11. Ластовиря В.Н. (2008) Принципы управления формой проплава в технологическом процессе электронно-лучевой сварки. *Машиностроение и инженерное образование*, **3**, 12–17.

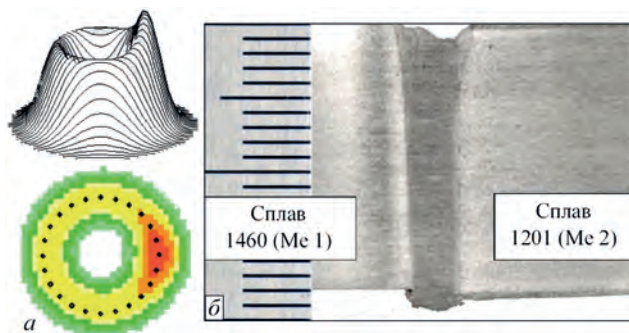


Рис. 7. Траекторія розгортки з розподілом густини потужності електронного променя (а) і поперечний переріз шва (б) при ЕПЗ сплавів 1460 і 1201



## References

1. Ryzhkov, F.N., Suvorin, V.Ya. (1971) Technological features of vacuum welding by electron beam oscillating across weld. *Avtomatch. Svarka*, **1**, 16-21 [in Russian].
2. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A. (1981) Selection of parameters of beam rotation around the circumference and their influence on weld geometry in electron beam welding. *Ibid.*, **10**, 25-28 [in Russian].
3. Nazarenko, O.K., Kaydalov, A.A., Kovbasenko, S.M. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Varushkin, S.V., Belenky, V.Ya., Zyryanov, N.A., Kylosov, A.A. (2017) Oscillation of electron beam as a means of improvement of weld root formation and facilitation of through penetration in electron beam welding. *Mashinostroenie, Materialovedenie*, **19**(2), 151-159 [in Russian].
5. Lankin, Yu.N., Bondarev, A.A., Bajshtruk, E.N., Skryabinsky, V.V. (1985) Control of density distribution of electron beam power on its section. *Avtomatch. Svarka*, **6**, 12-15 [in Russian].
6. Lankin, Yu.N., Bondarev, A.A., Dovgodko, E.I., Diachenko, V.A. (2009) Control system for beam scanning in electron beam welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 13-16.
7. Skryabinsky, V.V. (1994) *Development of technology of electron beam welding of high-strength aluminium alloys 1570 and 1460 with control of density distribution of beam power*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
8. Lankin, Yu.N., Soloviov, V.G., Semikhin, V.F. et al. (2017) Computer system of graphic design of scanning and modeling of final distribution of electron beam current density. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing (11-15 September, 2017, Odessa, Ukraine)*, 59-60.
9. Zhang Hong, Men Zhengxing, Li Jiukai et al. (2018) Numerical simulation of the electron beam welding and post welding heat treatment coupling process. *High Temp. Mater. Proc.*, **37**(9-10), 793-800.
10. Cerveraa, M., Dialamia, N., Wub, B. et al. (2016) Numerical modeling of the electron beam welding and its experimental validation. *Finite Elements in Analysis and Design*, **11**(121), 118-133.
11. Lastovirya, V.N. (2008) Principles of control of penetration shape in technological process of electron beam welding. *Mashinostroenie i Inzhenerne Obrazovanie*, **3**, 12-17 [in Russian].

## ELECTRON BEAM WELDING WITH PROGRAMMING OF BEAM POWER DENSITY DISTRIBUTION

V.V. Skryabinsky, V.M. Nesterenkov, M.O. Rusynyk

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

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

In the existing models of electron beam welding process, the shape and sizes of penetration zone are determined both by power parameters as well as shape of heating source. The effective control of the electron beam power density distribution and, therefore, of the shape of the heating source is possible by using a discrete scanning. A procedure and a computer program were developed to calculate the power density distribution at a discrete scanning of electron beam, taking into account the coordinates of scan points, relative time of its stop at the points and frequency of scanning. The joint application of a computer program for calculation of the power density distribution together with a mathematical model of electron beam welding allows obtaining a set shape and sizes of penetration zone. The results of calculation of welding modes and cross-sections of welds with parallel side walls and a large radius of rounding of the root during a partial penetration of specimens of stainless steel are given. The method of calculating the electron beam welding parameters and cross-section of the joint of dissimilar alloys are also given. 11 Ref., 7 Fig.

**Keywords:** electron beam welding, beam power density, computer-aided design of scanning, shape of penetration zone, welding of dissimilar alloys

Надійшла до редакції 07.11.2018



**YOUNG PROFESSIONALS  
INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES**

**YPIC and WRTYS 2020**

**19-22 MAY 2020    Kyiv, UKRAINE    ypic2020.com**



# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ПУТЕМ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФОКУСА\*

В.Ю. Хаскин<sup>2</sup>, В.Н. Коржик<sup>1,2</sup>, Ч. Донг<sup>2</sup>, Е.В. Илляшенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона, Гуанчжоу, КНР

Работа посвящена оценке влияния сканирования фокуса линзы вдоль оси лазерного излучения при лазерной и лазерно-дуговой сварке на сварочно-технологические свойства процессов и физико-механические характеристики металла швов соединений низколегированной и высоколегированной сталей. отмечено, что эффективность сварочных процессов при этом может быть повышена путем оптимизации частоты и амплитуды сканирования фокуса. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 9.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, гибридная лазер-MIG сварка, углеродистая сталь, нержавеющая сталь, технологические эксперименты, погонная энергия.

Одним из основных недостатков технологических процессов, использующих лазерное излучение, является их низкий эффективный КПД (как правило, до 60 %) [1]. Это связано как со сравнительно невысоким коэффициентом поглощения излучения металлами (около 10...40 %), так и с небольшой длиной его горловины каустики (примерно 0,2...2,0 мм) [2]. Поэтому для повышения эффективного КПД таких процессов как сварка и резка с использованием лазерного излучения, целесообразно повышать коэффициент поглощения за счет подогрева обрабатываемой поверхности и удлинения горловины каустики излучения. Эти эффекты могут быть достигнуты путем применения вертикального возвратно-поступательного сканирования фокуса с определенными амплитудами и частотами. Такой подход может быть положен в основу инновационных промышленных разработок, позволяющих значительно экономить лазерную энергию.

При изготовлении современных облегченных конструкций, применяемых в различных отраслях техники, часто применяют стали и сплавы, отличающиеся повышенной прочностью. Так, например, при изготовлении фрагментов корпусов крупных пассажирских лайнеров и грузовых судов применяют высокопрочные и коррозионностойкие стали, при изготовлении аналогичных корпусных конструкций судов малого водоизмещения могут применяться высокопрочные алюминиевые сплавы. При этом большую популярность приобрели облегченные сварные конструкции, свариваемые прорезными швами с использованием лазерного излучения [3].

Поскольку для формирования качественных сварных соединений необходимо добиваться об-

разования верхнего и нижнего усиления сварного шва, необходимо использовать соответствующий присадочный материал, чаще всего в виде сплошной проволоки. Как показали исследования, для снижения затрат лазерной энергии такую проволоку целесообразно подавать с одновременным ее плавлением электрической дугой [4]. При этом эффект воздействия дуги с плавящимся электродом не ограничивается внесением в сварочную ванну дополнительного тепла от расплавленной электродной проволоки. При взаимодействии с лазерным излучением (в первую очередь с ионизированным паром, возникающим над парогазовым каналом под действием излучения) электрическая дуга сужается, опускается в образовавшийся парогазовый канал и дополняет лазерную энергию в гибридном лазерно-дуговом процессе [5]. Происходит так называемая привязка дуги к фокусу лазерного излучения, что обеспечивает известные преимущества гибридной сварки.

Однако при использовании лазерной и лазерно-дуговой (лазер-MIG) сварки для получения стыковых, угловых и тавровых соединений может возникать ряд характерных дефектов:

- дефекты, связанные с формированием швов, которые в основном заключаются в образовании утяжек и подрезов по обе стороны валика усиления (рис. 1);
- образование внутренних пор (рис. 2);
- неоднородность легирования металла шва электродной или присадочной проволокой по глубине сварочной ванны (рис. 3);
- образование трещин как при самой лазерной или лазерно-дуговой сварке (рис. 4), так и в процессе дальнейшей эксплуатации сварных соединений, низ-

\*По материалам доклада, представленного на IX международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., г. Одесса.

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>

© В.Ю. Хаскин, В.Н. Коржик, Ч. Донг, Е.В. Илляшенко, 2020

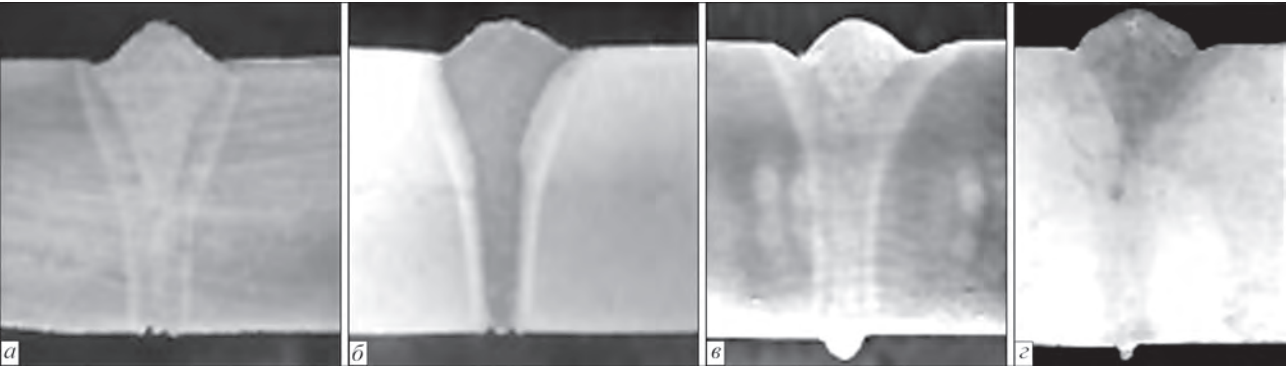


Рис. 1. Типичные дефекты формирования стыковых соединений высокопрочной стали DOMEX 390 XR ( $\delta = 10$  мм) при гибридной лазер-MIG сварке [6]: утягивание корня шва (*a, б*), подрезы в верхней части (*a–г*)

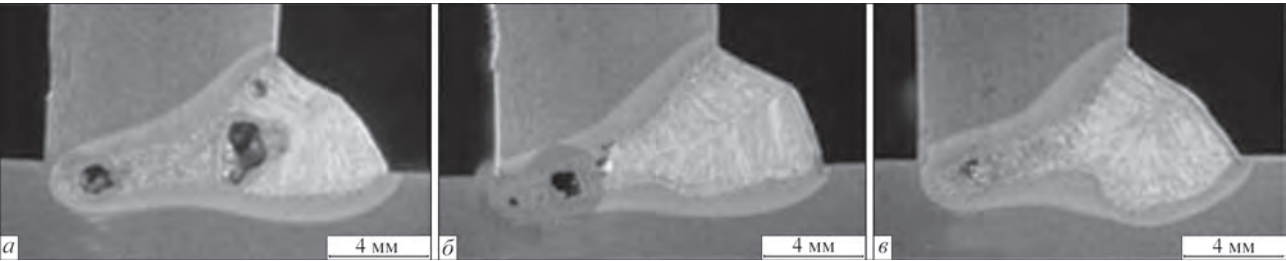


Рис. 2. Образование внутренних пор в тавровых соединениях при гибридной лазер-MIG сварке высокопрочной стали AN36 электродной проволокой ОК Aristorod 12.50 (диаметром 1,2 мм) с применением излучения волоконного лазера: *a, б* — мощность 8,0 кВт; *в* — 10,0 [7]

кие показатели испытаний на циклическую усталость (знакопеременные циклические нагрузки) (рис. 5).

Поэтому целью данной работы является создание принципиально нового универсального подхода к устранению характерных дефектов лазерной и лазерно-дуговой сварки, позволяющего одновременно с этим повысить производительность

процесса, снизить его погонную энергию и достичь экономии лазерной энергии.

В рамках существующего на сегодня подхода к осуществлению лазерной и лазерно-дуговой сварки устранить указанные выше дефекты можно различными способами, самый простой из которых заключается в подборе параметров режима. Однако в большинстве случаев при применении существующего в настоящее время серийно производимого оборудования для лазерной и лазерно-дуговой сварки (например, головок лазер-MIG производства фирм Fronius и Cloos [10]) решить задачу получения качественных сварных соединений сталей и сплавов затруднительно. К недостаткам реализуемой таким оборудованием технологической схемы процесса можно отнести отсутствие возможности управления гидродинамикой сварочной ванны, что способствовало бы повышению однородности химического состава сварного шва по высоте даже при значительных (свыше 8 мм) толщинах свариваемых кромок, устранению порооб-



Рис. 3. Отсутствие однородного распределения металла электродной проволоки по глубине шва при лазер-MIG сварке сталей больших (свыше 8 мм) толщин на примере сварки сталей SSAB Domex 420MC (стандарт EN 10149-2) [8]



Рис. 4. Типичная геометрия продольной трещины на поверхности стыкового соединения нержавеющей стали SS2333 ( $\delta = 10$  мм), выполненного лазерно-дуговой сваркой с электродной проволокой Avesta 253MA (диаметром 1,2 мм) [9]

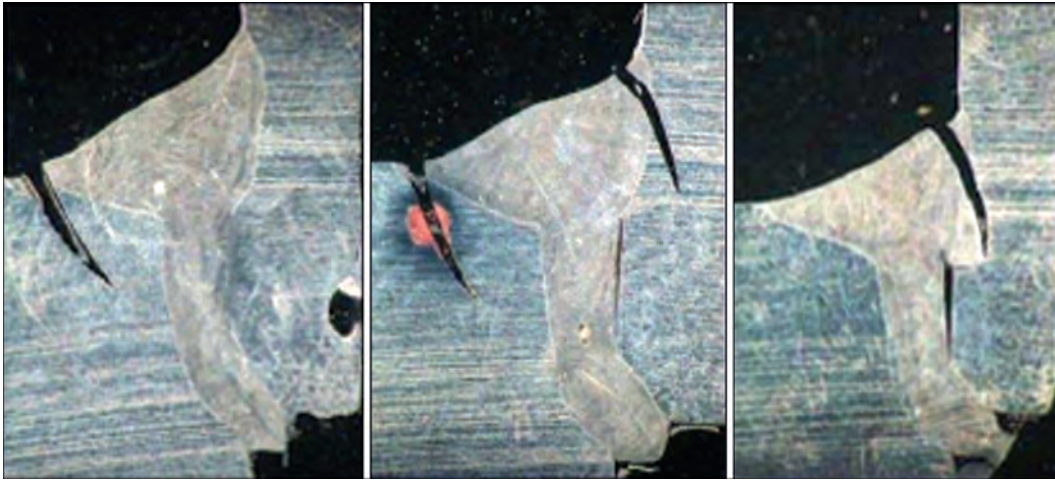


Рис. 5. Развитие продольных трещин и разрушение соединения в процессе испытаний на циклическую усталость. Поперечное сечение угловых соединений стали SS2333, сваренных лазерно-дуговым способом [9]

разования, повышению качества зоны сплавления, увеличению стойкости к циклическим знакопеременным напряжениям. Такое управление гидродинамикой ванны расплава стало бы возможным в случае введения в технологическую схему процесса дополнительного фактора, повышающего интенсивность течений расплава в вертикальном направлении [11]. Кроме того, это дало бы дополнительные возможности по управлению термическим циклом процесса гибридной лазерно-дуговой сварки.

Предлагаемый нами подход к получению эффективного метода управления гидродинамикой сварочной ванны и, следовательно, к повышению качества лазерно-дуговой сварки, заключается в модернизации существующей технологической схемы лазер-MIG сварки и создании нового сварочного инструмента, основанного на принципе возвратно-поступательных перемещений (колебаний) фокуса лазерного излучения вдоль оси луча в определенных интервалах частоты и амплитуды. Колебания фокуса, осуществляемые путем возвратно-поступательных перемещений фокусирующей линзы, могут также дополнительно согласовываться с заданным импульсным режимом модуляции лазерного излучения и/или горения дуги MIG в процессе гибридной лазер-MIG сварки.

Для реализации предложенного подхода к изменению технологической схемы процесса лазер-MIG сварки был создан соответствующий лабораторный стенд со сварочной головкой, позволяющей осуществлять возвратно-поступательное перемещение (сканирование) фокуса вдоль оси излучения с частотой до 100 Гц и амплитудой 0...10 мм. Принцип работы такой сварочной головки показан на рис. 6.

Лазерное излучение 1 фокусируется с помощью линзы 2 на линии стыка свариваемых деталей. Линза 2 установлена в корпусе 3 фокусирующей линзы, который, в свою очередь, расположен в оправке 4,

имеющей возможность возвратно-поступательного перемещения при помощи системы 5. Система 5 обеспечивает регулируемое сканирование вдоль оси излучения с частотой  $f = 0...100$  Гц и амплитудой  $A = \pm(0...5)$  мм. Это дает возможность изменять расположение фокальной плоскости линзы 2 относительно поверхности свариваемых деталей на величину  $\pm\Delta F$ , регламентируемую изменением амплитуды  $A$ . В состав системы 5 сканирования лазерного излучения входят соленоиды 6 и 7, с якорями 8 и 9 которых жестко связана оправка 4. Также к системе 5 относятся резиновые прокладки 10–13 для торможения якорей соленоидов и устройство управления 14, в состав которого входят задающий генератор импульсов и усилитель электрических сигналов. Для реализации дуговой составляющей процесса лазер-MIG сварки предусмотрена подача электродной проволоки при помощи мундштука 15, имеющего возможность настройки положения относительно фокуса излучения и угла подачи в пределах  $30...80^\circ$  относительно оси излучения ( $10...60^\circ$  относительно поверхности свариваемого стыка).

Отметим, что приведенная на рис. 6 конструкция сканирования линзы (фокуса излучения) рассмотрена в качестве примера как один из возможных вариантов. Возможны и другие варианты выполнения конструкции такого сканатора. Например, возвратно-поступательное движение линзы вдоль оси излучения может осуществляться с применением пьезодвигателей или кулачков-эксцентриков, приводимых во вращение двигателями постоянного тока.

Действие предложенного устройства происходит следующим образом (см. рис. 6). Лазерное излучение 1 с помощью линзы 2 фокусируется на линии стыка свариваемых деталей с нужным заглублением  $\Delta F$  фокальной плоскости линзы относительно поверхности свариваемых деталей. После подачи на соленоиды 6 и 7 электрического сигнала с помощью устройства управления 14



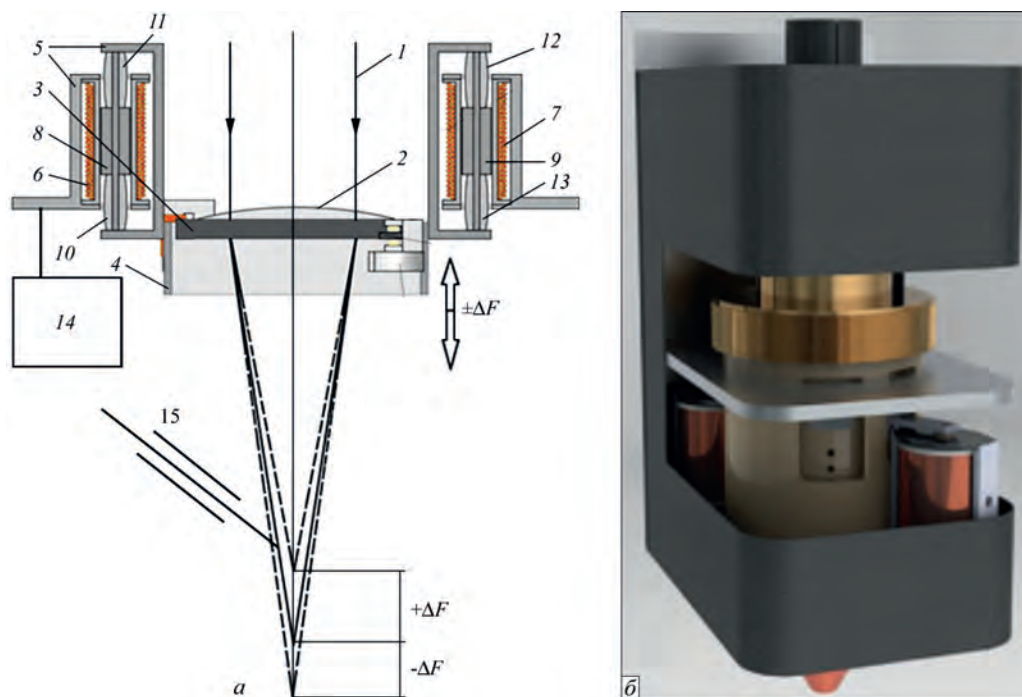


Рис. 6. Схема конструкции (а) и общий вид (б) головки для лазерной и гибридной лазер-MIG сварки с системой возвратно-поступательного перемещения (сканирования) фокуса ( $\pm\Delta F$ ) вдоль оси излучения (обозначения см. в тексте)

якоря 8 и 9 обеспечивают вертикальные возвратно-поступательные перемещения оправки 4 с корпусом 3 фокусирующей линзы 2 с частотой  $f = 0 \dots 100$  Гц и амплитудой  $A = \pm(0 \dots 5)$  мм, что обеспечивает соответствующие вертикальные колебания фокуса. При этом резиновые прокладки 10–13 смягчают и тормозят движение якорей.

После начала вертикальных колебаний фокуса лазерного излучения 1 при помощи механизма подачи проволоки приводится в движение электродная проволока, электрический контакт которой с положительным потенциалом дугового источника питания осуществляется при помощи мундштука 15. После касания электродной проволоки со свариваемой деталью, находящейся под отрицательным потенциалом источника, возникает электрическая дуга, которая «привязывается» к колеблющемуся фокусу и также получает возможность совершать колебательные движения. В случае сварки в нижнем положении — это вертикальные колебания. После этого начинается процесс гибридной лазер-MIG сварки, при которой за счет вертикального сканирования фокуса с определенными частотой и амплитудой достигается эффект увеличения глубины провара без увеличения мощности лазерного излучения, а также эффекты более равномерного легирования сварного шва по всей высоте металлом электродной проволоки и устранения образования внутренних пор за счет улучшения условий всплытия на поверхность сварочной ванны газовых пузырьков.

Таким образом, описанное техническое решение изготовления головки для лазер-MIG сварки со сканированием фокуса вдоль оси лазерного излучения обе-

спечивает новые технологические возможности. Более полно эти возможности могут раскрыться при повышении частоты сканирования фокуса, например, при сварке сталей — до оптимальных значений импульсного воздействия на сварочную ванну (как показано в работе [12]), либо до значений порядка 500 Гц. Такая частота воздействия на ванну расплава является пороговой, после которой металл ванны перестает реагировать на импульсные колебания. По нашему мнению, в перспективе достоинства предложенного оборудования и реализуемых при помощи него технологий гибридной сварки, по сравнению с обычной лазер-MIG сваркой, могут быть следующими:

- повышение глубины провара более чем в 2 раза без повышения мощности лазерного излучения;
- возможность сварки неплотно прилегающих кромок за счет колебаний дуги плавящегося электрода в процессе сварки;
- возможность повышения в 2 и более раз скорости сварки без повышения мощности излучения;
- возможность модификации термического цикла сварки, что способствует устранению образования нежелательных закалочных структур в швах;
- возможность более равномерного легирования сварного шва по всей высоте металлом электродной проволоки;
- снижение опасности возникновения внутренних пор в швах.

Проверку эффективности предлагаемого способа выполняли в ИЭС им. Е.О. Патона путем проведения необходимых экспериментов на созданном для этого роботизированном лабораторном стенде (рис. 7). Стенд состоял из антропоморфного робота-

манипулятора для перемещения интегрированной головки для лазер-MIG сварки, а также самой головки, механизма подачи электродной проволоки, систем электрического питания (включая источник питания MIG, обеспечивающий сварочный ток до 500 А), управления и подачи защитных газов. Интегрированная головка для гибридной лазер-MIG сварки состояла из системы фокусирования со сканированием фокуса вдоль оси лазерного излучения и MIG горелки. Система вертикального сканирования обеспечивала фокусировку излучения линзой с фокусным расстоянием  $f = 300$  мм и вертикальные возвратно-поступательные колебания линзы с частотой  $0...100$  Гц и амплитудой  $\pm(0...5)$  мм. Испытания данного стенда проводили с использованием излучения дискового лазера модели TruDisc 10002 (фирмы TRUMPF) мощностью излучения до 10,0 кВт. При этом выполняли провары и стыковые швы в нижнем положении с использованием образцов размером  $300 \times 100 \times \delta$  мм из сталей SM41B (09Mn2Si или 09Г2С) толщиной  $\delta = 4...18$  мм, АН36 (А36) толщиной  $\delta = 4...18$  мм, а также SUS304 (08X18H10) толщиной  $\delta = 8...10$  мм с применением сварочных проволок сплошного сечения 08Mn2Si (Св-08Г2С) и 01Cr18Ni10 (Св-01X18H10) диаметром 1,2 мм (табл. 1).

В ходе экспериментов сравнивали результаты формирования швов при стыковой лазерно-дуговой сварке пластин указанных сталей, проводимой в нижнем положении как с вертикальным колебанием фокуса, так и без него. При этом частота

колебаний фокуса составляла 100 Гц, а амплитуду выбирали близкой к половине толщины свариваемых кромок. Сканирование фокуса осуществляли так, чтобы его заглубление относительно верха свариваемых пластин в верхнем положении составляло 1...2 мм. По результатам экспериментов был построен график зависимости толщины кромок свариваемых листов (глубины провара  $h$ ) углеродистой стали от мощности лазерного излучения при сварке со скоростью порядка 80...90 м/ч, сварочном токе порядка 220...250 А и напряжении на дуге 22...24 В (рис. 8).

Испытания на статическую прочность проводили при помощи разрывной машины типа MTS Criterion 45.305 (с нагрузкой до 300 кН) на образцах типа XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996–66), которые вырезали из сваренных встык пластин стали SUS304 толщиной  $\delta = 10$  мм. Испытаниям на разрыв подвергли 3 группы образцов — сваренных способом лазер-MIG со сканированием и без сканирования фокуса, а также вырезанных из пластин основного металла. В каждую группу вошло по 3 образца, полученные результаты испытаний усреднили. Сварные образцы, в основном, рвались идентично — верхние примерно 3 мм по линии сплавления, далее через шов к противоположной зоне сплавления. Предел прочности образцов, сваренных без сканирования фокуса, составил 620...640 МПа, со сканированием — 630...650 МПа. Для основного металла предел прочности составил 640...660 МПа. Таким образом, прочность швов, полученных сваркой без сканирования, составила порядка 98...99 % относительно основного металла, а со сканированием — 99...100 %.

Для проведения металлографических исследований по стандартным методикам были подготовлены образцы поперечных сечений полученных швов, которые изучались при помощи оптического микроскопа «Neophot-32» при увеличениях до 1500 крат. В результате было установлено, что введение сканирования фокуса вдоль оси излучения улучшает формирование швов и повышает равномерность их легирования металлом электродной проволоки по высоте (рис. 9). Кроме того, уменьшается размер зерен дендритов литой зоны швов по сравнению с обычной гибридной лазер-MIG сваркой.

Можно предположить, что перегрев и увеличение объема переплавленного металла, а также повышение глубины провара в случае введения колебаний фокуса вдоль оси излучения при фиксированной мощности излучения приводят к улучшению поглощения лазерного излучения и увеличению эффективного КПД сварки. Погонная энергия лазерно-дуговой сварки при этом снижается примерно на 15...20 % (табл. 2). Проведенные эксперименты показали, что



Рис. 7. Внешний вид роботизированного лабораторного стенда для лазерно-дуговой сварки с колебаниями фокуса лазерного излучения

Таблица 1. Химический состав (мас. %) материалов свариваемых образцов и сварочных проволок

| Материал             | C           | Si          | Mn        | Cr          | Ni         | Ti   | Cu   | S     | P     | Прочие  |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|------------|------|------|-------|-------|---------|
| 09Mn2Si              | ≤0,12       | 0,5...0,8   | 1,3...1,7 | ≤0,3        | ≤0,3       | –    | ≤0,3 | ≤0,04 | 0,035 | N≤0,008 |
| АН36                 | ≤0,18       | ≤0,5        | 0,9...1,6 | –           | –          | –    | –    | 0,035 | 0,035 | –       |
| SUS304               | ≤0,8        | ≤0,8        | ≤0,2      | 17...19     | 9...11     | ≤0,5 | ≤0,3 | 0,02  | 0,035 | –       |
| Проволока 08Mn2Si    | 0,05...0,11 | 0,70...0,95 | 1,8...2,1 | 0,20        | 0,25       | –    | –    | 0,025 | 0,030 | –       |
| Проволока 01Cr18Ni10 | 0,02        | 0,4         | 1,0...2,0 | 17,0...19,0 | 9,5...11,0 | –    | –    | 0,02  | 0,02  | –       |

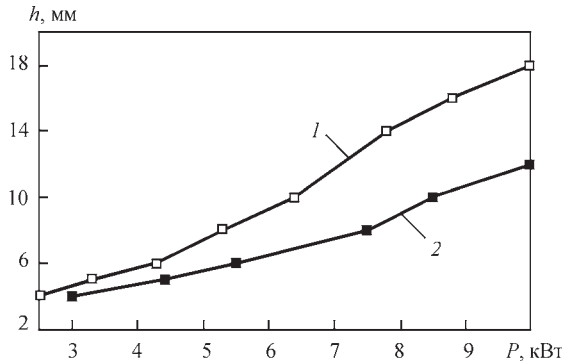


Рис. 8. Зависимость глубины провара  $h$  от мощности излучения  $P$  при лазер-MIG сварке со сканированием фокуса ( $f = 100$  Гц,  $A = 3$  мм) вдоль оси излучения (кривая 1) и без сканирования (кривая 2)

применение вертикальных колебаний фокуса позволяет увеличивать глубину провара на 20...50 % без увеличения мощности излучения. Эффект увеличения глубины провара за счет сканирования фокуса излучения становится заметен на толщинах свыше 4...5 мм и сказывается тем больше, чем толще свариваемые кромки. Это делает возможным лазерную и гибридную сварку кромок металлических деталей значительных (до 10 и до 18 мм, соответственно) толщин с минимальными затратами мощности лазерного излучения (например, до 6,0 кВт).

Выводы

1. Новый подход к лазерной и лазерно-дуговой сварке, заключающийся в дополнении существующих технологических схем процессов сканированием фокуса вдоль оси лазерного излучения с определенными частотой и амплитудой, позволяет повышать интенсивность течений расплава в сварочной ванне (в том числе в вертикальном направлении) и дополнительно модифицировать термический цикл сварки, что повышает однородность распределения легирующих добавок по высоте шва, минимизирует опасность образования внутренних пор и одновременно с этим на 20...50 % повышает производительность процесса и снижает его погонную энергию не менее, чем на 15...20 %.

2. Повышение производительности лазерной и лазерно-дуговой сварки может заключаться либо в увеличении скорости процесса, либо в возможности сварки кромок большей толщины без повышения погонной энергии. При этом эффект увеличения глубины провара за счет сканирования фокуса излучения становится заметен на толщинах свыше 4...5 мм и сказывается тем больше, чем толще свариваемые кромки.

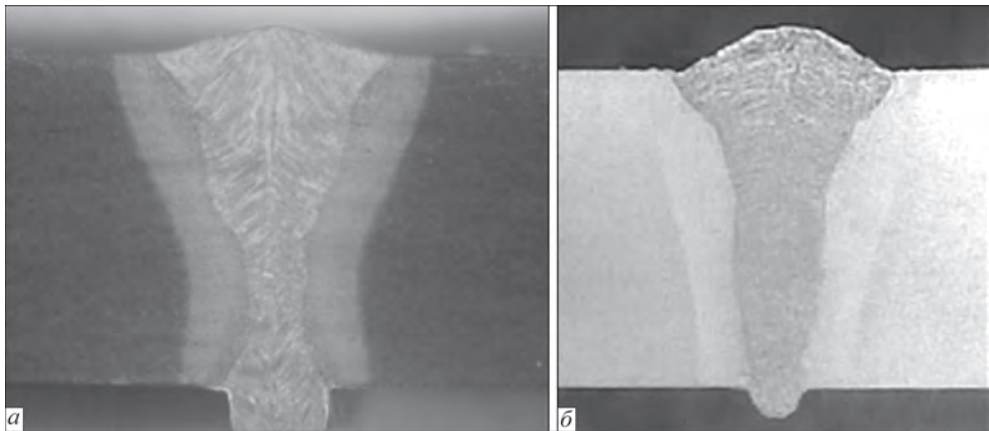


Рис. 9. Качественные соединения высокопрочной стали толщиной 10 мм (а) и коррозионностойкой стали SUS304 толщиной 8 мм (б), выполненные с использованием сканирования фокуса вдоль оси излучения при гибридной лазер-MIG сварке

Таблица 2. Изменение погонной энергии лазер-MIG сварки в зависимости от толщины свариваемых кромок

| Погонная энергия $E$ , кДж/м | Толщина свариваемых кромок $\delta$ , мм |           |           |           |           |           |           |           |           |
|------------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                              | 4                                        | 5         | 6         | 8         | 10        | 12        | 14        | 16        | 18        |
| Без сканирования             | 320...330                                | 390...400 | 440...450 | 520...540 | 570...590 | 640...650 | –         | –         | –         |
| Со сканированием             | 300...320                                | 340...360 | 390...410 | 430...450 | 480...500 | 510...530 | 550...560 | 590...610 | 650...670 |



3. Механические испытания показали, что предел прочности соединений коррозионнотстойкой стали, получаемых методом лазерно-дуговой сварки со сканированием фокуса вдоль оси излучения, примерно соответствует прочности основного металла. Металлографические исследования показали улучшение формирования швов, повышение равномерности их легирования металлом электродной проволоки по высоте, уменьшение размера зерен дендритов литой зоны швов по сравнению с обычной гибридной лазер-MIG сваркой.

4. Для повышения эффективности предложенного подхода к лазерной и лазерно-дуговой сварке целесообразно оптимизировать частоту и амплитуду сканирования фокуса вдоль оси лазерного излучения.

*Примечание. Работа выполнялась в рамках проекта №2018GDASX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Научно-исследовательские разработки лазерных и плазменных технологий гибридной сварки и резки)», Guangzhou, China.*

#### Список литературы/References

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. (1988) *Лазерная техника и технология*. Григорьянц А.Г. (ред.). В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов. Учеб. пособие для вузов. Москва, Высшая школа.
2. Введеннов А.А., Гладуш Г.Г., Явочкин А.Н. (1983) О механизме поддержания лазерным лучом глубокого парового канала в жидкости. *Прикладная механика и техн. физика*, 1, 48–51.
3. Vvedenov, A.A., Gladush, G.G., Yavokhin, A.N. (1983) On mechanism of maintain of deep key hole in liquid using laser beam. *PMTF*, 1 48–41 [in Russian].
4. Oikawa M., Minamida K., Yoshida Y., Suzuki N. (2004) Development of All Laser Welded Honeycomb Structure for Civil Transports. *Nippon Steel Technical Report*, 89, January, 96–101.
5. Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu. (2002) Tendencies in development of laser-arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, 6, 25–28.
6. Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Garashchuk V.P. et al. (2002) Hybrid CO<sub>2</sub>-laser and CO<sub>2</sub> consumable-arc welding. *Ibid.*, 10, 35–37.
7. Engström, H., Nilsson, K., Flinkfeldt, J. et al. (2001) Laser hybrid welding of high strength steels. In: *ICALEO 2001, 20th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (October 15–18, 2001, Jacksonville, Florida, USA)*. Ed. Xiangli Chen: Laser Institute of America, 2001, 125–134.
8. Unt A., Poutiainen I., Salminen A. (2015) Influence of Filler Wire Feed Rate in Laser-Arc Hybrid Welding of T-butt Joint in Shipbuilding Steel with different optical setups. *Physics Procedia*, 78, 45–52.
9. Frostevarga J., Kaplan A. F.H. (2014) Undercuts in Laser Arc Hybrid Welding. *Ibid.*, 56, 663–672.
10. Alam Md. M. (2009) *A study of the fatigue behaviour of laser and hybrid laser welds* (Licentiate thesis). Luleå, Luleå tekniska universitet, 133.
11. Krivtsun I.V., Khaskin V.Yu., Korzhik V.N., Ziyi Luo (2015) Industrial application of hybrid laser-arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, 7, 41–46.
12. Голубев В.С. (2009) Гидродинамические явления при лазерной сварке с каналированным проникновением излучения. *Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе*. Панченко В.Я. (ред.). Москва, Интерконтакт Наука, сс. 35–63.
13. Golubev, V.S. (2009) Hydrodynamic phenomena in laser welding with channeling penetration of radiation. *Deep channeling and filamentation of power laser radiation in substance*. Ed. by V.Ya. Panchenko. Moscow, Intercontact Nauka, 35–63 [in Russian].
14. Khaskin V.Yu., Pavlovsky S.Yu., Garashchuk V.P. et al. (2001) Peculiarities of welding thin-sheet low-carbon steels using a pulsed-periodic radiation of CO<sub>2</sub>-laser. *The Paton Welding J.*, 2, 42–46.

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ШЛЯХОМ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ФОКУСА

В.Ю. Хаскін<sup>2</sup>, В.М. Коржик<sup>1,2</sup>, Ч. Донг<sup>2</sup>, Є.В. Ілляшенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона, Гуанчжоу, КНР

Робота присвячена оцінці впливу сканування фокуса лінзи уздовж осі лазерного випромінювання при лазерному та лазерно-дуговому зварюванні на зварювально-технологічні властивості процесів та фізико-механічні характеристики металу швів з'єднань низьколегованої та високолегованої сталі. Відзначено, що ефективність зварювальних процесів при цьому може бути підвищена шляхом оптимізації частоти та амплітуди сканування фокуса. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 9.

*Ключові слова:* лазерне зварювання, гібридне лазер-MIG зварювання, вуглецева сталь, нержавіюча сталь, технологічні експерименти, погонна енергія.

### IMPROVEMENT OF THE EFFECTIVENESS OF LASER WELDING PROCESSES BY RECIPROCATING MOVEMENT OF THE FOCUS

V.Yu. Khaskin<sup>2</sup>, V.M. Korzhyk<sup>1,2</sup>, Ch. Dong<sup>2</sup>, E.V. Ilyashenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding). 363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

The work is devoted to evaluation of the impact of lens focus scanning along the laser radiation axis in laser and laser-arc welding on welding-technological properties of the processes and physico-mechanical characteristics of weld metal in joints of low-alloyed and high-alloyed steels. It is noted that the effectiveness of welding processes here can be increased by optimization of focus frequency and amplitude. 12 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

*Keywords:* laser welding, hybrid laser-MIG welding, carbon steel, stainless steel, technological experiment, rate of energy input

Надійшла до редакції 21.10.2019

## В.Д. ШЕЛЯГІНУ – 80



23 січня 2020 р. виповнилось 80 років Шелягіну Володимир Дмитровичу – вченому в галузі розробки зварювальних джерел живлення та технологій лазерної обробки матеріалів. Народився Володимир Дмитрович 23 січня 1940 р. в м. Одеса. У 1962 р. після закінчення електроенергетичного

факультету Київського політехнічного інституту він прийшов до Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, де працює по теперішній час.

Протягом своєї наукової діяльності В.Д. Шелягіним виконано багато теоретичних і експериментальних досліджень в галузі створення та вдосконалення джерел живлення різних технологічних процесів наземного та космічного призначення: електронно-променевого зварювання, лазерного зварювання, електронно-променевого наплення та переплаву, радіочастотного зварювання, підводного зварювання, технологічних робіт і фізичних експериментів у космосі. Фундаментальні дослідження та винахідницька діяльність В.Д. Шелягіна сприяли створенню технологічного апарату для зварювання в космосі «Вулкан», який в жовтні 1969 р. був вперше в світі використаний в умовах космосу на орбітальній станції «Союз-6» В. Кубасовим і Г. Шоніним. Подальші розробки В.Д. Шелягіна для серії апаратів типу «Испаритель» та «Испаритель-М», на замовлення НВО «Енергія», мали значний вплив на успішне проведення унікальних наукових експериментів на космічних орбітальних станціях «Союз-6», «Союз-7» та космічних орбітальних станціях «МИР» у 1979–1989 рр. Роботи В.Д. Шелягіна сприяли створенню високовольтного прискорювача електронів апарату «УРИ», всебічні дослідження і випробування якого в наземних умовах дозволили космонавту С. Савицькій вперше в світі провести у 1984 р. на ОС «Салют-7» важливі експерименти з елек-

тронно-променевого різання, зварювання і наплення у відкритому космосі.

Значного успіху та визнання набула робота В.Д. Шелягіна у фізичних експериментах у космосі, які виконувались в рамках вітчизняних та міжнародних проектів «Зарница», «АРАКС», «АПЕКС».

Під керівництвом і за безпосередньої участі В.Д. Шелягіна створені та введені в експлуатацію на підприємствах України, Росії, США та Канади розробки у різноманітних галузях промисловості: системи живлення для електронно-променевого наплення; радіочастотні джерела живлення для виготовлення повздовжньошовних труб; системи живлення та збудження активного середовища  $\text{CO}_2$ -лазерів різної потужності; обладнання та технології лазерного зварювання та поверхневої обробки.

За роки наукової діяльності В.Д. Шелягін підготував більш ніж 200 наукових праць, серед них понад 30 патентів і авторських свідоцтв на винаходи.

У 1982 р. за розробку серії джерел живлення наукових та технологічних апаратів для зварювання та наукових досліджень в космосі він стає лауреатом Державної премії УРСР. У 2004 р. В.Д. Шелягіну присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки України».

З 1997 р. В.Д. Шелягін керує науковим відділом «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» ІЕЗ ім. Є.О. Патона, в якому виконуються дослідження, спрямовані на розробку сучасних технологій і обладнання для лазерного та гібридних способів зварювання, напильовання, різання, термообробки матеріалів.

З 2016 р. В.Д. Шелягін викладає студентам Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» курс «Джерела живлення технологічних лазерів».

Щиро вітаємо ювіляра, бажаємо міцного здоров'я, добра, творчої наснаги та успіхів у всіх напрямках його різноманітної діяльності на благо України.

Інститут електрозварювання  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона  
Редколегія та редакція журналу

## КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ, СЕМІНАРІВ та ВИСТАВОК у 2020 р.

| Дата                | Місце проведення                   | Назва                                                                                                                                                |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 26–28 лютого        | Сан-Антоніо, США                   | Щорічна конференція АЗТ зі зварювання опором                                                                                                         |
| 17–19 березня       | Тампере, Фінляндія                 | Виставка зварювання, різання і з'єднання «Nordic Welding Expo-2020»                                                                                  |
| 23–28 березня       | Тбілісі, Грузія                    | 20-й Міжнародний науково-технічний семінар «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості та на транспорті»**                               |
| 24–26 березня       | Ташкент, Узбекистан                | Міжнародна виставка «UzMetalMachExpo-2020»                                                                                                           |
| 24–27 березня       | Новосибірськ, РФ                   | Виставка обладнання для металообробки і зварювання «Machex Siberia 2020»                                                                             |
| 30 березня–3 квітня | Дюссельдорф, Німеччина             | Міжнародна виставка обладнання для виробництва та обробки дроту, кабелю та металовиробів**                                                           |
| 31 березня–3 квітня | Київ, Україна                      | Київська технічна ярмарка**                                                                                                                          |
| 7–9 квітня          | Львів, Україна                     | X Спеціалізована виставка «Метал. Обладнання. Інструмент»**                                                                                          |
| 7–10 квітня         | Мінськ, Білорусь                   | Міжнародна спеціалізована виставка «Зварювання та різання 2020»**                                                                                    |
| 8–11 квітня         | Осака, Японія                      | Міжнародна виставка технологій зварювання                                                                                                            |
| 28–30 квітня        | Ессен, Німеччина                   | Ярмарка професійних технологій різання «Cutting World 2020»**                                                                                        |
| Травень             | Київ, Україна                      | Конференція-виставка «Неруйнівний контроль-2020»**                                                                                                   |
| Травень             | с. Княжичі, Київська обл., Україна | Автоматизація зварювального виробництва**                                                                                                            |
| 11–13 травня        | Монреаль, Канада                   | Міжнародна виставка металообробки та зварювання «MMTS-2020»                                                                                          |
| 19–21 травня        | Запоріжжя, Україна                 | Міжнародна виставка «Запорізький Промисловий Форум – 2020»**                                                                                         |
| 19–22 травня        | Тбілісі, Грузія                    | IV Міжнародна конференція «Сучасні технології та методи в матеріалознавстві неорганічних матеріалів»**                                               |
| 19–22 травня        | Київ, Україна                      | Міжнародна конференція молодих професіоналів «YPIC and WRTS 2020»*                                                                                   |
| 27–29 травня        | Севілья, Іспанія                   | 4-й Міжнародний конгрес «Технології зварювання та з'єднань» (під патронатом МІЗ)                                                                     |
| Червень             | с. Княжичі, Київська обл., Україна | Роботизація зварювального виробництва**                                                                                                              |
| 1–3 червня          | Київ, Україна                      | Міжнародна конференція «Титан 2020: Виробництво та застосування»*                                                                                    |
| 2–5 червня          | Шеньжень, Китай                    | 25-а Міжнародна Пекінська виставка зварювання та різання                                                                                             |
| 10–12 червня        | Відень, Австрія                    | Міжнародна конференція та виставка термічних покриттів (під патронатом МІЗ)                                                                          |
| 19–24 червня        | Сінгапур                           | 73-я асамблея Міжнародного інституту зварювання та наукова конференція**                                                                             |
| 26–28 серпня        | Джакарта, Індонезія                | Міжнародна виставка технологій зварювання і зварювального устаткування «InWelding 2020»                                                              |
| 26–28 серпня        | Нью-Делі, Індія                    | Міжнародна виставка та зварювального устаткування «CWE 2020»                                                                                         |
| 2–4 вересня         | Мішкольц, Угорщина                 | 3-я Міжнародна конференція «Інженерія в автомобілебудуванні» (під патронатом МІЗ)                                                                    |
| 6–11 вересня        | Аріель, Ізраїль                    | Міжнародна конференція «Технології матеріалів та моделювання»**                                                                                      |
| 14–18 вересня       | Одеса, Україна                     | X Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»*                                  |
| 14–18 вересня       | Одеса, Україна                     | XXIII Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»*                                                                  |
| 16–17 вересня       | Хьюстон, США                       | Конференція АЗТ «Зварювання алюмінію»                                                                                                                |
| 5–9 жовтня          | Брно, Чехія                        | Міжнародна виставка зварювальної техніки «Welding Brno 2020»                                                                                         |
| 6–8 жовтня          | Амстердам, Нідерланди              | Виставка обладнання для зварювання та різання металів та пластмас                                                                                    |
| 13–15 жовтня        | Сосновіце, Польща                  | VII Міжнародна зварювальна ярмарка ExpoWELDING та 62-а Міжнародна зварювальна конференція з проведенням Конгресу Міжнародного інституту зварювання** |
| 13–16 жовтня        | Москва, РФ                         | 20-а Міжнародна виставка «Россварка/Weldex»                                                                                                          |
| 11–13 листопада     | Санкт-Петербург, РФ                | Міжнародна виставка «Зварювання / Welding 2020»                                                                                                      |
| 12–13 листопада     | Тімішоара, Румунія                 | Міжнародна конференція «Інноваційні технології для з'єднання сучасних матеріалів»**                                                                  |
| 23–25 листопада     | Мумбаї, Індія                      | Міжнародна виставка «India Essen Welding and Cutting 2020»                                                                                           |
| 24–27 листопада     | Київ, Україна                      | Міжнародний промисловий форум**                                                                                                                      |

\* Захід проводить ІЕЗ ім. Є.О. Патона

\*\* У заході приймають участь співробітники ІЕЗ ім. Є.О. Патона



## МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

В 2019 г. по инициативе Китайско-Украинского института сварки им. Е.О. Патона (КУИС), Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (ИЭС) и Гуандунского союза по международному научно-техническому сотрудничеству (г. Гуанжоу, КНР), установлены деловые связи и подписан договор о сотрудничестве ИЭС им. Е. О. Патона с китайской компанией Liaoning New Huayang Weiye Equipment & Manufacturing Co., Ltd (New Huayang), г. Телинь, провинция Ляонин, КНР. В июле и ноябре-декабре 2019 г. состоялись командировки специалиста ИЭС в Китай с целью обсуждения ряда задач по технологии сварки взрывом, которые подлежат совместному решению.

Компания New Huayang расположена в высокотехнологичной промышленной зоне города Телинь, реорганизованной из Шеньянского завода титанового оборудования, основанного в 1988 г. На территории КНР компания является одним из пионеров в области сварки взрывом с более чем 30-летним опытом работы.

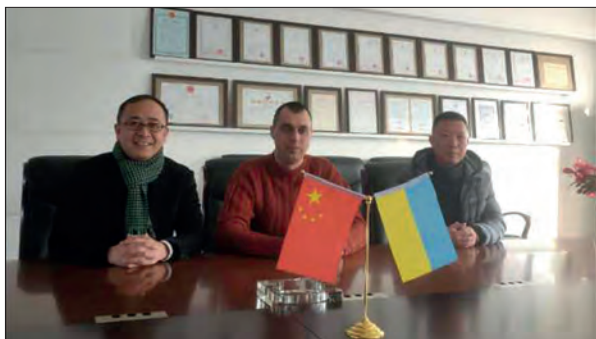
Компания имеет два производственных цеха – восточный и западный, а также собственный склад взрывчатых материалов и открытую площадку для проведения работ по сварке взрывом с разрешенной массой подрыва 500 кг взрывчатого вещества в

эквиваленте TNT. В настоящее время производятся биметаллы сталь+нержавеющая сталь, сталь+титан, сталь+медные сплавы. Компания одна из немногих в мире изготавливает биметаллический лист площадью около 20 м<sup>2</sup>. В ближайших планах – увеличение площади листа до 33 м<sup>2</sup>. Такой результат позволит приблизиться к достижениям ведущих мировых производителей в области сварки. Особенностью компании New Huayang является то, что производимый биметалл идет не только для продажи заказчикам, но и используется в национальном производстве химической и нефтяной аппаратуры.

По результатам первого визита в июле 2019 г. специалиста ИЭС в компанию New Huayang, был подписан контракт об оказании научно-консультационных услуг по поддержке технологии сварки взрывом.

В ноябре – декабре 2019 г. в рамках контракта специалистом ИЭС были осуществлены исследования детонационных свойств взрывчатых веществ, которые использует компания при производстве работ по сварке взрывом.

До недавних пор компания New Huayang производила сварку взрывом на взрывчатом веществе одного состава, что не позволяло осуществлять сварку биметаллов широкой номенклатуры.



Во время переговоров слева направо: генеральный директор компании New Huayang Гао Фен, директор научно-инженерного центра «Материалообработка взрывом» ИЭС им. Е.О. Патона П.С. Шленский, руководитель по производству сварки взрывом компании New Huayang Ли Цзинвэй



На производственной площадке



Дефекты при производстве биметалла титан-сталь



Внешний вид биметалла после восстановления

В зв'язі з цим були проведені спеціальні експерименти по замерах швидкості детонації смесей даного вибухового речовини з різними процентним вмістом солі (NaCl) і піску, на різних висотах зарядів.

В результаті проведених робіт компанія New HuaYang отримала можливість регулювати (управляти) швидкістю детонації в заданому шарі вибухового речовини при проведенні робіт по сварці вибухом, що, в свою чергу, підвищило якість готової продукції.

Оскільки при виробництві біметала сваркою вибухом можливо виникнення таких де-

фектів як порушення цілості плакуючого шару, додатково були проведені постановочні експерименти для дослідження можливості відновлення (ремонта) біметала титан–стал.

Проведений експеримент показав можливість відновлення дефектного біметалічного листа і використання його в подальшій роботі, що, в свою чергу, дозволить підвищити економічну ефективність виробництва.

Були обговорені напрямки подальшої спільної роботи, що передбачає укладення нового договору.

П.С. Шленський, Гао Фен



## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО ЖУРНАЛУ «АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ»

Журнал «Автоматичне зварювання» є науковим фаховим виданням України у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання і споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металоконструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для продовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах.

До публікації приймаються оригінальні, раніше неопубліковані статті, що містять результати фундаментальних теоретичних розробок та найбільш значущих прикладних досліджень. Статті подаються українською або англійською мовами у форматі \*.doc.

### До рукописів додаються:

- супроводжувальний лист, підписаний керівником підрозділу чи установи, де виконувалася робота;
- ліцензійний договір на використання рукопису: передача «Видавцю» авторського права на опублікування статті (форма ліцензійного договору за посиланням <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/license>);
- повна поштова адреса одного з авторів, контактний телефон та адреса електронної пошти;
- копія документа про передплату авторським колективом щонайменше одного екземпляра відповідного номера журналів «Автоматичне зварювання» та «The Paton Welding Journal» (рахунки на передплату можна отримати за посиланням <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>, або у редакції).

Рукопис та документи надсилаються авторами: з України – поштою (2 екз.) та електронною пош-

тою; з закордону – електронною поштою на адресу: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua).

### Видавниче оформлення

Структура статті має складатися з таких блоків:

1. Блок українською (англійською) мовою, якщо стаття написана українською (англійською) мовою:

- шифр УДК;
- назва статті;
- прізвище(а), ім'я, по-батькові та посилання на профілі в ORCID або Scopus Author ID кожного із авторів (кількість авторів не більш 5-ти);
- повні назва та поштова адреса організацій, де працюють автори;
- електронні адреси авторів;
- анотація та ключові слова (1500...1800 знаків).

Анотація повинна бути змістовною, не повторювати назву, не містити загальних фраз, не дублювати розділ «Висновки», а відображати короткий зміст статті (мета, задачі, методи дослідження, результати).

Стаття має бути структурована за такими розділами: Вступ, де окреслено постановку проблеми, актуальність обраної теми, аналіз останніх досліджень та публікацій, мету й завдання роботи; Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів; Висновки, де підведено підсумки роботи та перспективи подальших досліджень у цьому напрямі (наприкінці основного тексту можливо вказати джерело фінансування роботи); Список використаної літератури.

Список пронумерованих літературних джерел кількістю до 10-15 найменувань, на які посилається автор (самопосилань до 30 % загальної кількості; посилань на джерела до 2000 р. не більше 30 % загальної кількості; бажано не використовувати джерела, які малодоступні для широкої наукової аудиторії). 2. Блок латиницею (аналогічно Блоку 1):

- назва статті англійською мовою;





- ініціали та прізвище(а) автора(ів), звертаючи особливу увагу на правильність написання прізвищ та ініціалів англійською мовою;
- офіційна назва установи, повна поштова адреса англійською мовою без скорочень;
- електронні адреси авторів;
- анотація та ключові слова (1500...1800 знаків) англійською мовою;
- список літературних джерел: латиницею прізвища авторів; назви журналів в літературних джерелах транслітерацією кирилиці; назви статей англійською мовою. Після кожного такого посилання в дужках необхідно вказати мову оригіналу статті – [in Ukrainian], [in Russian] або [in English].

Назви джерел представляються без будь-яких скорочень.

Транслітерацію українського алфавіту латиницею виконують згідно з постановою Кабміну № 55 від 27.01.2010 р. (<http://zakon.rada.gov.ua/>)

Текст статті подається обсягом не більше 15–20 сторінок (міжрядковий інтервал – 2,0).

Опис макета статті: текстовий редактор Microsoft Word 97–2003, редактор формул MathType 6.9 (не вище). Формат паперу A4.

Стиль основного тексту: міжрядковий інтервал – 2,0; шрифт – Times New Roman 12 pt; вирівнювання по ширині; автоматична розстановка перенесень – вимкнена, перший рядок – відступ 0,5 см; Назва статті – шрифт 14 pt, розміщення по центру. Стаття оформлюється без колонтитулів.

**Стиль формул:** математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів у редакторі формул - MathType 6.9 (не вище); шрифт – Times New Roman 11 pt; вирівнювання по центру; нумерація у круглих дужках праворуч (вбудований в Microsoft Word редактор формул – не використовувати). Не допускається представлення формули та її номера у вигляді таблиці. Символи у формулах та у тексті повинні мати однакові зображення. Об'єкти MathType у тексті статті розташовувати небажано.

Фізичні, хімічні, технічні та математичні терміни, одиниці фізичних величин та умовні позначення, що використовуються у статті, мають бути загальноприйнятими. Скорочення одиниць фізичних величин мають відповідати вимогам Міжнародної системи одиниць СІ (SI).

Стиль ілюстрацій: ілюстрації (рисунок та/або фотографії) (не більше 10) виконуються у форматах BMP, JPG, TIFF (300 dpi) з підписаними підписами і вставляються у текст як «рисунок». Шрифт тексту на рисунках – Times New Roman 11 pt. Застосування альбомної орієнтації не допускається. Редакція залишає за собою право на заміну повнокольорових ілюстрацій на чорно-білі при друці накладу журналу.

Стиль таблиць: табличний редактор – Word; таблиці подавати у тексті; шрифт Times New Roman 11 pt. Якщо таблиць декілька (всього не більше 5), кожна повинна мати порядковий номер (без знака №) та назву. Позначення «Таблиця 1. ...» друкується ліворуч над таблицею жирним шрифтом 11 pt.

Стиль літератури: список нумерованих літературних джерел, на які посилається автор, оформлюється згідно зі стандартом «Harvard».

Кожне джерело – з абзацу, шрифт – Times New Roman 11 pt. У тексті цитоване джерело позначається у квадратних дужках цифрою, що відповідає його номеру у списку літератури. До усіх цитованих джерел повинен застосовуватися один і той самий стандарт, тобто порядок надання даних у посиланнях та розділові знаки повинні бути однаковими. Скорочення назв цитованих джерел і кількість авторів не припускається.

Статті, оформлені з недодержанням вказаних вимог, повертаються автору без розгляду. Датою надходження до редакції вважатиметься дата повторного надходження статті, оформленої згідно з вищевказаними вимогами.

Після отримання рукопису статті згідно вимог редакції вона представляється на редколегії журналу, на якій призначається рецензент. Мінімальний термін, через який автори отримують зауваження рецензента, 2 місяця від дати отримання статті. Редколегія проводиться щомісячно в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Детальнішу інформацію можна одержати в редакції за тел.: (38044) 200-82-77; 200-63-02 та на сайті журналу <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/>.

Поштова адреса редакції журналу «Автоматичне зварювання»: вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03150, Україна.

Електронна адреса [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua).  
Сайт: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

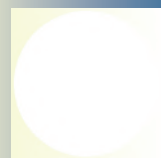
Підписано до друку 23.01.2020. Формат 60×84/8. Офсетний друк.  
Ум. друк. арк. 8,38.

Друк ТОВ «ДІА».  
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.





**МІЖГАЛУЗЕВИЙ УЧБОВО-АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР  
ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ**



**ВАШ НАДІЙНИЙ ПАРТНЕР**  
**в області професійного навчання, перепідготовки,  
підвищення кваліфікації та атестації  
персоналу зварювального виробництва**

Свідоцтво про атестацію Міністерства освіти і науки України РД № 000002;  
Сертифікати Міжнародного Інституту Зварювання № 27/4; Європейської Зварювальної Федерації № 23/4

**Спеціальна підготовка, підвищення кваліфікації і атестація відповідно до національних та міжнародних вимог:**

- ❖ інженерів, технологів та майстрів із зварювання;
- ❖ координаторів зварювальних робіт згідно вимог ДСТУ ISO 14731;
- ❖ керівників зварювальних робіт, в т.ч. при ремонті діючих трубопроводів (під тиском), при будівництві та ремонті газопроводів з поліетиленових труб;
- ❖ голів та членів комісій з атестації зварників.



**Перепідготовка спеціалістів зварювального виробництва відповідно до кваліфікаційної системи Міжнародного Інституту Зварювання і Європейської Зварювальної Федерації (IIW, EWF) та вимог ДСТУ ISO 3834 з присвоєнням кваліфікації:**

- ❖ Міжнародного інженера із зварювання (IWE);
- ❖ Міжнародного технолога із зварювання (IWT);
- ❖ Міжнародного спеціаліста із зварювання (IWS);
- ❖ Міжнародного інспектора із зварювання (IWIP);
- ❖ Міжнародного дизайнера із зварювання (IWSD);
- ❖ Міжнародного практика із зварювання (IWP);
- ❖ Міжнародного зварника (IW).

**Спеціальна підготовка, підвищення кваліфікації і атестація відповідно до національних і міжнародних стандартів педагогічного персоналу системи професійного навчання зварників (в т.ч. на виробництві):**

- ❖ Викладачів спеціальних дисциплін зварювального циклу;
- ❖ Майстрів (інструкторів) виробничого навчання із зварювання плавленням.



**Професійне навчання, перепідготовка, підвищення кваліфікації та атестація відповідно до вимог національних та міжнародних стандартів і правил (ДСТУ EN ISO 9606, ДСТУ ISO 24394, ДСТУ ISO 14732, ДСТУ EN 13067, НПАОП 0.00-1.16-96) ЗВАРНИКІВ**



- ❖ ручного дугового зварювання покритими електродами;
- ❖ механізованого дугового зварювання плавким металевим електродом в захисних газах (МІГ / МАГ);
- ❖ механізованого дугового зварювання порошковим дротом;
- ❖ дугового зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом в інертних газах (ТІГ);
- ❖ автоматичного дугового зварювання під флюсом;
- ❖ електрошлакового зварювання;
- ❖ контактного стикового зварювання (труби, рейки);
- ❖ газового зварювання;
- ❖ пластмас (зварювання газопроводів із полімерних матеріалів);

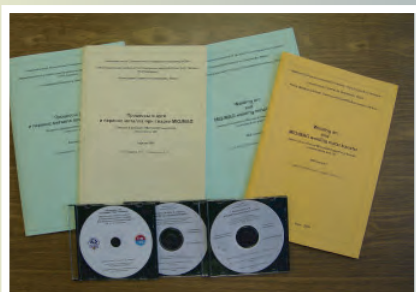
**Професійне навчання, підвищення кваліфікації та спеціальна підготовка до атестації згідно зі стандартом ДСТУ EN ISO 9712 КОНТРОЛЕРІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ за спеціалізацією:**

- ❖ ультразвуковий метод контролю;
- ❖ радіографічний метод контролю;
- ❖ візуально-оптичний метод контролю.

**Спеціальна підготовка та атестація персоналу з випробувань зварних з'єднань:**

- ❖ фахівців з фізико-механічних випробувань металів і зварних з'єднань;
- ❖ фахівців з металографічних досліджень металів і зварних з'єднань.

**Розробка навчально-методичних посібників, відео- та комп'ютерних анімацій для професійної підготовки і підвищення кваліфікації ЗВАРНИКІВ**



Наші майстерні для навчання зварників знаходяться на території Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона за адресою:

Україна, 03150, м. Київ  
вул. Антоновича, 56  
Тел.: (+380 44) 200-82-80,  
200-81-09  
paton\_muac@ukr.net  
<http://muac.kpi.ua>

Наш офіс, а також аудиторії для теоретичного навчання та лабораторії для підготовки контролерів зварювальних робіт і дефектоскопістів з неруйнівних методів контролю знаходяться в корпусі зварювального факультету Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» за адресою:

Україна, 03056, м. Київ  
вул. Дашавська, 6/2  
Тел.: (+380 44) 294-61-65,  
456-63-30, 456-10-74

