

METALLIC SURFACES AND FILMS

PACS numbers: 06.60.Vz, 52.77.Fv, 68.35.bd, 68.37.-d, 81.05.Bx, 81.40.-z

Вплив режимів імпульсного дугового натоплювання на геометричні розміри натоплених валиків і структуру натопленого металу системи легування Fe–C–Cr–Ti–Mn–Si

I. O. Ryabtsev, A. A. Babinec, I. P. Lentuyov,
I. L. Bohaychuk, A. V. Yevdokimov *

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна
*Дніпровський державний технічний університет,
кафедра технології та устаткування зварювання,
вул. Дніпробудівська, 2,
51918 Кам'янське, Україна*

У роботі проведено порівняльні експериментальні дослідження впливу параметрів імпульсного дугового натоплювання на геометричні розміри натоплених валиків і структуру натопленого металу системи легування Fe–C–Cr–Ti–Mn–Si. За еталон взято зразки, натоплені на таких самих режимах, але без застосування імпульсних технологій. Дослідження виконували із використанням напівавтомату Fronius TPS 400i зі власним джерелом живлення та універсальної натоплювальної установки У-653, укомплектованої джерелом живлення ВДУ-506. Експериментально визначено, що використання імпульсних режимів натоплювання призводить до зміни мікроструктурного стану натопленого металу і до підвищення його твердості в середньому на 4–5 одиниць за шкалою HRC, порі-

Corresponding author: Ihor Oleksandrovych Ryabtsev
E-mail: ryabtsev39@gmail.com

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine
*Dniprovsky State Technical University,
Department of Welding Technology and Equipment,
2 Dniprobudivska Str., UA-51918 Kamianske, Ukraine*

Citation: I. O. Ryabtsev, A. A. Babinets, I. P. Lentuyov, I. L. Bohaychuk, and A. V. Yevdokimov, Influence of Pulse Arc Surfacing Modes on Geometric Dimensions of Welded Beads and Structure of Deposited Metal of Fe–C–Cr–Ti–Mn–Si Alloying System, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 12: 1667–1681 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.12.1667](https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1667).

вняно з натоплюванням без імпульсів. Встановлено величину параметра динаміка/імпульс у разі імпульсного режиму натоплювання, який відповідає за енергію відриву краплі, за якої досягають більш рівномірної структури натопленого металу, що характеризується дрібним розміром зерна та найменшою шириною зони термічного впливу (ЗТВ). Враховуючи те, що імпульсне натоплювання із застосуванням напівавтомата Fronius TPS 400i дозволяє значно змінювати амплітуду, період і кут нахилу фронту хвилі коливань струму порівняно з натоплюванням без імпульсів на стандартному обладнанні, що суттєво позначається на властивостях натопленого металу. Дані, одержані у цій роботі, можуть бути використані для вибору режимів натоплювання деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Ключові слова: дугове натоплювання, імпульсне натоплювання, режими натоплювання, глибина протоплювання, натоплений метал, структура натопленого металу, зона термічного впливу.

In this work, comparative experimental studies of the influence of the parameters of pulsed arc surfacing on the geometric dimensions of the deposited beads and the structure of the deposited metal of the Fe-C-Cr-Ti-Mn-Si alloying system are carried out. As a standard, we used samples deposited in the same modes, but without the use of pulse technologies. The studies are carried out using a Fronius TPS 400i semiautomatic device with its own power supply and U-653 universal surfacing equipment with a VDU-506 power source. It has been experimentally established that the use of pulsed surfacing modes leads to a change in the microstructural state of the deposited metal and to an increase in its hardness by an average of 4...5 units on the HRC scale, in comparison with surfacing without pulses. The value of the dynamic/impulse parameter in the pulsed surfacing mode, which is responsible for the droplet detachment energy, is determined. A more uniform structure of the deposited metal is obtained when surfacing in the optimal modes, which is characterized by a fine grain size and the smallest width of the heat-affected zone. It has been established that pulsed surfacing with the use of a Fronius TPS 400i semiautomatic device makes it possible to significantly change the amplitude, period and tilt angle of the current wave front as compared to surfacing without pulses on standard equipment. This has a significant effect on the properties of the weld metal. The data obtained in this work can be used when choosing the modes of surfacing of parts operating under conditions of intense abrasive wear.

Key words: arc surfacing, impulse surfacing, surfacing modes, penetration depth, weld metal, structure of surfacing metal, heat-affected zone.

(Отримано 28 січня 2021 р.; остаточн. варіант — 17 вересня 2021 р.)

1. ВСТУП

Незважаючи на те, що нині все частіше для натоплювання та зварювання застосовують імпульсні технології, сама ідея використан-

ня зварювального процесу з періодично змінюваною потужністю дуги відома досить давно.

Так, за даними [1], у США цей спосіб застосовували ще на початку 1930-х років для зварювання листів з неіржавійкої сталі, а дослідниками з Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України даний спосіб застосовували з метою зменшення теплових втрат під час зварювання, починаючи з 1950-х років [2].

Імпульсні процеси у разі дугового натоплювання (зварювання) можна здійснювати за рахунок регулювання струму дуги або за рахунок регулювання швидкості подачі (імпульсної подачі) електродного дроту. Різновидами цих способів є технології SpeedPulse, STT, ForceArc, ColdArc, CMT та ін., які розроблюють різні виробники зварювального устаткування [3–5].

Так, наприклад, відмінність процесу SpeedPulse від традиційного імпульсного процесу полягає у тому, що під час пауз між основними імпульсами, вмикається короткотривалий (на частку мілісекунди) струминний процес зварювання; процес ColdArc характеризується циклічною зміною фаз горіння дуги й короткого замикання, під час якої відбувається безперервне вимірювання напруги та високодинамічне регулювання її миттєвих значень, а у разі натоплювання з використанням процесу CMT цифрова система, об'єднана із блоком подачі дроту, постійно фіксує момент виникнення короткого замикання й шляхом відводу дроту допомагає відділенню краплі, завдяки чому перенос металу відбувається під дією сил інерції, а струм короткого замикання незначний [3–6].

Однак спільними завданнями, які поєднують усі перераховані способи, є забезпечення керованого переносу електродного металу, підвищення стабільності горіння дуги, зменшення розбризкування, зниження залишкових деформацій та ін. [3–9].

Основною умовою для забезпечення стабільності дугового процесу й формування якісного натопленого металу у разі імпульсного натоплювання є вибір оптимального співвідношення між параметрами імпульсу й паузи [10–12].

Через значну кількість параметрів процесу, що впливають один на одного, вибір оптимальних значень найчастіше проводять експериментально [2].

Загальною рекомендацією для визначення оптимальних параметрів імпульсного натоплювання (зварювання) є умова переносу однієї краплі електродного металу за один імпульс. Якщо тривалість імпульсу буде занадто мала — його енергії не вистачить для відриву краплі, якщо занадто велика — одночасно може відділитися декілька крапель електродного металу, що порушить стабільність дугового процесу [10, 11].

Через значну кількість розрізнених експериментальних даних, які здебільшого стосуються зварювання тонколистових конструк-

цій, вибрати оптимальні параметри імпульсного процесу для дугового натоплювання досить складно.

По-перше, у технічній літературі в основному наводять порівняльні дані про вплив різних режимів імпульсного зварювання на розміри зварних швів без їх порівняння із процесом без імпульсів на тих самих режимах [13, 14]. По-друге, у разі натоплювання часто необхідно одержати мінімальну глибину протоплення основного металу, щоб забезпечити заданий хемічний склад натопленого металу вже у другому-третьому шарі, а в наявній технічній літературі в основному розглянуті процеси імпульсного зварювання, де важливим є завдання забезпечити гарантований провар [3–11].

Порівняльну оцінку впливу параметрів натоплення з використанням імпульсних технологій і без них проведено у роботі [2]. Вона показала, що у разі імпульсно-дугового натоплювання в середовищі захисних газів глибина протоплення основного металу збільшується порівняно з натоплюванням без імпульсів на однакових режимах. Також було відзначено, що для імпульсного процесу в даних умовах характерна більш стисла форма дуги, що вплинуло на форму протоплення основного металу. За даними роботи [15] застосування пульсної дуги порівняно зі стаціонарною також призводить до збільшення глибини протоплення, не підвищуючи водночас температури з'єднання. Однак до цього ж на 20–40% знижується швидкість зварювання.

Крім того, широко відомо, що застосування імпульсних процесів натоплювання (зварювання) дозволяє регулювати кількість введення тепла у зварювальну ванну, що безпосередньо позначається на структурному стані натопленого металу й зони термічного впливу (ЗТВ).

Так, у роботах [16–18] показано, що використання імпульсних технологій дозволяє одержати дрібнозернисту структуру металу. Крім того, за стаціонарних режимів зварювання ЗТВ є широкою й характеризується крупним зерном, що свідчить про значні тепловкладення. У разі зварювання на імпульсних режимах ЗТВ більш вузька й у ній не відзначається помітного росту зерна, що позитивно позначилося на міцності металу ЗТВ і підвищенні втомної довговічності металу шва в 1,7 рази.

Разом з тим, дані про порівняльний вплив режимів імпульсного натоплювання на структурний стан натопленого металу також достатньо розрізнені, через що це питання потребує додаткового вивчення.

Таким чином, мета даної роботи полягає у дослідженні впливу режимів імпульсного дугового натоплювання порівняно з натоплюванням без імпульсів на геометричні розміри натоплених валиків і структуру натопленого металу системи легування Fe–C–Cr–Ti–Mn–Si.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ, ВИКОРИСТАНІ МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Для проведення експериментів виготовили порошковий дріт ПП-АН192 діаметром 1,8 мм, що забезпечує одержання нагрітого металу системи легування Fe–C–Cr–Ti–Mn–Si.

Для нагрівання зразків використовували універсальну нагрівальну установку У-653, укомплектовану джерелом живлення ВДУ-506 та напівавтомат Fronius TPS 400i із власним джерелом живлення.

Напівавтомат Fronius TPS 400i забезпечує можливість нагрівання як за стаціонарного режиму (без імпульсів), так і за імпульсного. Разом з тим, у даному напівавтоматі користувачу доступне тільки відносне регулювання імпульсного режиму — шляхом зміни параметра динаміка/імпульс в умовних одиницях від «-10» до «+10» в меню програмного забезпечення напівавтомата. Водночас згідно інструкції з експлуатації до даного апарату, значенню «0» відповідає середня енергія відриву краплі електродного металу, а регулювання в ту чи іншу сторону призводить до її зменшення чи збільшення.

Для забезпечення постійної швидкості нагрівання та величини вильоту електрода у процесі всіх експериментів у разі нагрівання з використанням напівавтомата, його пальник закріплювали за допомогою спеціально виготовленого оснащення на колоні установки У-653, що забезпечувало сталу швидкість нагрівання, рівну 20 м/год і однаковий виліт електрода — 15 мм.

Для полегшення роботи користувача, напівавтомат був переведений в спеціальний режим роботи: у разі першого натискання кнопки на рукоятці пальника процес нагрівання починається й не переривається доти, поки користувач знову не натисне кнопку. У такому випадку йому не потрібно втримувати кнопку натиснутою протягом усього процесу нагрівання.

Для забезпечення однакових електричних параметрів нагрівання й усунення можливих похибок показань амперметрів на різних джерелах живлення експерименти виконували, орієнтуючись не на величину струму, а задаючи однакову швидкість подачі дроту, яка дорівнювала 3,5 м/хв (210 м/год). Напруга на дузі під час всіх експериментів дорівнювала 24 В.

У процесі нагрівання за допомогою цифрового осцилографа, приєднаного до ноутбука з встановленим програмним забезпеченням «IRIS», через вимірювальний шунт записували осцилограми падіння напруги й за відомим номінальним падінням напруги на шунті і його опором визначали величину зварювального струму, який протікав через шунт. Зовнішній вигляд нагрівальної установки із приєднаним вимірювальним устаткуванням наведено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд установки для натоплювання: **1** — колона У-653 із закріпленим на ній пальником напівавтомата; **2** — напівавтомат Fronius TPS 400i; **3** — вимірювальний шунт; **4** — цифровий осцилограф «IRIS»; **5** — ноутбук із програмним забезпеченням «IRIS Waveware».

Fig. 1. Appearance of the equipment for surfacing: **1**—column U-653 with the semiautomatic torch fixed on it; **2**—semiautomatic welding machine Fronius TPS 400i; **3**—measuring shunt; **4**—digital oscilloscope ‘IRIS’; **5**—laptop with IRIS Waveware software.

Натоплювання зразків здійснювали за такою схемою:

№ 1 — стаціонарний режим (установка У-653, джерело живлення ВДУ-506 — без імпульсів);

№ 2 — стаціонарний режим (напівавтомат Fronius TPS 400i зі власним джерелом живлення — без імпульсів);

№ 3 — імпульсний режим (те саме — параметр динаміка/імпульс = 0);

№ 4 — імпульсний режим (те саме — параметр динаміка/імпульс = -10);

№ 5 — імпульсний режим (те саме — параметр динаміка/імпульс = +10).

Після натоплення візуально оцінювали якість формування натоплених валиків, наявність в них дефектів та ін., а потім виготовляли поперечні макрошліфи, по яким визначали ширину й висоту валика, а також глибину протоплювання основного металу. Усього виконували по п'ять вимірів по шліфах, вирізаних із різних частин натоплених зразків, і вираховували середнє значення.

Також на оптичному мікроскопі «Neophot-32» виконували металографічні дослідження зразків, вирізаних з натоплених заготовок. Виготовлення шліфів проводили за стандартними методами підготовки зразків для металографічних досліджень. Виміри мікротвер-

дості структурних складових натопленого металу за Вікерсом проводили на мікротвердомірі Лесо М-400. Фотознімки структури металу виконували за допомогою цифрової фотокамери «Olympus C 5050».

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Формування валиків, натоплених із застосуванням як стаціонарних, так й імпульсних режимів, можна визнати задовільним — пори, тріщини, підрізи та ін. дефекти не виявлені. Також слід відмітити, що твердість металу, натопленого із застосуванням імпульсних режимів в середньому вище на 4–5 одиниць за шкалою *HRC* порівняно з металом, натопленим без імпульсів. Результати вимірів геометричних розмірів натоплених валиків та їхньої твердості наведено в табл. 1, а зовнішній вигляд відповідних макрошліфів — на рис. 2.

Результати вимірів показали, що у разі натоплювання на напівавтоматі з використанням імпульсного режиму (зразок № 3) забезпечується найменша глибина протоплювання (2,01 мм) порівняно з натоплюванням на інших режимах. До того ж, ширина валика така сама, як і у разі натоплювання без імпульсів на установці У-653, і трохи менша (12,3 мм і 13,4 мм відповідно) порівняно з натоплю-

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив способу та режиму натоплювання на геометричні розміри натоплених валиків та їхню твердість.

TABLE 1. Influence of the method and mode of surfacing on the geometric dimensions of the welded beams and their hardness.

№	Характеристика процесу натоплювання/Обладнання	Розміри валиків, мм			Твердість, <i>HRC</i>
		Ширина	Висота	Глибина	
1	Без імпульсів/У-653 + ВДУ 506	12,3	3,05	2,21	56–59
2	Без імпульсів/Fronius TPS 400i	13,4	2,65	2,23	56–58
3*	Імпульсний «0»/Fronius TPS 400i	12,3	3,24	2,01	62–64
4	Імпульсний «-10»/Fronius TPS 400i	11,6	3,20	2,17	61–63
5	Імпульсний «+10»/Fronius TPS 400i	12,9	2,48	2,24	63–64

Примітка: * — оптимальний імпульсний режим натоплювання (див. рис. 3, імпульсний режим № 3).

ванням без імпульсів з використанням напівавтомата.

Необхідно відзначити, що висота валика у разі натоплювання на режимі № 3 найбільша (3,24 мм) порівняно з іншими режимами, що в комплексі з мінімальною глибиною протоплювання повинно позитивно вплинути на продуктивність натоплення. Адже чим менше глибина протоплювання і вища висота валика, тим менше буде відсоток розбавлення натопленого металу основним, а отже, менше шарів необхідно буде натопити, щоб одержати заданий хемічний склад і властивості натопленого металу.

У разі натоплювання на режимі № 4 відзначена мінімальна ширина валика, а глибина протоплювання приблизно на однаковому рівні з іншими. У разі натоплювання на режимі № 5 розміри валика практично такі самі, як і у разі натоплювання без імпульсів.

Аналіз осцилограм, записаних у разі натоплювання на вищевказаних режимах, показав, що навіть, якщо вибрати режим натоплювання без імпульсів, осцилограма струму у разі використання напівавтомата Fronius TPS 400i (рис. 3, № 2) значно відрізняється за амплітудою й періодом коливань від аналогічного режиму натоплювання у разі використання джерела живлення ВДУ-506 (рис. 3, № 1).

Осцилограми, записані у разі натоплювання з використанням імпульсних режимів, показують, що зі зміною параметра «динаміка/імпульс» змінюється як характер форми імпульсів (амплітуда), так і період їх перебігу, а також кут нахилу фронту хвилі імпульсу. Якщо для джерела живлення ВДУ-506 характерним є період три-

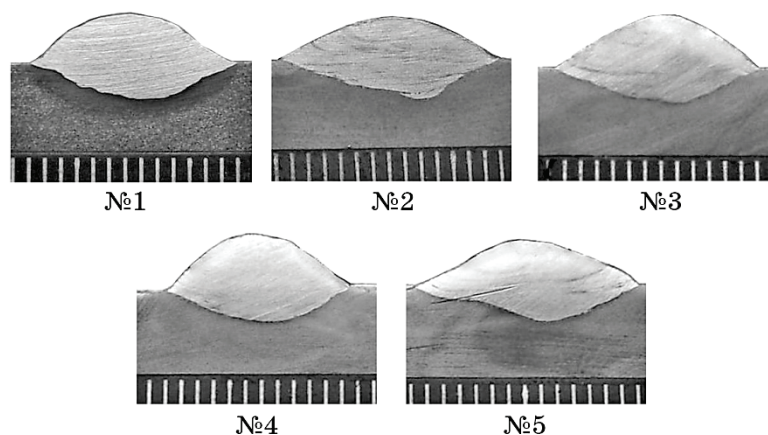


Рис. 2. Макрошліфи зразків, натоплених без імпульсів (№ 1–2) і на імпульсних режимах (№ 3–5). Позначення див. в тексті.

Fig. 2. Macrogrinds of samples deposited without pulses (Nos. 1–2) and on pulse modes (Nos. 3–5). Designation see in the text.

валістю 3 мс поміж порівняно незначними коливаннями струму від 200 до 280 А, то у разі використання джерела живлення Fronius TPS 400i спостерігається більш складна залежність — з одночасним накладенням короткочасних імпульсів (менше 1 мс) з амплітудою від -160 до 800 А та більш протяжних за часом імпульсів з періодами 12 мс і амплітудою -160 –400 А (рис. 3, № 3–5).

Високочастотні коливання зварювального струму з великою різницею по амплітуді у разі натоплювання, на наш погляд, повинні призводити до подрібнювання крапель рідкого металу й сприяти їх більш швидкому потраплянню у зварювальну ванну і її більш інтенсивному перемішуванню та, як наслідок, до подрібнювання структури натопленого металу та її однорідності.

Дослідження мікроструктури зразка № 1, натопленого без імпу-

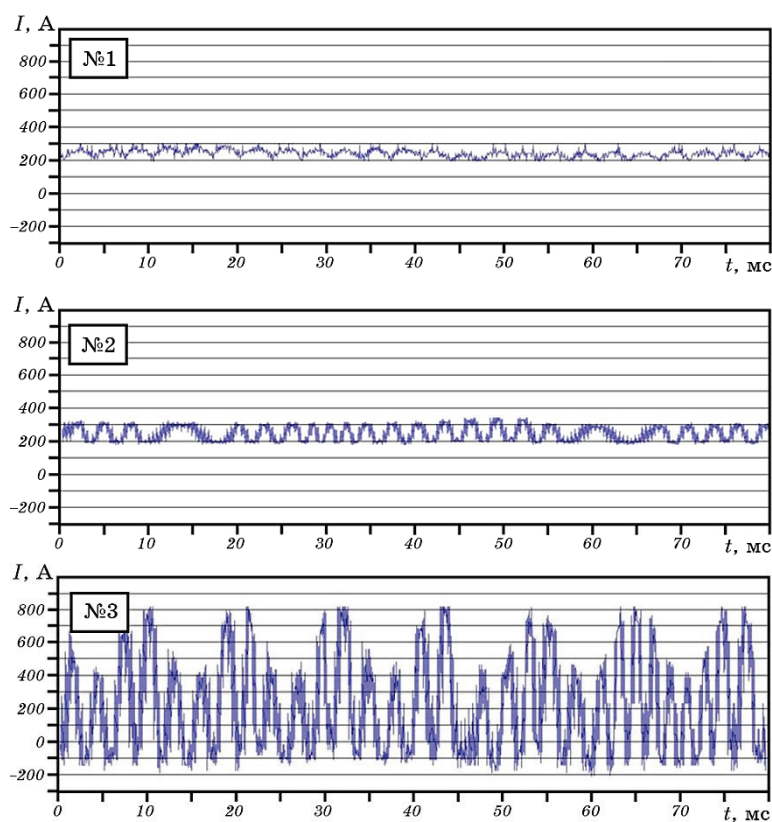
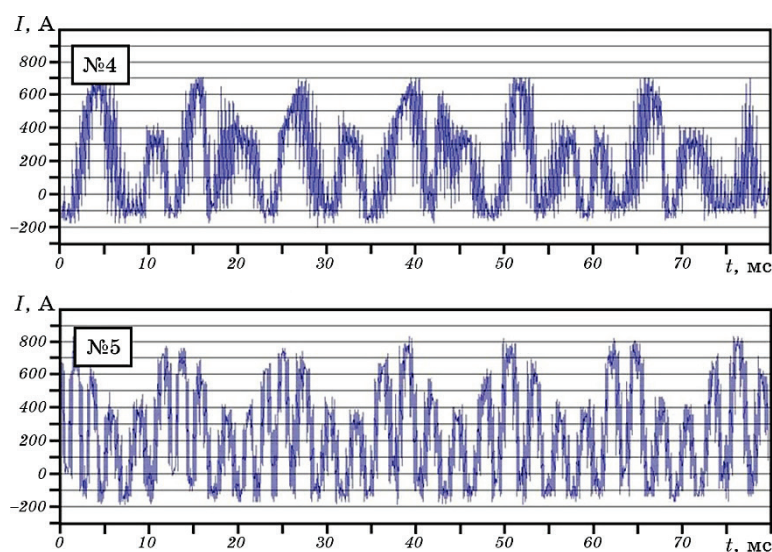


Рис. 3. Осцилограми струму у разі натоплювання без імпульсів (№ 1–2) і на імпульсних режимах (№ 3–5). Позначення див. в тексті.

Fig. 3. Oscillograms of current during surfacing without pulses (Nos. 1–2) and on pulse modes (Nos. 3–5). Designation see in the text.



Продовження рис. 3.

Continuation of Fig. 3.

льсів з використанням джерела живлення ВДУ-506, показало, що вона є мартенситом і залишковим аустенітом з виділеннями дрібних карбідів і карбонітридів титану (рис. 4, № 1). Водночас у приповерхневих шарах нагрітого металу карбідні виділення крупніші й у кількісному відношенні їх більше, аніж у лінії стоплення. Також біля лінії стоплення відмічено світлотравну смужку шириною 5–20 мкм, яка має твердість $HV1$ — 3910–4060 МПа. Твердість нагрітого металу біля лінії стоплення становить $HV1$ — 5520–5590 МПа, у центрі нагрітого шару — $HV1$ — 5920–6010 МПа. Структура основного металу в ЗТВ ферито-перлітна, крупнозерниста, ферит має орієнтацію за Відманштеттом. Твердість основного металу — $HV1$ — 1950–2050 МПа.

Мікроструктура зразка № 2, нагрітого без імпульсів півавто-матом Fronius TPS 400i, дендритно-коміркова (рис. 4, № 2). Ширина кристалітів у центральній частині нагрітого металу змінюється від 20 до 30 мкм за середнього значення — 24 мкм. На поверхні нагрітого металу виявлено світлотравні ділянки структури з твердістю $HV1$ — 3830 МПа. Структура нагрітого металу складається з мартенситної основи ($HV1$ — 4640 МПа) та голчастих виділень карбідів. Всередині кристалітів, а також по їхнім граням, виявлено велику кількість нітридів титану правильної геометричної форми. Твердість нагрітого металу біля поверхні складає $HV1$ — 4640–6240 МПа, у центрі нагрітого металу — $HV1$ —

5910–6090 МПа, біля лінії стоплення — $HV1$ — 5710–5790 МПа. У даному зразку також відмічено наявність світлотравної смужки, яка має твердість $HV1$ — 4190 МПа та розміщується вздовж лінії стоплення в натопленому металі. Твердість основного металу на ділянці крупних зерен складає $HV1$ — 2050 МПа, загальна твердість $HV1$ — 1950 МПа. Ширина ділянки крупного зерна складає близько 280 мкм, ширина ЗТВ — 1200–1280 мкм.

Мікроструктура зразка № 3, натопленого на імпульсному режимі, також дендритно-коміркова (рис. 4, № 3). Ширина кристалітів у центральній частині становить від 20 до 70 мкм, а середнє значення — 45 мкм. У структурі натопленого металу так само, як і в зразку

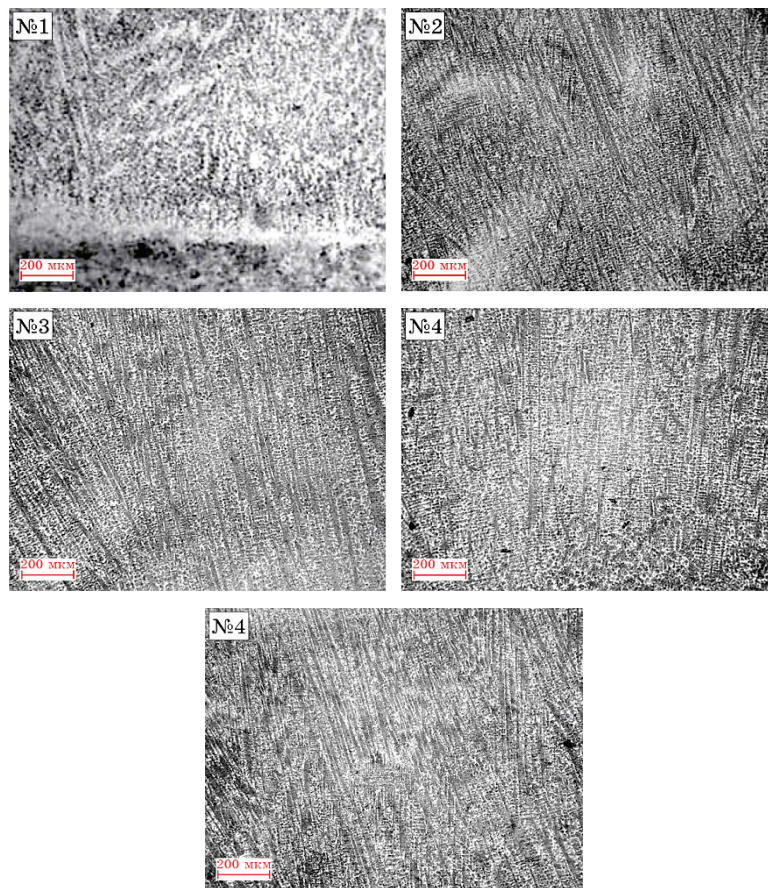


Рис. 4. Мікроструктура металу, натопленого без імпульсів (№ 1–2) і на імпульсних режимах (№ 3–5). Позначення див. в тексті.

Fig. 4. Microstructure of metal deposited without pulses (Nos. 1–2) and on pulse modes (Nos. 3–5). Designation see in the text.

№ 2 наявні голчасті карбіди, але кількість їх менша, і за розмірами вони коротші. Візуалізуються у великій кількості нітриди титану по всій поверхні натопленого металу, твердість якого складає біля поверхні — $HV1$ — 5510–5810 МПа, по центру — $HV1$ — 5910–6020 МПа, на лінії стоплення — $HV1$ — 5910–6010 МПа. Вздовж лінії стоплення світлотравної смуги не виявлено. Твердість основного металу біля лінії стоплення складає $HV1$ — 2050 МПа, у середині основного металу — $HV1$ — 1950 МПа. Ширина ділянки крупного зерна 350–400 мкм, ширина ЗТВ — 1100–1200 мкм.

Мікроструктура зразка № 4 також дендритно-коміркова. Ширина кристалітів у центральній частині становить від 60 до 80 мкм, а середнє значення — 72 мкм (рис. 4, № 4). У структурі натопленого металу карбідні голчасті включення виявляються здебільшого біля поверхні. Виділення дисперсних нітрідів розміщуються рівномірно. Твердість натопленого металу біля поверхні складає $HV1$ — 5690–6110 МПа, по центру — $HV1$ — 6050–6130 МПа, на лінії стоплення — $HV1$ — 5610–5630 МПа. Твердість на лінії стоплення — $HV1$ — 2030–2080 МПа. Твердість основного металу — $HV1$ — 1950–2100 МПа. Ширина ділянки крупного зерна 500–600 мкм, ширина ЗТВ — 2500–2600 мкм.

Кристалізація натопленого металу у зразку № 5 також дендритно-коміркова (рис. 4, № 5). Ширина кристалітів у центральній частині становить від 35 до 80 мкм, а середнє значення — 58 мкм. Голчаста структура карбідних включень зберігається по всій висоті натопленого металу. Також відмічені дисперсні включення нітрідів титану. Світлотравна смуга відсутня. Твердість натопленого металу біля поверхні складає $HV1$ — 6480–6600 МПа, по центру — $HV1$ — 6480–6600 МПа, на лінії стоплення — $HV1$ — 5810–6360 МПа. Твердість на лінії стоплення — $HV1$ — 1990–2080 МПа. Твердість основного металу — $HV1$ — 1980 МПа. Ширина ділянки крупного зерна 300–400 мкм, ширина ЗТВ — 1400–1500 мкм. Узагальнені дані для всіх зразків наведено в табл. 2.

Поява білого прошарку в перехідній зоні від натопленого до основного металу за стаціонарних режимів натоплювання пов'язано можливо з більшою глибиною протоплювання основного металу, більшою часткою основного металу у натопленому і з їх гіршим перемішуванням. Можливо також вплив на його утворення дифузійних процесів внаслідок більш тривалого перебування цієї зони в області підвищених температур. З огляду на більш низьку мікротвердість білого прошарку порівняно з іншими зонами натопленого металу можна очікувати, що в його структурі буде переважати залишковий аустеніт.

Проаналізувавши вищенаведене, можна дійти висновку, що імпульсний режим натоплювання за величини параметра динаміка/імпульс — «0» призводить до одержання більш рівномірної

ТАБЛИЦЯ 2. Характеристики мікроструктури металу, натопленого за стаціонарних та імпульсних режимів.**TABLE 2.** Characteristics of the microstructure of the metal deposited on stationary and pulsed modes.

№	Наявність та тип карбідних включень	Розміри кристалів, мкм		Ширина ЗТВ, мкм	Мікротвердість різних ділянок натопленого металу, МПа			Мікротвердість основного металу, МПа
		min	max		Біля поверхні	Центр	Лінія стоплення	
1	Голчасті по всьому об'єму натопленого металу (н.м.)	30	80	2400–2800	4590–5960	5920–6010	5520–5590	1950–2050
2	Те саме	20	70	1200–1280	4640–6240	5910–6090	5710–5790	1950–2050
3*	Голчасті, менші ніж у зразка № 2	20	30	1100–1200	5510–5810	5910–6020	5910–6010	1950–2050
4	Голчасті біля поверхні н.м.	60	80	2500–2600	5690–6110	6050–6130	5610–5630	1950–2100
5	Голчасті по всьому об'єму н.м.	35	80	1400–1500	6480–6600	6480–6600	5810–6360	1980–2080

Примітка: * — оптимальний імпульсний режим натоплювання (див. рис. 3, імпульсний режим № 3).

структури натопленого металу, подрібнення розмірів карбідних та нітридних включень, завдяки чому одержуємо більш рівномірний розподіл за мікротвердістю (зразок № 3). Також у цьому випадку спостерігається найменша ширина ЗТВ, що має позитивно вплинути на якість з'єднання основного та натопленого металу.

Крім того, в усіх зразках, натоплених з використанням імпульсного режиму, відсутні такі особливості стоплення натопленого та основного металу, як вузька світлотравна смуга, що розташовується біля лінії стоплення у зразках № 1–2, натоплених за стаціонарного режиму без імпульсів. Наявність такої неоднорідності у натопленому металі може негативно вплинути на експлуатаційні якості натоплених деталей.

4. ВИСНОВКИ

1. Зміна величини параметра динаміка/імпульс, який відповідає за енергію відриву краплі у межах від «–10» до «+10» імпульсного режиму натоплювання напівавтомата Fronius TPS 400i, у підсумку впливає як на геометричні розміри натоплених валиків, так і на

структуру натопленого металу (розмір зерна, мікротвердість, однорідність й ін.), що може значно вплинути на експлуатаційні властивості натоплених деталей і потребує додаткового вивчення.

2. Натоплювання у разі імпульсного режиму за величини параметра динаміка/імпульс — «0» дозволяє одержати натоплений валик з мінімальною глибиною протоплення, максимальною висотою та твердістю порівняно з натопленням за інших режимів за практично однаковою ширини валиків. Мікроструктура металу, натопленого за даного режиму та ЗТВ, більш рівномірна і характеризується меншим розміром зерна з відсутністю дефектів біля лінії стоплення. Таким чином, порівняно з іншими дослідженими режимами, даний режим можна визнати оптимальним.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. H. M. Cobb, *The History of Stainless Steel* (Ohio: ASM International: 2010).
2. V. D. Poznyakov, A. V. Zavdoveev, A. A. Gajvoronsky, A. M. Denisenko, and A. A. Maksymenko, *The Paton Welding Journal*, **9**: 7 (2018).
3. А. Г. Крампит, Е. А. Зернин, М. А. Крампит, *Технологии и материалы*, **1**: 4 (2015).
4. A. M. Zhernosekov, *The Paton Welding Journal*, **1**: 29 (2012).
5. С. Ф. Гёке, *Процесс дуговой сварки с уменьшенной отдачей энергии для чувствительных к теплу материалов [Электронный ресурс]*. Режим доступа: <http://www.ewm-russia.ru/articles/coldarc.php>
6. В. Л. Бондаренко, *Автоматическая сварка*, **12**: 55 (2004).
7. Н. И. Голиков, Ю. Н. Сараев, О. И. Слепцов, К. В. Степанова, С. В. Семенов, *Наука и образование*, **3**: 69 (2015).
8. М. А. Крампит, *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, **5/1**: 18 (2015).
9. А. М. Жерносеков, В. Н. Сидорец, В. В. Приходько, *Проблемы машиностроения*, **16**, № 5: 18 (2013).
10. Н. М. Воропай, В. М. Илюшенко, Ю. Н. Ланкин, *Автоматическая сварка*, **6**: 26 (1999).
11. P. K. Palani and N. Murugan, *J. Mater. Processing Technol.*, **2**: 1 (2006).
12. H. Tong, T. Ueyama, and H. Harada, *Sci. Technol. Weld. J.*, **6**, No. 4: 203 (2001).
13. D. Joseph, D. Farson, and R. Harwig, *Sci. Technol. Weld. J.*, **10**, No. 3: 311 (2005).
14. Томоюки Уеяма, *The Paton Welding Journal*, **10/11**: 53 (2013).
15. Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков, *Сварка. Резка. Контроль* (Москва: Машиностроение: 2004).
16. Yu. N. Saraev, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, **3**, No. 3: 3 (2015).
17. Ю. Н. Сараев, В. А. Лебедев, С. В. Новиков, *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, **4**, № 1: 16 (2016).
18. Yu. N. Saraev, I. M. Poletika, A. V. Kozlov, N. V. Kirilova, I. V. Nikonova, M. V. Perovskaya, V. S. Ekimov, and A. E. Sal'ko, *Welding International*, **18**,

No. 6: 472 (2004).

REFERENCES

1. H. M. Cobb, *The History of Stainless Steel* (Ohio: ASM International: 2010).
2. V. D. Poznyakov, A. V. Zavdoveev, A. A. Gajvoronsky, A. M. Denisenko, and A. A. Maksymenko, *The Paton Welding Journal*, **9**: 7 (2018).
3. A. G. Krampit, E. A. Zernin, and M. A. Krampit, *Tekhnologii i Materialy*, **1**: 4 (2015) (in Russian).
4. A. M. Zhernosekov, *The Paton Welding Journal*, **1**: 29 (2012).
5. S. F. Gjoke, *Protsess Dugovoy Svarki s Umenshennoy Otdachey Energii dlya Chuvstvitelnykh k Teplu Materialov [Elektronnyy Resurs]*. [Arc Welding Process with Reduced Energy Output for Heat Sensitive Materials] [Electronic Resource]. Access mode: <http://www.ewm-russia.ru/articles/coldarc.php>
6. V. L. Bondarenko, *Avtomaticheskaya Svarka*, **12**: 55 (2004) (in Russian).
7. N. I. Golikov, Ju. N. Saraev, O. I. Slepcev, K. V. Stepanova, and S. V. Semenov, *Nauka i Obrazovanie*, **3**: 69 (2015) (in Russian).
8. M. A. Krampit, *Mezhdunarodnyy Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy*, **5**/1: 18 (2015) (in Russian).
9. A. M. Zhernosekov, V. N. Sidorec, and V. V. Prihod'ko, *Problemy Mashinostroeniya*, **16**(5): 18 (2013) (in Russian).
10. N. M. Voropaj, V. M. Ilyushenko, and Yu. N. Lankin, *Avtomaticheskaya Svarka*, **6**: 26 (1999) (in Russian).
11. P. K. Palani and N. Murugan, *J. Mater. Processing Technol.*, **172**, Iss. 1: 1 (2006).
12. H. Tong, T. Ueyama, and H. Harada, *Sci. Technol. Weld. J.*, **6**, No. 4: 203 (2001).
13. D. Joseph, D. Farson, and R. Harwig, *Sci. Technol. Weld. J.*, **10**, No. 3: 311 (2005).
14. Tomoyuki Ueyama, *The Paton Welding Journal*, **10**/11: 53 (2013).
15. N. P. Aleshin, G. G. Chernyshov, and Je. A. Gladkov, *Svarka. Rezhka. Kontrol'* [Welding. Cutting. Control] (Moscow: Mashinostroenie: 2004) (in Russian).
16. Yu. N. Saraev, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, **3**, No. 3: 3 (2015).
17. Yu. N. Saraev, V. A. Lebedev, and S. V. Novikov, *Mashinostroenie: Setevoy Elektronnyy Nauchnyy Zhurnal*, **4**, No. 1: 16 (2016) (in Russian).
18. Yu. N. Saraev, I. M. Poletika, A. V. Kozlov, N. V. Kirilova, I. V. Nikonova, M. V. Perovskaya, V. S. Ekimov, and A. E. Sal'ko, *Welding International*, **18**, No. 6: 472 (2004).