

Володимир Лебедєв¹, Віктор Тищенко², Сергій Лой³¹доктор технічних наук, головний конструкторДержавне підприємство «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро
Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України» (Київ, Україна)
E-mail: lebedevvladimir@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>²провідний інженерІнститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України» (Київ, Україна)
E-mail: irvik1947@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6081-8531>³доцент кафедри зварюванняХерсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Херсон, Україна)
E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>**ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МЕТАЛУ
ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ МЕХАНІЗОВАНОМУ НАПЛАВЛЕННІ
З МОДУЛЯЦІЄЮ РЕЖИМІВ**

У статті досліджено особливості забезпечення твердості поверхневого зміцнення деталей машин та механізмів з використанням способу наплавлення модульованим струмом. Представлені та проаналізовані результати експериментальних досліджень, отримані при напавленні з модуляцією режимів дугового процесу з керованими характеристиками модульованого впливу. Розроблена математична модель залежностей твердості наплавлених шарів від основних параметрів модуляції. Для прикладу та візуалізації побудовані графіки таких залежностей. Розглянуті мікрошліфи наплавлень із визначенням особливостей структури металу.

Ключові слова: дугове наплавлення; електрод, що плавиться; модуляція режимів.

Рис.: 10. Табл.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Збільшення терміну служби вузлів і деталей більшості виробничих машин у різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства тощо є однією головних проблем матеріалознавства XXI століття.

Відновлення та зміцнення вузлів і деталей різних машин і механізмів, що швидко зношуються, є завданням однієї з адитивних технологій, що отримали розвиток останнім часом. Одним із напрямів цієї технології є електродугове наплавлення із застосуванням певних матеріалів, технічних засобів та способів застосування.

Застосування цих способів наплавлення, як відомо [1], часто дозволяє отримати робочу поверхню деталей потрібної якості та з порівняно невеликими витратами. Реновація поверхонь із застосуванням електродугового наплавлення є досить відомою технологією з відомими і широко застосовуваними конструкціями зварювально-наплавного обладнання.

Постановка проблеми. Подальше застосування електродугового наплавлення може бути істотно розширено з введенням в цю технологію нових техніко-технологічних рішень, що дозволяють забезпечити міцніші наплавлені шари, отримати можливість управління геометричними параметрами наплавлених валиків, що, зокрема, знижує витрати на подальші роботи з надання результатам наплавлення необхідного товарно-експлуатаційного виду. Порівняно новим способом поліпшення показників електродугового наплавлення є застосування модуляції основних вузлів обладнання шляхом періодичної зміни їх вихідних параметрів, як одного з видів імпульсного впливу.

У системах модуляції та технології їх застосування є певні особливості, які вимагають подальшого вивчення та отримання рекомендаційних висновків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес наплавлення з модуляцією параметрів постійно вивчається, що зазначено у вітчизняній та зарубіжній технічній літературі, наприклад [2]. Проте є ще напрями, які необхідно додатково вивчати.

Відомо [3], що кристалізація розплавленого металу у зварювальній ванні визначається фізико-хімічними характеристиками розплаву. Накладення на таку систему зовнішнього імпульсного впливу чи модуляції може запровадити істотні корективи при

кристалізації. Процес кристалізації ванни та утворення структурних складових у наплавленому металі при наплавленні модульованим струмом у багатьох складових має свої особливості, частково вже досліджені [4].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. До цього часу залишаються не до кінця дослідженими питання, пов'язані зі структурою металу наплавлених шарів, виконаних із застосуванням модуляції силових характеристик дугового процесу. При цьому дуже важливим є отримання результатів, які можуть бути основою для подальшого ходу досліджень, а також застосування при розробці технологічних процесів практичних робіт із наплавлення різних вузлів та деталей з їхніми специфічними особливостями.

Мета запропонованої роботи полягає у виявленні та описанні особливостей формування структури наплавленого металу модульованим струмом із подальшим використанням результатів дослідження для підвищення якісних показників наплавленних поверхонь. Для вирішення поставленої мети на основі комплексних експериментальних досліджень необхідно розглянути та проаналізувати основні можливості, які дає наплавлення з модуляцією режимів, що мають можливість широкого регулювання частот та шпаруватості з визначенням їхнього впливу на властивості наплавленого валика. При цьому важливою є розробка та побудова математичних моделей, що визначають вплив параметрів модуляції на одну з основних характеристик покриття – твердості.

Виклад основного матеріалу. Наплавлення як техніка та технологія реновації поверхонь може бути істотно розширене із введенням нових техніко-технологічних рішень, що дозволяють забезпечити міцніші наплавлені шари, отримати можливість управління геометричними параметрами наплавлених валиків, що, зокрема, знижує витрати на подальші роботи з надання результатам наплавлення необхідного товарно-експлуатаційного виду. Організація процесу модульованого наплавлення може бути здійснена за допомогою джерела зварювального струму, електродвигуна механізму подачі електродного дроту. Можна помітити, що інші системи зварювального обладнання можуть створювати періодичні зміни параметрів дугового процесу, наприклад, електричні й механічні коливальні дуги і вироботи.

У процесі дослідження впливу параметрів наплавлених валиків і шарів при наплавленні модульованим струмом використовувався автомат А-874Н з випрямлячем ВДУ-506, Модуляція параметрів режиму проводилася за допомогою дослідної приставки модулятор ОІ-10 [5] - конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона шляхом періодичної зміни частоти обертання вала приводного електродвигуна механізму подачі електродного дроту або за рахунок синхронізованого впливу на електричні ланцюги управління джерела живлення та електропривода двигуна подачі електродного дроту. При цьому змінюються за заздалегідь встановленими алгоритмами напруження джерела зварювального струму і швидкість подачі електродного дроту (струм дугового процесу). У модуляторі є два канали управління – для електропривода механізму подачі електродного дроту, а також задатчики рівнів максимальної та мінімальної вихідної напруги та максимальної та мінімальної частот обертання вала приводного електродвигуна і відповідно струму зварювання. Є також два задатчики часу дії імпульсу та паузи. На рис. 1 наведено приклади осцилограм струму та напруги дугового процесу при застосуванні модулятора для різних процесів та різних режимів наплавлення з використанням порошкового самозахисного електродного дроту ПП-АН-140 діаметром 2,0 мм.

Наплавлення виконували на стандартних зразках, виконаних з інструментальних сталей, переважно з матеріалів штампного інструменту, на основі спеціально розроблених матриць експериментів з подальшим металографічним аналізом перерізів отриманих валиків, а також вимірюванням механічних характеристик валиків і наплавлених шарів, у тому числі й багатошарових структур. Режими наплавлення вибиралися з умов стійкості дугового процесу та задовільного формування наплавлених валиків.

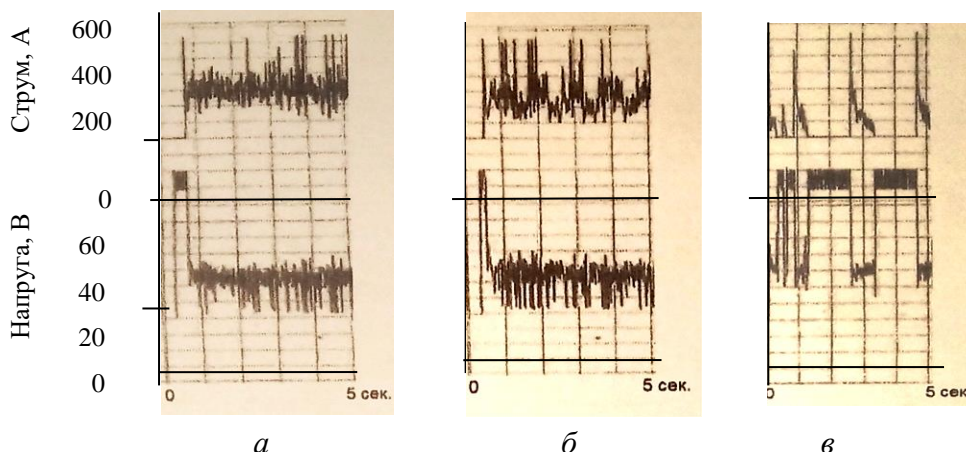


Рис. 1. Осцилограми процесу наплавлення з модуляцією струму за рахунок зміни частоти обертання вала приводного електродвигуна:

а – стаціонарна дуга, струм дуги $I_d = 290$; напруга дуги $U_d = 25$ В; швидкість зварювання; $v_{св} = 10,5$ М/год; виліт електродного дроту $L = 0,02$ М
 б – модульований струм: $I_d = 290$; $U_d = 25$ В; $v_{св} = 10,5$ М/год; $L = 0,02$ М; $t_i = 0,8$ С; $t_n = 0,2$ С;
 в – модульований струм: $I_d = 120$; $U_d = 29$ В; $v_{св} = 10,5$ М/год; $L = 0,02$ М; $t_i = 0,2$ С; $t_n = 0,8$ С
 Джерело: розроблено авторами.

Для вирішення техніко-технологічних завдань, а також прогнозування основних результатів наплавлення із застосуванням модуляції зварювального струму необхідний певний математичний та візуальний апарат. У цьому випадку запропоновано вирішити це завдання із застосуванням математичної моделі з графічним описом та отриманням виразів, що описують шукані залежності твердості наплавлених валиків від параметрів модуляції порівняно з наплавленням стаціонарною дугою.

Розробка математичної моделі залежності величин, твердості H , ударної в'язкості та результатів випробувань на вигин від відповідних значущих параметрів модуляції процесу наплавлення частоти імпульсів s , $H = f(s)$, жорсткості режиму модуляції $Q = t_n/t_u$, де t_n , t_u – час дії паузи та імпульсу відповідно і від співвідношення часів дії імпульсу та паузи $H = f(Q)$ базувалася на експериментальних дослідженнях результатів наплавлення із застосуванням методів регресійного аналізу зі складанням матриці планування експерименту.

Складено матрицю діючих факторів (плану експериментів), а також результатів вимірювання за методикою роботи [6], де x_1 , x_2 , – часи дії імпульсу та паузи відповідно; x_3 , x_4 , струм в імпульсі та паузі відповідно. Матриця представлена в табл. 1.

Таблиця 1
 Матриця плану експериментів та результати вимірів

№	Фактори				Твердість	Ударна в'язкість, KCV	Вигин σ
-	x_1	x_2	x_3	x_4	HRC	Дж/см ²	МПа
1	+	+	+	+	57	2,5	1100
2	-	+	+	-	53	4,0	2400
3	+	-	+	-	50	6,0	2650
4	-	-	+	+	56	8,0	2750
5	+	+	-	-	52	10,0	2850
6	-	+	-	+	6,1	12,0	2950
7	+	-	+	-	64	14,0	3200
8	-	-	-	-	54	18,0	3400

Рівняння регресії, складені на підставі розглянутої матриці мають вигляд:

$$HRC_s = 53,9 - 1,3125x_1 + 1,062x_2 - 1,875x_3 + 1,625x_4; \tag{1}$$

$$KCV = 9,3 + 1,8x_1 + 3,2x_2 + 12x_3 + 1,6x_4; \tag{2}$$

$$\sigma_{изг} = 2650 + 230x_1 + 38x_2 + 346x_3 + 268x_4. \tag{3}$$

Зазначимо, що твердість (мікротвердість) металу наплавлення вимірювалася на мікротвердомірі М400 фірми «LECO» з відповідним програмним забезпеченням при навантаженні 0,1 кг.

Вимірювання ударної в'язкості проводилося за Шарпом, а випробування на вигин виконувались за методикою ГОСТ 14019-2003.

Для реалізації результатів експерименту з візуалізації залежностей механічних характеристик наплавлених валиків від параметрів модуляції на рис. 2, 3, 4 та 5, представлені залежності $H = f(\Pi)$, які визначені на підставі матриці. Π – параметр, від якого залежить характеристики наплавленого валика. З-поміж таких характеристик визначені найважливіші з них: частота, жорсткість модуляції, співвідношення часів імпульс – пауза. Цифрами 1, 2, 3 на графіках позначені лінії при наплавленні стаціонарною дугою; лінія, одержана на підставі математичної регресійної моделі; лінія апроксимації відповідно.

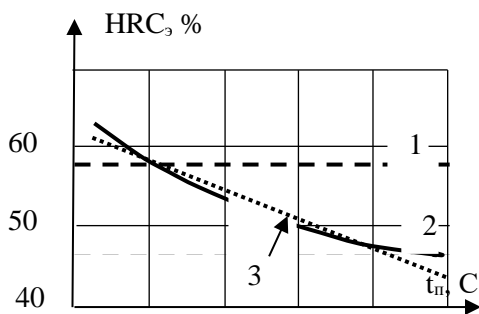


Рис. 2. Залежності твердості наплавленого металу від часу дії паузи при постійному часі дії імпульсу $t_i - 0,1$ с: 1 – стаціонарна дуга; 2 – модульований струм; 3 – лінія апроксимації

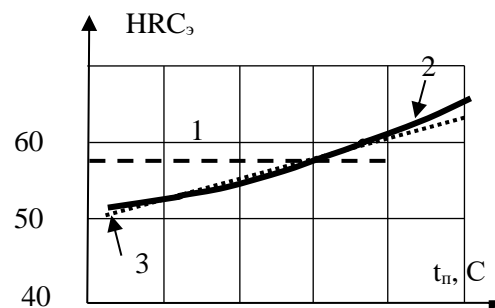


Рис. 3. Залежності твердості наплавленого металу від часу дії паузи при постійному часі дії імпульсу $t_i - 0,8$ с: 1 – стаціонарна дуга; 2 – модульований струм; 3 – лінія апроксимації

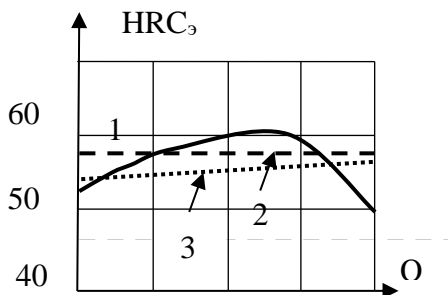


Рис. 4. Залежності твердості наплавленого металу від шпаруватості процесу Q зі стаціонарною дугою (1) і модульованим струмом (2); 3 – лінія апроксимації
Джерело: розроблено авторами.

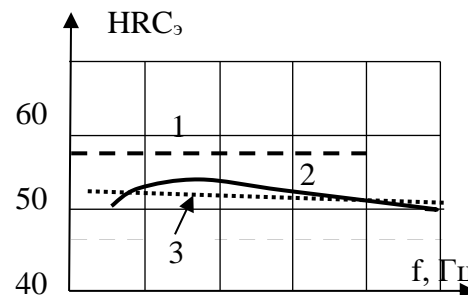


Рис. 5. Залежності твердості наплавленого металу від частоти процесу зі стаціонарною дугою (1) і модульованим струмом (2); 3 – лінія апроксимації

Використовувалися режими наплавлення: струм – 220-240 А; напруга 24-26 В; швидкість ведення процесу – 10,5 м/годину; виліт електродного дроту – 0,02-0,025 м.

Можна відзначити, що показані залежності можуть з певним ступенем точності достатньою для оцінок та подальшого прогнозування описані звичайними лінійними рівняннями по лініях 3 на рис. 2-5 у вигляді

$$H = H_1 + \frac{(\Pi - \Pi_1)(H_2 - H_1)}{\Pi_2 - \Pi_1}. \quad (4)$$

Параметри H_1 , H_2 , P_1 , P_2 відповідають крайнім точкам прямих ліній апроксимацій 3 на рис. 2-5.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що модуляція струму дугового процесу значною мірою впливає на одну з найважливіших характеристик наплавленого металу – твердість. Аналогічні результати характерні для досліджених характеристик ударної в'язкості та випробуваннях на вигин.

Основним фактором, зазначеним у технічній літературі [7], який впливає на міцність характеристики і твердість зокрема, є процеси кристалізації наплавленого валика. Ці процеси схильні до впливу періодичних змін режимів дугових процесів, що належить до різного виду імпульсних режимів основних систем зварювального обладнання. Це доказово розглянуто нашої роботі [8].

Наплавлення з модуляцією режимів належить до процесів, що значною мірою впливають на структуру наплавленого металу і металу навколошовної зони. Очевидно, зміна характеристик твердості, розглянута вище на підставі розроблених математичних моделей, є наслідком зміни структури наплавленого валика і кристалів зокрема.

Відмінною особливістю первинної структури наплавленого металу модульованим струмом є періодичність формування кристалізаційних шарів. Характерне формування цих шарів представлено в порівняльному вигляді на рис. 6, б, в. Зазначена періодичність проявляється в чергуванні «тонких» та «товстих» шарів за висотою наплавленого металу. При цьому товщина «товстих» шарів зменшується до верха. Порівняльне зіставлення товщини аналогічних шарів показує, що при модульованому струмі в 2...3 рази тонше, ніж при наплавленні із застосуванням стаціонарного режиму.

Іншими важливими відмінними рисами металу при модульованому струмі є відсутність транскристалізаційних структур.

Спільним для первинних структур є наявність стовпчастих кристалітів орієнтованих у напрямку фронту кристалізації металу й шаруватість у вигляді темних і світлих смуг, що чергуються.

Розрізняються ці структури характером чергування та зміни товщини кристалізаційних шарів за висотою шва. Товщина кожного наступного по висоті шару кристалізаційного шару змінюється при віддаленні від кореня шва. Первинна структура металу наплавленого стаціонарною дугою характеризується наявністю грубих форм затвердіння.

Про вплив модульованого струму процесу наплавлення на умови кристалізації металу зварювальної ванни свідчить хвилеподібна форма на межі сплавлення шва з основним металом, виявлена на поздовжніх мікрошліфах шляхом зняття з них сірчаних відбитків за Бауменом (рис. 7). У результаті дослідження шліфів було встановлено, що кристалізація шарів розплаву при стаціонарному наплавленні відповідає відомому механізму природної періодичності процесу [9] полягає в тому, що зростання кристалітів пе-

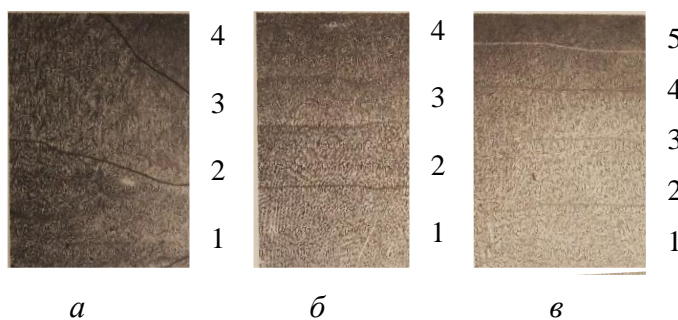


Рис. 6. Первинна структура наплавлених валиків (x32): а – стаціонарна дуга;

б – модульований струм частота 1,1 Гц;

в – модульований струм частота 2,5 Гц;

1 корінь шва; 2 та 3 – середина шва; 4, 5 верх шва
Джерело: розроблено авторами.

ріодично припиняється і відновлюється під дією теплових процесів у металі зварювальної ванни, причому на початку процесу кристалізації така періодична зміна швидкості зростання відбувається з більшою частотою, ніж на завершальній стадії кристалізації.

При наплавленні модульованим струмом характер кристалізації як періодичного процесу накладає відбиток імпульсний підведення тепла з боку зварювальної дуги. Під час «паузи» в результаті відносного охолодження розплаву середня швидкість кристалізації збільшується і градієнт температури на міжфазному кордоні різко зменшується.

Під час «імпульсу» відбувається деяке підплавлення металу, що закристилізувався, і збільшення градієнта температур на міжфазному кордоні. Таким чином, здійснюється примусова кристалізація. Треба зазначити, що термін «примусова кристалізація», наскільки нам відомо з технічної літератури використаний в аналізованому процесі вперше і може бути додатково обговорений.

Для визначення структури наплавленого металу був виконаний цикл порівняльних наплавів з наступними металографічними дослідженнями мікроструктур поперечних перерізів отриманих валиків на поперечних шліфах, вирізаних із середньої частини наплавленого металу.

Формування валиків досліджували плоских зразках зі сталі 45.

Погонну енергію процесу для наплавлення модульованим струмом розраховували за залежністю

$$g = \frac{60[I_u U_u c + I_n U_n (1 - c)]}{v_{cv}}, \quad (5)$$

де c шпаруватість імпульсу; v_{cv} – швидкість ведення дугового процесу.

Режими наплавлення наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Способи та режими процесу наплавлення щодо характеристик кристалізації

Характеристика способу наплавлення	Режим паузи				Режим імпульсу			Погонна енергія кДж/см
	I_n, A	U_n, B	t_n, C	$v_{cv}, M/C$	I_n, A	U_n, B	t_n, C	
	а	б	в		а	б	в	
Наплавлення стаціонарною дугою	290	25	-	18	-	-	-	46,4
Наплавлення модульованим струмом 1	260	26	0,8	18	120	29	0,1	25,96
Наплавлення модульованим струмом 2	260	26	0,1	18	120	29	0,8	13,36

Ряд експериментальних наплавів виконувався із застосуванням спеціально розробленого вимірювача витрат енергії [10]. Результати вимірювання витрат електроенергії на ведення процесу наплавлення представлені в табл. 2.

У табл. 2 I_n, I_n – струм зварювання (наплавлення) відповідно в імпульсі та паузі. U_n, U_n – напруга на дузі відповідно в імпульсі та паузі; t_n, t_n – тривалість відповідно імпульсу та паузи. Ці характеристики вибиралися за величиною такими, щоб процес наплавлення протікав стабільно, а формування валиків мало задовільний характер.

На рис. 8 представлені мікрошліфи наплавлених валиків, виконаних на поперечних зразках для стаціонарних і модульованих режимів. З метою виявлення у швах мікрохімічної та структурної неоднорідності використовували методику травлення зразків у розчинах, що обмежують, різної концентрації пікринової кислоти.

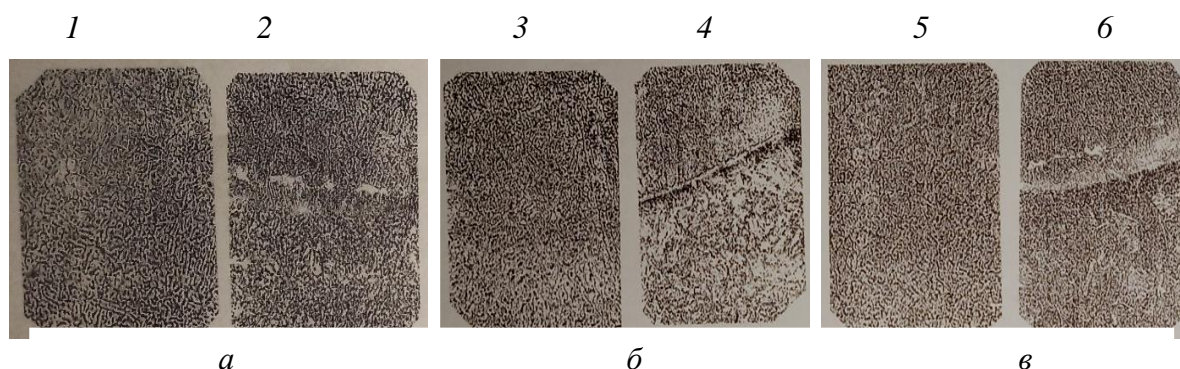


Рис. 8. Мікроструктура наплавленого металу ($\times 240$): а – наплавлення стаціонарною дугою: 1 – наплавлений метал; 2 – лінія сплаву; б, в – наплавлення модульованим струмом: 3, 5 – наплавлений метал; 4, 6 – лінія сплавлення

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження зразків здійснювалося на оптичних мікроскопах Neophot 21 та Polyvar зі збільшенням Х50 - Х500. Фотографії мікрошліфів виконували за допомогою цифрової камери Olympus.

Видно істотні зміни в структурі металу наплавленого стаціонарною дугою і модульованим струмом. Структури із застосуванням модуляції являють собою мартенсит з помірним вмістом залишкового аустеніту та з великою кількістю карбідної та карбоборидної фази. Результати аналізу механічних властивостей наплавленого шару у значеннях твердості з розрахунковими величинами тепла у відповідність до рівняння (5) представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Механічні властивості металу наплавленого валика

Режим подачі електродного дроту	Введена теплота процесу, Дж/С	Мікротвердість, Н	Твердість, HRC _{0,1}	Ширина зони сплавлення, мкм
Стаціонарний	4460	590	57-59	26-52
Модульований із частотою 0,5 Гц	2225	677	60-63	26-62
Модульований із частотою 1,1 Гц	2597	502-509	46-49	12-30

Очевидно, що розглянута технологія наплавлення із застосуванням модуляції силових характеристик дугового процесу задає час формування ванни рідкого металу, а також умови й час її кристалізації. У цьому з урахуванням умов керованого температурного режиму формуються певні (оптимальні) структурно – фазові перетворення, які в досить широкому діапазоні впливають на процеси кристалізації як і в рідкій, так і у твердій фазах.

Зазначені відмінності в характері процесу кристалізації позначилися на формуванні елементів первинної структури.

Дуже важливим показником структури наплавленого металу є рівень частки основного металу порівняно з часткою електродного матеріалу, що має певні властивості, які необхідні для забезпечення експлуатаційних властивостей валика, що наплавляється, або шару загалом.

При одношаровому наплавленні використання можна вибрати режими дугового процесу, які дозволяють зменшити частку основного металу до 0,3-0,45. При використанні модульованих режимів роботи механізованого або автоматичного обладнання як показують наші дослідження хімічного складу наплавленого металу ця частка може бути зменшена до 0,25 і навіть менше.

Треба зазначити, що збільшення погонної енергії наплавлення, незалежно від варіанта використання технології, у півтора раза збільшує розміри кристалітів.

При експериментах із наплавленням модульованим струмом тривалість кристалізації одного шару металу, зумовлена імпульсним підведенням тепла у зварювальну ванну (примусова кристалізація) виявилася втричі менше періоду природної кристалізації при зварюванні (наплавленні) на стаціонарному режимі. Це означає, що за той час, протягом якого кристалізується один шар у режимі наплавлення на постійному струмі, при наплавленні модульованим струмом встигає закристалізуватися три і більше залежно від режиму модуляції – за рахунок нагрівання металу до температури вище температури плавлення протягом кожного імпульсу струму й охолодження нижче температури кристалізації з подальшим затвердінням шару протягом кожного циклу. Це є підставою вважати, що розміри кристалітів будуть значно меншими, ніж за звичайних умов наплавлення.

Проведений цикл досліджень з визначення ширини кристалізаційних шарів і ширини кристалітів у різних місцях наплавлених валиків при різних способах наплавлення представлений на рис. 9 та 10 відповідно. На рисунках літерами *a*, *б* позначені графіки ширини кристалітів (рис. 9) і ширини кристалізаційних шарів (рис. 10) у положеннях від кореня наплавлення до вершини валика з урахуванням середини: *a* – стаціонарна дуга; *б* – модульований процес частота 1,1 Гц; *в* – модульований процес частота 2,5 Гц. Треба зазначити – швидкість ведення процесу, яка встановлюється однаковою для всіх режимів та способів наплавлення.

Можна вказати, що виміряні та вказані на рис. 9 та 10 величини ширини шарів і розміри кристалітів свідчать про управління цими параметрами при використанні модульованих режимів наплавлення, а зниження цих параметрів підвищення механічних (експлуатаційних) характеристик результатів наплавлення.

Можна додатково відзначити, аналізуючи мікроструктури поперечних перерізів наплавлених валиків, що структура металу наплавленого з модуляцією струму більш щільна зі значним зниженням включень і з більшою дезорієнтацією кристалітів, ніж при наплавленні стаціонарною дугою.

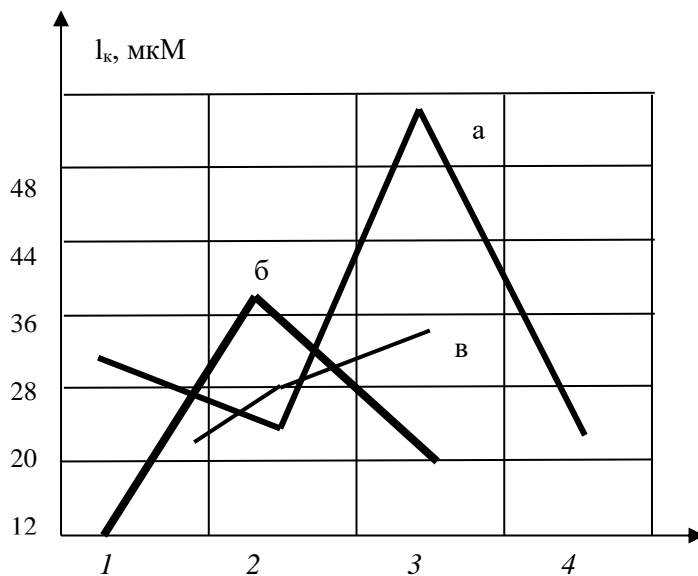


Рис. 9. Ширина кристалітів:
1 – корінь шва; 2 – середина шва; 3 – верх шва
Джерело: розроблено авторами.

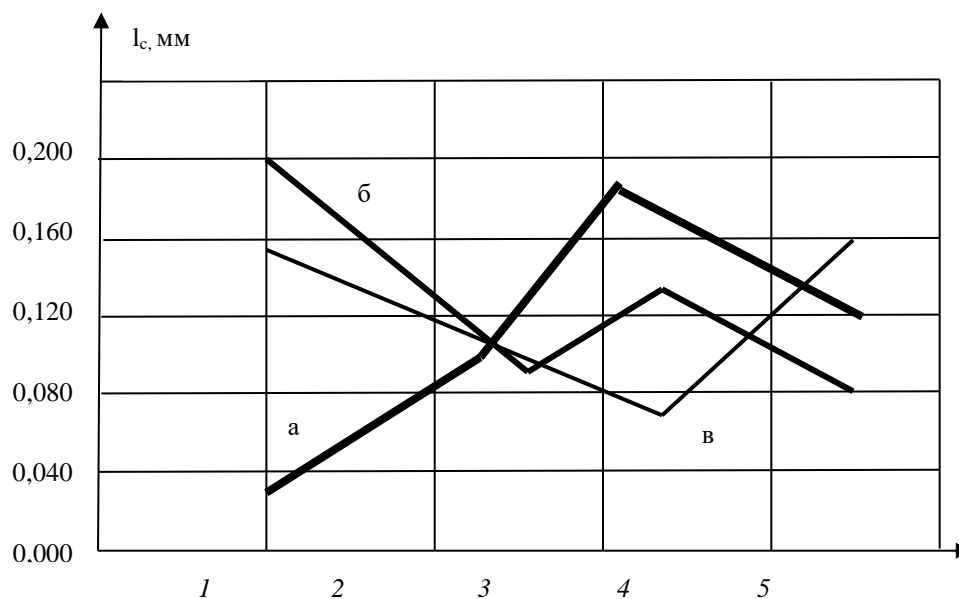


Рис. 10. Ширина кристалізованих шарів:

1 – корінь шва; 2, 3 – середина шва; 4 – верх шва

Джерело: розроблено авторами.

Модуляція зварювального струму може бути з успіхом застосована і при зварюванні, коли модульований забезпечується за рахунок механічного коливання зварювального інструменту поперек зварюваного або наплавлюваного виробу. Слід зупинитися ще на одному перспективному напрямі, яке забезпечує зварювання – наплавлення зі зміною параметрів горіння дуги рахунок механічних впливів. Це передусім модуляція дугових процесів з примусовими гармонічними коливаннями ванни розплавленого металу за рахунок цілеспрямованих рухів виробу, що наплавляється. Така технологія досить докладно описана в роботі [11].

Механічні впливи, крім отримання модулюючих режимів горіння дуги значно розширюють ширину наплавленого валика.

Застосування модуляції зварювального струму робить можливим розширення застосування розглянутих способів зварювання та наплавлення.

Висновки.

1. Імпульсний характер горіння дуги при зварюванні (наплавленні) порошковим дротом впливає на формування мікроструктури наплавленого металу.

2. При наплавленні модульованим струмом на досліджених режимах кристалізація металу зварювальної ванни відбувається більш дрібними порціями і з вищою швидкістю в кожному окремому шарі. Періодичність процесу кристалізації визначається параметрами імпульсів та умовами відведення тепла з ванни в основний метал. У разі наплавлення модульованим струмом відстань між окремими шарами кристалізації в 3 рази менше, а самі шари тонші.

3. Первинна структура металу швів, отриманих при наплавленні модульованим струмом, відрізняється високою дисперсністю. Значення таких параметрів структури, як відстань між осями дендридів, площа перерізу зерен аустеніту в цьому варіанті технології на 35-40 % менше, ніж при зварюванні (наплавленні) стаціонарною дугою.

4. Особливості термічного циклу при наплавленні модульованим струмом порівняно з наплавленням стаціонарною дугою зумовлюють гальмування процесу утворення великих кристалів. Можна вважати, що зазначені особливості формування структури є причиною зміни службових властивостей металу.

5. Регресійні математичні моделі впливу зміни параметрів модуляції на показники твєрдості наплавленого шару є основою для вибору найбільш ефективних значень частоти, шпаруватості процесу для досягнення мети: отримання певних якостей покриття, яке виконується електродуговим способом з використанням порошкового електродного дроту.

Список використаних джерел

1. Рябцев И. А. Теория и практика наплавочных работ / И. А. Рябцев, И. К. Сенченков. – К. : Екотехнологія, 2013. – 400 с.
2. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34-43.
3. Александров В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебное пособие. Часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения / В. М. Александров. – Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.
4. Болдырев А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну / А. М. Болдырев // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 1-3.
5. Лебедев В. А. О выборе оборудования для наплавки пульсирующей дугой матриц штампов / В. А. Лебедев, В. А. Тищенко // Автоматическая сварка. – 1997. – № 8. – С. 51-52.
6. Губин С. В. Теория планирования экспериментов в энергетике : курс лекций для высших технических учебных заведений / С. В. Губин, А. И. Яковлев. – К. : Миллениум, 2009. – 158 с.
7. Морозов В. П. Особенности процесса кристаллизации металла расплавленной ванны при дуговой импульсно-периодической сварке [Электронный ресурс] / В. П. Морозов // Наука и Образование. – 2010. – № 8. – С. 1-16. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru>.
8. Определение параметров импульсного механического воздействия на сварочную ванну для структуризации металла при автоматической дуговой наплавке / В. А. Лебедев, С. В. Драган, А. Ф. Галь, О. А. Козырко // Збірник наукових праць НУК. Обробка матеріалів у машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 19-26.
9. Флемингс М. Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М. : Мир, 1977. – 424 с.
10. Лебедев В. А. Устройство для оценки энергоэффективности процессов / В. А. Лебедев, М. В. Гулый, Г. А. Плехотко // Сварка и диагностика. – 2011. – № 3. – С. 50-53.
11. Lebedev V. O. Influence of weld harmonic oscillations by frequency up to 4,5 Hz on to the metal structure formation of weld bead and heat affected zone / V. O. Lebedev, T. G. Solomiichuk, S. V. Novikov // Shipbuilding and marine infrastructure. – 2018. – № 2. – С. 168-172.

References

1. Ryabcev, I.A., & Senchenkov, I.K. (2013). *Teoriia i praktika naplavochnyh rabot [Theory and practice of surfacing]*. Ekotekhnologiya.
2. Pohodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., & Ryabcev, I.A. (2010). Issledovaniia i razrabotki IES im. E. O. Patona v oblasti elektroduhovoї svarki i naplavki poroshkovoi provolokoi (Obzor). *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (12), 34-43.
3. Aleksandrov, V.M. (2015). Materialovedenie i tekhnologiiia konstruksionnykh materialov. Chast 1. Materialovedenie. Standart tretogo pokoleniia [Materials science and technology of structural materials. Part 1. Materials science. Standard of the third generation]. *Severnyi (Arkticheskii) federalnyi universitet*.
4. Boldyrev, A.M. (1976). O mekhanizme formirovaniia struktury metalla shva pri vvedenii nizkochas totnyh kolebaniı v svarochnyuyu vannu [On the mechanism of formation of the structure of the weld metal when low-frequency oscillations are introduced into the weld pool]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, (2), 1-3.
5. Lebedev, V.A., & Tishchenko V.A. (1997). O vybore oborudovaniya dlya naplavki pulsiruiushchei dugoi matric shtampov [On the choice of equipment for surfacing with a pulsed arc of die matrices]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (8), 51-52.
6. Gubin, S.V., & Yakovlev, A.I. (2009). Teoriia planirovaniya eksperimentov v energetike [Theory of planning experiments in the energy sector]. *Kurs lektzii dlia vysshih tekhnicheskikh uchebnykh zavedenii – Course of lectures for higher technical educational institutions*. Millenium.

7. Morozov, V.P. (2010). Osobennosti processa kristallizacii metalla rasplavlennoj vanny pri dugovoj impul'sno-periodicheskoj svarke [Features of the process of crystallization of the metal of the molten pool in arc pulse-periodic welding]. *Nauka i Obrazovanie – Science and Education*, (8), 1-16. <http://technomag.edu.ru>.

8. Lebedev, V.A., Dragan, S.V., Gal, A.F., & Kozyrko, O.A. (2016). Opredelenie parametrov impul'snogo mekhanicheskogo vozdeystviya na svarochnogo vannu dlya strukturizacii metalla pri avtomaticheskoy dugovoj naplavke [Determination of the parameters of pulsed mechanical action on the weld pool for metal structurization during automatic arc welding]. *Zbirnik naukovih prats NUK. Obrobka materialiv u mashinobuduvanni – Collection of scientific works of NUS. Processing of materials at machine-building*, (1), 19-26.

9. Flemings, M. (1977). *Processy zatverdevaniia [Solidification processes]*. Mir.

10. Lebedev, V.A., Gulyi, M.V., & Plekhotko, G.A. (2011). Ustroistvo dlia otsenki energoeffektivnosti processov [Device for assessing the energy efficiency of processes]. *Svarka i diagnostika – Welding and Diagnostics*, (3), 50-53.

11. Lebedev, V.O., Solomiichuk, T.G., & Novikov, S.V. (2018). Influence of weld harmonic oscillations by frequency up to 4,5 Hz on to the metal structure formation of weld bead and heat affected zone. *Shipbuilding and marine infrastructure*, (2), 168-172.

Отримано 15.02.2022

UDC 621.791.927.5

Vladimir Lebedev¹, Victor Tishchenko², Serhii Loi³

¹Doctor of Technical Sciences, Chief Designer SF “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²Leading Engineer

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: irvik1947@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6081-8531>

³Associate Professor of the Department of Welding

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University (Kherson, Ukraine)

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

FEATURES OF STRUCTURAL FORMATION OF METAL IN ELECTRIC ARC MECHANIZED SURFACES WITH MODULATION MODULES

The article investigates the features of ensuring the hardness of surface hardening and restoration of machine parts and mechanisms using the method of modulated current surfacing. Preliminary research on methods and results of surface hardening has been studied. A cycle of experiments was planned and performed using a number of variable parameters of the arc process. The results of experimental researches received at surfacing with modulation of modes of arc process with the controlled characteristics of the modulated influence are presented and analyzed. All studies for comparison were performed with stationary and modulated processes. A mathematical model of the dependences of the hardness of the deposited layers on the main modulation parameters has been developed. Regression analysis is used to create a mathematical model. Graphs of such dependences are constructed for an example and visualization. Microsections of surfacing with definition of features of structure of metal are considered. It is established that the parameters of modulation of surfacing modes significantly affect the characteristics of the deposited layer and can be significantly improved. The research used common equipment - surfacing machine and current source, as well as a special modulator and flux cored wire. The microsections of the sections of the welded rollers made in comparison with the formation of certain conclusions about the structures of the surfacing metal are considered and studied. Substantiated conclusions about the increase of hardness are the consequences of structural transformations of the weld metal under the action of modulated influence. It is noted that the obtained results can serve as a basis for purposeful selection of parameters of the modulated surfacing process to obtain a coating with a better layer, as well as to predict the surfacing properties. Surfacing using a modulation cycle can be common in various industries.

Key words: arc surfacing; melting electrode; modulation of modes; parameters; experiments; processing of results; mathematical models.

Fig.: 10. Table: 3. References: 11.