

DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.2.2020.207377>

УДК 621.791:614.8

Левченко О.Г., д.т.н., проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

Лук'яненко А.О., к.т.н., с.н.с.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона,

Полукаров Ю.О., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ГІГІЄНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗОВАНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З ІМПУЛЬСНИМ ПОДАВАННЯМ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ

Levchenko O.G., Dr. Eng. Sc., Prof.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,

Lukianenko A.O., Cand. Eng. Sc., Senior Researcher

E.O.Paton Electric Welding Institute,

Polukarov Y.O., Cand. Eng. Sc., Ass. prof.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

HYGIENIC CHARACTERISTICS OF MECHANIZED ARC WELDING WITH PULSE FLUX-CORED WIRE FEEDING

Мета. Визначення можливостей впливу процесу дугового механізованого зварювання з керованим імпульсним подаванням порошкового електродного дроту на гігієнічні характеристики процесу зварювання та вибір режимів зварювання, що забезпечують зниження виділень шкідливих речовин. **Завдання.** Дослідити залежності показників рівнів виділень шкідливих речовин зварювального аерозолі від режиму зварювання для вибору оптимальних параметрів на прикладі зварювання з керованим імпульсним подаванням. Ключовим досліджуваним параметром була інтенсивність виділення зварювального аерозолі. Дослідження проводилися методом «повного уловлювання», заснованому на принципі фільтрування всього обсягу відсмоктуваного з укриття повітря на фільтрі ФПП, установленому на шляху руху. **Результати дослідження.** Показано переваги та можливості зменшення виділень шкідливих речовин у повітря робочої зони за рахунок застосування зварювання з імпульсним подаванням дроту та вибору відповідних параметрів режимів зварювання. Встановлено, що інтенсивність утворення зварювального аерозолі, кількість основних компонентів і їх масова частка у складі зварювального аерозолі чутливі до зміни напруги в межах $\pm 1,5-2$ В, яке відбувається за умови імпульсного подавання електродного дроту. **Наукова новизна.** Гігієнічно обґрунтовано використання режимів зварювання з керованим імпульсним подаванням електродного дроту. **Висновки та практичне значення.** Механізоване зварювання з керованим імпульсним подаванням порошкового дроту дає можливість поліпшувати гігієнічні характеристики цього процесу в порівнянні зі зварюванням із безперервним подаванням дроту і до певної міри керувати ними. Отримані результати досліджень рекомендується використовувати для поліпшення умов праці зварників за рахунок вибору відповідних режимів зварювання з керованим імпульсним подаванням порошкового дроту. Подібну оптимізацію умов праці зварника можливо досягти за умови точного налаштування параметрів імпульсного подавання електродного дроту та правильного підбору зварювальних матеріалів.

Ключові слова: дугове зварювання; механізоване обладнання; порошковий дріт; імпульсне подавання; гігієнічні характеристики; зменшення виділень аерозолів.

ВСТУП

У промисловому виробництві всіх розвинутих країн світу широко застосовують різноманітні технології зварювання. На сьогоднішній день, окрім якості зварювального з'єднання, до важливих критеріїв, що зумовлюють вибір способу зварювання, належать і гігієнічні характеристики технологічного процесу та зварювальних матеріалів. Наразі науковці намагаються розробляти такі способи та технології зварювального процесу, які б одночасно забезпечували високий рівень якості зварювальних стиків, заощаджували енергію й ресурси та поліпшували захист працюючих і довкілля від шкідливих чинників. Найбільш прогресивним напрямком, у цьому сенсі, є механізоване й автоматизоване електродугове зварювання та наплавлення.

Актуальність теми полягає у вирішенні проблем захисту зварника та довкілля через зменшення викидів шкідливих речовин у повітря робочої зони.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Механізоване електродугове зварювання та наплавлення порошковим дротом забезпечує високу продуктивність процесу, якість наплавленого металу, підвищення ресурсу наплавлених деталей та зниження витрат на експлуатацію устаткування. При цьому використання гігієнічних можливостей порошкового дроту, схем управління електричними параметрами джерел зварювального струму [1] та імпульсного подавання електродного дроту дозволяє знижувати рівень виділень зварювального аерозолу (ЗА) [2-4]. Так, на основі комп'ютеризованого вентильного швидкодіючого безредукторного електроприводу з повністю керованими параметрами імпульсного руху електродного дроту (величини швидкостей в імпульсі і реверсі, часу дії імпульсів і пауз, частоти імпульсів, величини шпаруватості) можна підвищувати якість зварних з'єднань, керувати геометричними параметрами зварного шва, знижувати енерго- і ресурсовитрати на процес зварювання і, ймовірно, знижувати виділення шкідливих речовин у повітря робочої зони. Останнє залишається досить актуальним завданням при вирішенні проблеми захисту зварника і навколишнього середовища від неминучих шкідливих виділень ЗА [2, 5-7].

Постановка завдання. Метою цієї роботи є визначення можливостей впливу процесу дугового зварювання з керованим імпульсним подаванням порошкового електродного дроту на гігієнічні характеристики процесу зварювання і вибір режимів зварювання, що забезпечують зниження виділень шкідливих речовин

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Для цього досліджували залежності інтенсивності (V_a) і питомого виділення ЗА (G_a), вмісту марганцю, хрому 3-х валентного, нікелю, фтору розчинного і фтору нерозчинного (хром 6-ти валентний не виявлений) в ЗА у масових відсотках (C_{Mn} , C_{Cr}^{3+} , C_{Ni} , C_{Fp} , C_{Fn}), інтенсивності виділень цих компонентів (V_{Mn} , V_{Cr}^{3+} , V_{Ni} , V_{Fp} , V_{Fn}) та їх питомих виділень (G_{Mn} , G_{Cr}^{3+} , G_{Ni} , G_{Fp} , G_{Fn}) від режиму зварювання модульованим струмом у вуглекислому газі (CO_2). У якості зварювального матеріалу застосовувати порошковий дріт марки Велтек Н 320 діаметром 1,6 мм, який широко використовується в самих різних галузях промисловості: на залізничних підприємствах, комбінатах гірничо-металургійного комплексу, заводах металоконструкцій, машинобудівних заводах шахтного, транспортного, вантажопідйомного обладнання, у суднобудуванні, тепловозобудуванні та вагонобудуванні. Зварювання здійснювалось модульованим і

(для порівняння) безперервним струмом (200...250 А, 26...27 В). Змінювали частоту (f) імпульсів модульованого струму (20, 40, 60 Гц) за однакової шпаруватості (s) імпульсів і з різною шпаруватістю імпульсів (2, 3, 5, 7) за однакової частоти. Під терміном шпаруватість розуміють безрозмірний коефіцієнт, який характеризує періодичний імпульсний процес і чисельно дорівнює відношенню періоду повторення імпульсу до його тривалості.

Визначення гігієнічних показників виділень ЗА виконувалося відповідно до стандарту [8]. Дослідження інтенсивності виділення ЗА проводилися методом «повного уловлювання», заснованому на принципі фільтрування всього обсягу відсмоктуваного з укриття повітря на фільтрі ФПП, установленому на шляху руху. Для визначення хімічного складу ЗА користувалися методами санітарно-хімічного аналізу [9].

Результати досліджень наведено у табл. 1.

Отримані результати досліджень показують, що максимальна інтенсивність утворення ЗА має місце під час зварювання на режимі зі шпаруватістю $s = 3$ і 5 з частотою $f = 40$ Гц модульованим струмом (рис. 1). У випадку застосування всіх інших режимів зварювання модульованим і безперервним струмом вона зменшується.

Таблиця 1 – Гігієнічні характеристики зварювання порошковим дротом Велтек Н 320 модульованим та безперервним струмом

Режими зварювання		Показники рівнів виділень ЗА																
I _{зв} , А	U _д , В	V _а , г/хв	G _а , г/кг	Cr ³⁺			Mn			Ni			F _p			F _n		
				%	г/хв	г/кг	%	г/хв	г/кг	%	г/хв	г/кг	%	г/хв	г/кг	%	г/хв	г/кг
200-250	26-	Безперервне подавання дроту																
	27	1,007	22,69	1,16	0,012	0,26	3,32	0,033	0,75	1,31	0,013	0,30	4,43	0,045	1,005	15,91	0,016	3,61
f, Гц	s	Імпульсне подавання дроту																
20	2	0,949	21,38	0,78	0,007	0,17	3,14	0,03	0,67	1,14	0,011	0,24	4,08	0,038	0,87	13,51	0,13	2,89
	3	0,957	21,56	0,84	0,008	0,18	3,18	0,03	0,69	1,21	0,012	0,26	4,37	0,042	0,94	14,00	0,13	3,02
	5	0,929	20,92	0,79	0,007	0,17	3,10	0,029	0,65	1,17	0,011	0,24	3,84	0,036	0,80	13,89	0,13	2,91
	7	0,886	19,96	0,64	0,006	0,13	3,09	0,027	0,62	1,19	0,011	0,24	4,62	0,041	0,92	14,34	0,13	2,86
40	2	0,994	22,38	0,62	0,006	0,14	2,86	0,028	0,64	0,81	0,008	0,18	5,40	0,05	1,21	13,70	0,14	3,07
	3	1,058	23,84	0,51	0,005	0,12	3,18	0,03	0,76	0,75	0,008	0,18	5,56	0,06	1,33	14,23	0,15	3,39
	5	1,062	23,91	0,50	0,005	0,12	3,18	0,033	0,76	0,69	0,007	0,16	5,60	0,06	1,34	14,78	0,16	3,53
60	2	1,011	22,77	0,40	0,004	0,09	3,13	0,03	0,71	0,68	0,007	0,15	5,98	0,06	1,36	13,85	0,14	3,15
	3	1,007	22,69	0,37	0,004	0,08	3,00	0,03	0,68	0,69	0,007	0,16	5,43	0,055	1,23	13,95	0,14	3,17
	5	1,003	22,59	0,39	0,004	0,09	3,06	0,03	0,69	0,65	0,006	0,15	5,98	0,06	1,35	14,24	0,14	3,22

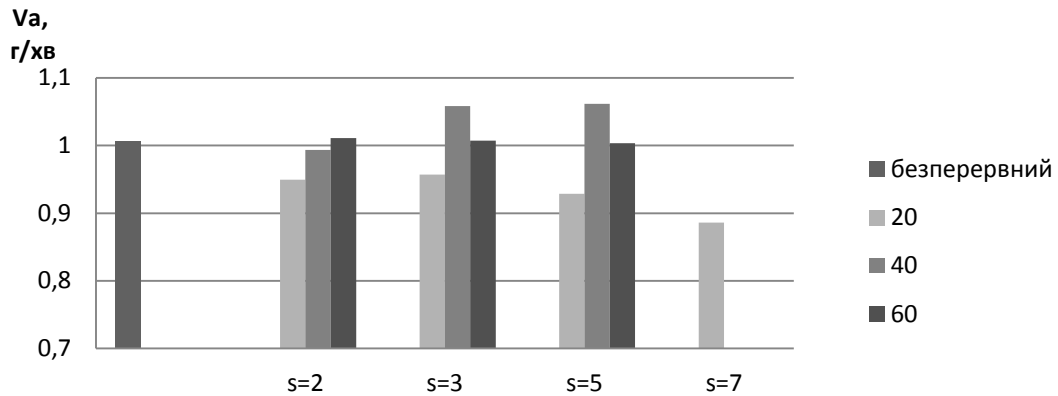


Рисунок 1 – Інтенсивність утворення ЗА (V_a) під час зварювання дротом марки Велтек-НЗ20 на різних режимах: безперервним струмом (200-250 А, 26-27 В); модульованим струмом ($f = 20, 40, 60$ Гц, $s = 2, 3, 5, 7$)

Результати досліджень залежностей інтенсивності утворення ЗА від частоти і шпаруватості імпульсів (рис. 2) показали, що при шпаруватості 2, 3 і 5 на частоті 20 Гц маємо мінімальне значення, далі при частоті 40 Гц досягає максимуму і потім знижується до 60 Гц, за винятком кривої зі шпаруватістю 2, яка після 40 Гц продовжує зростати.

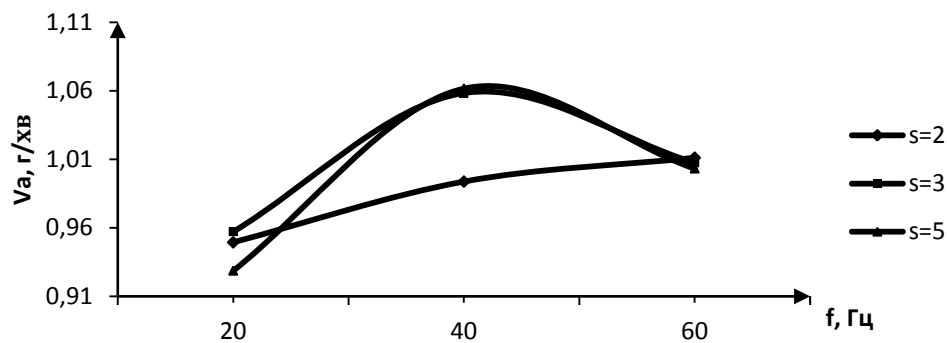


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності утворення ЗА (V_a) від частоти (f) і скважності (s) імпульсів зварювального струму

Масова частка шкідливих речовин у складі зварювального аерозолі при частоті 20 Гц зі шпаруватістю 2 зображено на рис. 3. Отримані дані показують, що найбільший відсоток у зварювальному аерозолі належить фторидам (1-е місце фтор нерозчинний (61,41%), на 2-му місці фтор розчинний (18,01%)), далі – марганець (13, 86%), нікель (5%) і хром 3-х валентний (3,44%) відповідно.



Рисунок 3 – Масова частка (% мас.) шкідливих речовин у складі ЗА при частоті 20 Гц зі шпаруватістю 2

Необхідно відзначити, що аналогічний вміст шкідливих речовин у ЗА також спостерігається під час зварювання на інших значеннях шпаруватості і частоти. На рис. 4 наведено масову частку шкідливих речовин у складі ЗА при зварюванні модульованим струмом на режимі $f = 20, 40, 60$ Гц зі шпаруватістю 3.

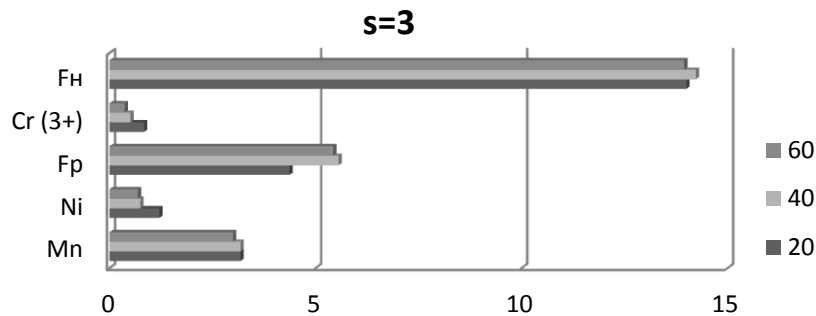


Рисунок 4 – Масова частка шкідливих речовин у складі ЗА при зварюванні дротом Велтек-Н320 модульованим струмом на режимі $f = 20, 40, 60$ Гц зі шпаруватістю 3

Отримані результати досліджень свідчать, що мінімальний вміст токсичного марганцю у складі ЗА забезпечується при зварюванні модульованим струмом на режимах з частотою 20 Гц і шпаруватістю 2 та частотою 60 Гц зі шпаруватістю 3 і 5 (таблиця 1). Найбільш висока масова частка марганцю має місце при зварюванні безперервним струмом.

Результати досліджень показують, що максимальна інтенсивність утворення марганцю та його питоме виділення має місце при зварюванні безперервним струмом. Порівнюючи режими зварювання модульованим і безперервним струмом, можна зробити висновок, що за гігієнічними характеристиками режим безперервним струмом не варто застосовувати для зварювання.

Дослідження залежностей інтенсивності утворення марганцю у складі ЗА від частоти і шпаруватості імпульсів (рис. 5) показали, що вони мають складні залежності. Так, крива залежності інтенсивності виділення марганцю при зварюванні зі шпаруватістю 2 на частоті від 20 до 40 Гц зменшується, а при збільшенні частоти до 60 Гц повертається до того ж значення, що і на частоті 20 Гц. На режимі зварювання зі шпаруватістю 5 крива такої залежності має протилежний вигляд: від 20 до 40 Гц збільшується та набирає максимуму, а від 40 до 60 Гц зменшується. На режимі зі шпаруватістю 3 крива на всіх частотах не змінюється (на різній частоті має те саме значення).

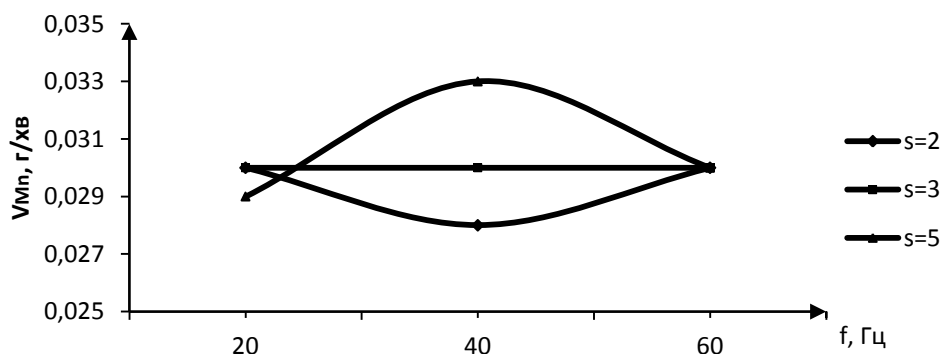


Рисунок 5 – Залежність інтенсивності утворення Mn (V_{Mn}) від частоти (f) і шпаруватості (s) імпульсів зварювального струму

Результати досліджень залежностей питомого виділення марганцю від частоти та шпаруватості імпульсів (рис. 6) показали, що вони також мають складні залежності. Так, на частотах імпульсів 20 і 60 Гц вони зменшуються, якщо шпаруватість імпульсів становить 3 і 5, а на частоті 40 Гц – максимальна при зварюванні модульованим струмом частотою 40 Гц зі шпаруватістю 2.

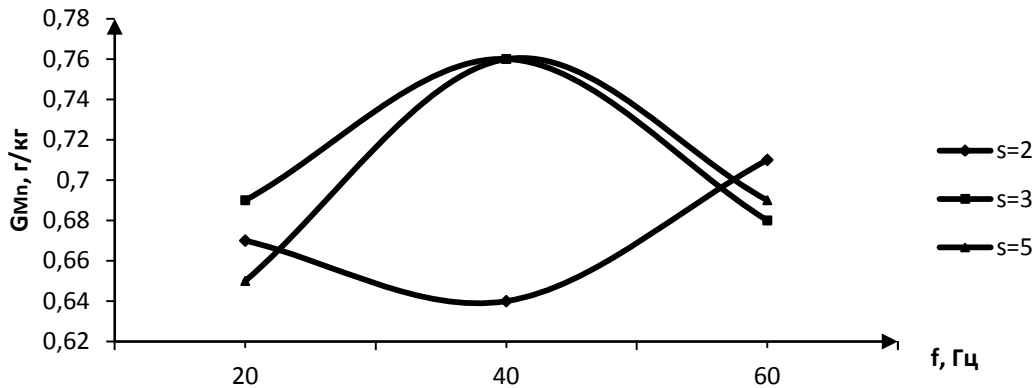


Рисунок 6 – Залежність питомого виділення Mn (G_{Mn}) від частоти (f) і шпаруватості (s) імпульсів зварювального струму

Результати досліджень залежностей масової частки тривалентного хрому (Cr^{3+}) від режиму зварювання (див. табл.) свідчать про те, що його мінімальний вміст у складі ЗА буває при зварюванні модульованим струмом на режимах з частотою 40, 60 Гц і шпаруватістю 2, 3, 5 і на режимі з частотою 20 Гц і шпаруватістю 7. Інші режими з частотою 20 Гц зі шпаруватістю 2, 3, 5 підвищують вміст хрому в складі ЗА, особливо високий його відсоток при зварюванні безперервним струмом.

Дослідження залежностей інтенсивності утворення тривалентного хрому ($V_{Cr^{3+}}$) від частоти з різною шпаруватістю імпульсів (рис. 7) показали, що зі збільшенням частоти від 20 до 60 Гц вони поступово зменшуються.

Аналогічний характер можна спостерігати і в залежностях питомого виділення та масової частки тривалентного хрому від режиму модуляції зварювального струму (див. табл.).

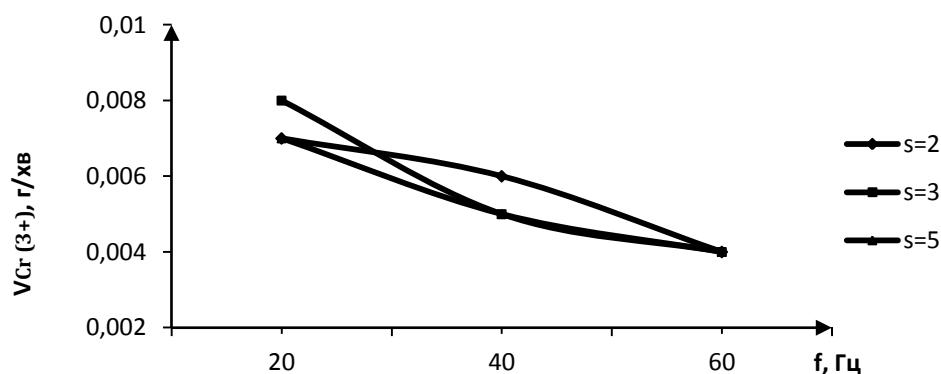


Рисунок 7 – Залежність інтенсивності утворення тривалентного хрому ($V_{Cr^{3+}}$) від частоти (f) і шпаруватості (s) імпульсів зварювального струму

Результати досліджень виділень нікелю (див. табл.) свідчать, що його мінімальна масова частка у складі ЗА відзначається при зварюванні модульованим струмом на режимах з частотою 40, 60 Гц і шпаруватістю 2, 3 і 5, а максимальна при зварюванні

безперервним струмом, а також на режимах модульованим струмом при частоті 20 Гц і шпаруватості 2, 3, 5 і 7.

Дослідження залежностей інтенсивності утворення нікелю (V_{Ni}) від частоти і шпаруватості імпульсів (рис. 8) показали, що всі криві зі шпаруватістю 2, 3 і 5 від частоти поступово зменшуються. Аналогічний характер можна спостерігати і в залежностях питомого виділення нікелю від частоти і шпаруватості імпульсів зварювального струму (див. табл.).

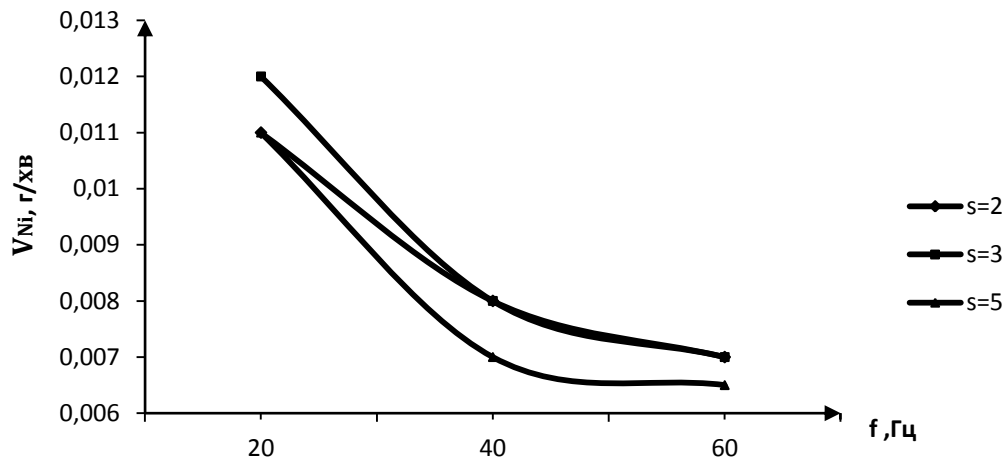


Рисунок 8 – Залежність інтенсивності утворення нікелю (V_{Ni}) від частоти (f) і шпаруватості (s) імпульсів зварювального струму

Результати досліджень залежностей інтенсивності утворення розчинних фторидів (V_{Fr}) від частоти і шпаруватості імпульсів наведено на рис. 9.

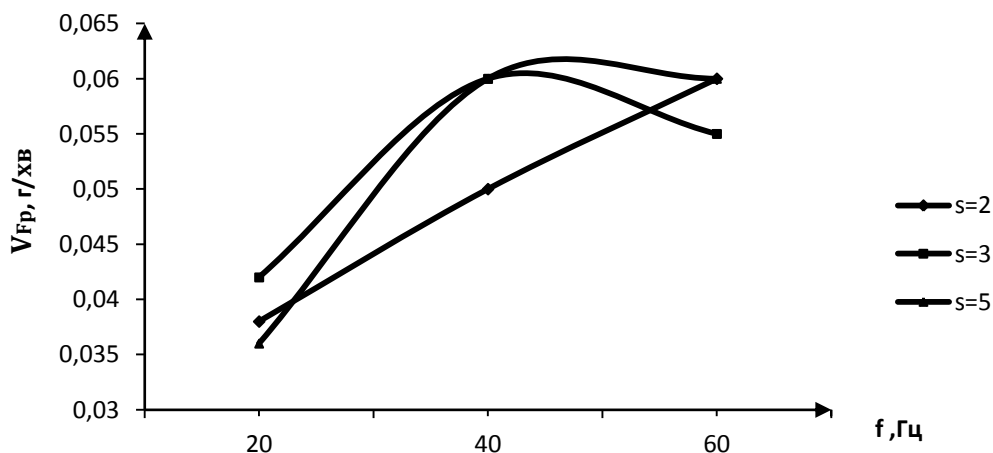


Рисунок 9 – Залежність інтенсивності утворення Fr (V_{Fr}) від частоти (f) і скважності (s) імпульсів зварювального струму

Результати порівняльних досліджень вмісту нерозчинних фторидів у ЗА свідчать, що їх максимальна кількість відзначалась під час зварювання безперервним струмом (див. табл.).

Отримані результати досліджень свідчать про те, що в даному випадку (за відсутності шестивалентного хрому в ЗА) для вибору режимів зварювання, що забезпечують мінімальний вплив ЗА на організм зварника, слід орієнтуватися на нікель

як на головний токсичний компонент (1 клас небезпеки згідно [10]), враховуючи при цьому і залежності показників виділень інших компонентів зварювального аерозолі.

Обговорення результатів досліджень.

Таким чином, під час зварювання порошковим дротом Велтек-Н320, до складу якого крім металів, також входять фториди, застосування режиму імпульсного подавання дроту в більшості випадків дозволяє поліпшити гігієнічні характеристики в порівнянні зі зварюванням з безперервним подаванням дроту, особливо на режимах з частотою 20 Гц при будь якій шпаруватості (див. табл. 1).

Встановлено, що інтенсивність утворення ЗА, кількість виділених компонентів ЗА і їх масова частка у складі ЗА вельми чутливі до зміни напруги в межах $\pm 1,5-2$ В, яке відбувається за умови імпульсного подавання електродного дроту. Ці гігієнічні показники залежать від виду перенесення електродного металу, типу електродного дроту і рівня його легування [3, 4].

Застосування імпульсного подавання електродного дроту дозволяє керувати не тільки розміром краплі електродного металу через крок подачі, але також задавати тип перенесення електродного металу. Так, при використанні порошкового дроту Велтек-Н320 на режимах з частотою 40 і 60 Гц і шпаруватістю 2, 3 і 5 спостерігалось струменеве перенесення металу з частою модуляцією довжини дуги і, як наслідок, напруги дуги, що в підсумку привело до зменшення вмісту парів нікелю (найбільш низьке виділення нікелю забезпечується на режимах з імпульсним подаванням дроту при частоті 40 і 60 Гц). Перехід до крупнокрапельного перенесення з короткими замиканнями при частоті імпульсів 20 Гц не змінив суттєво рівень вмісту нікелю в порівнянні з постійним подаванням електродного дроту, зате вплинув на швидкість утворення ЗА і обсяги виділення парів інших компонентів. Такі ж закономірності, пов'язані з впливом параметрів імпульсного подавання електродного дроту на об'єм краплі, тривалість її перебування на торці електродного дроту, тривалістю переходу краплі у зварювальну ванну, що може впливати на рівень виділень парів. Тому, інтенсивність виділення ЗА можна зменшувати від 1,2 до 2 разів у порівнянні зі зварюванням з безперервним подаванням дроту.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

З усього вище сказаного випливає, що зварювання з керованим імпульсним подаванням порошкового дроту дозволяє поліпшувати гігієнічні характеристики цього процесу в порівнянні зі зварюванням із безперервним подаванням дроту і до деякої міри керувати ними. Поліпшення гігієнічних характеристик і керування кількістю виділень ЗА та обсягами виділених шкідливих речовин можливо за умови точного налаштування параметрів імпульсного подавання електродного дроту і всього комплексу зварювального устаткування.

Отримані результати досліджень рекомендується використовувати для вибору режимів зварювання з керованим імпульсним подаванням електродного дроту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Левченко, О.Г. (2000). Образование аэрозолей при сварке в CO₂ модулированным током. *Автоматическая сварка*, 8, 48–50.
2. Palmer, W.G. & Eaton, J.C. (2007). Effects of Welding on Health. *American Welding Society*. Miami, International Standard Book Number: 978-0-87171-067-3.
3. Лебедев, В.А., Левченко, О.Г., Максимов, С.Ю., Лукьяненко, А.О. & Лендел, И.В. (2015). Гигиеническая характеристика механизированной дуговой сварки с импульсной подачей электродной проволоки. *Безопасность жизнедеятельности*, 9, 15-18.

4. Levchenko, O.G., Maksimov, S.Y., Lukianenko, A.O. & Lendel, I.V. (2015). Comparative hygienic evaluation of arc welding process at constant and pulsed electrode wire feed. *The Paton Welding Journal*, 12, 39-44.
5. Лебедев, В.А. (2014). Особенности управления процессом сварки плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки. *Сварка и Диагностика*, 1, 16-18.
6. Antonini, J.M. (2003). Health Effects of Welding. *Critical Reviews in Toxicology*, 33, 61-103.
7. ANSI Z49.1 – 2005 (2005). Safety in Welding, Cutting and Allied Processes. Section E5. *American Welding Society*. Miami, 12 p.
8. ISO 15011-1:2009 (2009). Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases, part 1: *Determination of fume emission rate during arc welding and collection of fume for analysis*, 20 p.
9. *Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы)* [1990]. Методические рекомендации (№ 4945-88). Москва: Минздрав СССР, 150 p.
10. ISO 15011-4:2017 (2017). Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases, part 4: *Fume data sheets*, 24 p.

REFERENCES

1. Levchenko, O.G. (2000). Obrazovanie aerorozey pri svarke v CO₂ modulirovannyim tokom. *Avtomaticheskaya svarka*, 8, 48–50.
2. Palmer, W.G. & Eaton, J.C. (2007). Effects of Welding on Health. *American Welding Society*. Miami, International Standard Book Number: 978-0-87171-067-3.
3. Lebedev, V.A., Levchenko, O.G., Maksimov, S.Y., Lukyanenko, A.O. & Lendel, I.V. (2015). Gigienicheskaya harakteristika mehanizirovannoy dugovoy svarki s impulsnoy podachey elektrodnoy provoloki. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 9, 15-18.
4. Levchenko, O.G., Maksimov, S.Y., Lukianenko, A.O. & Lendel, I.V. (2015). Comparative hygienic evaluation of arc welding process at constant and pulsed electrode wire feed. *The Paton Welding Journal*, 12, 39-44.
5. Lebedev, V.A. (2014). Osobennosti upravleniya protsessom svarki plavyaschimsya elektrodom s impulsnoy podachey elektrodnoy provoloki. *Svarka i Diagnostika*, 1, 16-18.
6. Antonini, J.M. (2003). Health Effects of Welding. *Critical Reviews in Toxicology*, 33, 61-103.
7. ANSI Z49.1 – 2005 (2005). Safety in Welding, Cutting and Allied Processes. Section E5. *American Welding Society*. Miami, 12 p.
8. ISO 15011-1:2009 (2009). Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases, part 1: *Determination of fume emission rate during arc welding and collection of fume for analysis*, 20 p.
9. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu vrednyih veschestv v svarochnom aerorozole (tverdaya faza i gazyi)* [1990]. Metodicheskie rekomendatsii (# 4945-88). Moskva: Minzdrav SSSR, 150 p.
10. ISO 15011-4:2017 (2017). Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases, part 4: *Fume data sheets*, 24 p.

Стаття надійшла до редакції 01.05.2020