

properties, and a composition for impact-abrasive wear ($\epsilon_3 = 3.2 \pm 0.2$, 3.2 times higher than 110G13L steel). Validation experiments on an independent set of 5 compositions confirmed the adequacy of the models (calculated vs. experimental discrepancy not exceeding 8%). All optimized compositions exhibited crack-free weldability without preheating and high technological soundness.

Keywords: Weld-deposit metal, metastable austenite, regression analysis, wear resistance, TRIP effect, composition optimization, nitrogen, nickel, dynamic deformation-induced martensitic transformation.

Стаття надійшла 28.11.2025р.

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990302025347040

Щетинін С.В., Десятський С.П.

ОДНОСТОРОННЄ ЗВАРЮВАННЯ СКЛАДОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ НА ФЛЮСОВІЙ ПОДУШЦІ

Енергія, що дуга передає металу, визначає процеси в зварювальній ванні. З підвищенням енергії тиск дуги, електромагнітний і гідродинамічний тиски, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зростають, що приводить до порушення формування швів і зниження ударної в'язкості зварних з'єднань, яка характеризує тріщиностійкість наплавленого металу.

Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості зварювання та кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань. Для зниження енергії за рахунок обертання дуги і підвищення швидкості зварювання розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, який складається з дроту та U-подібної стрічки. Струм тече по шляху найменшого опору, тому дуга обертається торцем електроду в повздовжньому і перпендикулярному напрямках. Площа обертання дуги збільшується, що забезпечує зниження тиску дуги в 4 рази, одностороннє високошвидкісне зварювання і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці зі склоподібним флюсом незалежно від зазору в стику і закон мінімуму енергії, згідно якому мінімум енергії – максимум якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Тиск зварювальної дуги вимірювали за розробленою методикою з використанням кварцевого зонду, температура розм'ягчення якого 2023 K, але внаслідок низької теплопровідності кварцу та переміщення під дією тиску дуги залишається в твердому стану довше ніж тантал. При наближенні дуги під дією тиску зонд опускається вниз, при видаленні дуги зонд підіймається нагору. Лінійні переміщення зонду по вертикалі перетворюються електронно-механічним перетворювачем в пропорційний електричний сигнал, що осцилографується і дає осцилограму тиску дуги в процесі одностороннього зварювання під флюсом.

Встановлено, що природа тиску дуги електромагнітна. Тиск дуги змінюється за законом нормального розподілу. При наближенні дуги тиск зростає, досягає максимуму на осі, де максимальна щільність струму, з видаленням від осі тиск зменшується. Основна закономірність, характерна для всіх процесів, зі збільшенням площі, якою обертається дуга, і підвищенням швидкості зварювання тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику. З ростом швидкості

зварювання погонна енергія, кількість наплавленого металу, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій зменшуються і ударна в'язкість зварних з'єднань підвищується.

Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, що забезпечує зниження енергії, тиску зварювальної дуги, електромагнітного і гідродинамічного тиску рідкого металу ванни, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг і щільності дислокацій, саморегулювання та автоматичне регулювання дуги, якісне формування швів незалежно від зазору в стику, зростання швидкості зварювання та кристалізації, здрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

Ключові слова: Одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, тиск дуги, площа, якою обертається дуга, енергія, швидкість зварювання та кристалізації рідкого металу ванни, здрібнення мікроструктури, ударна в'язкість зварних з'єднань.

Постановка проблеми. Одностороннє високошвидкісне зварювання, обмежено витіканням рідкого металу ванни під дією плазмових потоків і тиску дуги, електромагнітного і гідродинамічного тисків, порушенням формування швів, що приводить до зниження ударної в'язкості зварних з'єднань. Тому розробка одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань, є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальновідомо, що при зменшенні погонної енергії внаслідок збільшення швидкості охолодження підвищується ймовірність утворення холодних тріщин [1]. Однак М.М. Прохоров зазначає, що значне зниження погонної енергії та відповідне збільшення швидкості охолодження можуть привести до зниження ймовірності утворення холодних тріщин. Ці данні підтверджено значною мірою. Дослідження тиску зварювальної дуги, вплив швидкості зварювання і погонної енергії на формування швів при односторонньому зварюванні та ударну в'язкість зварних з'єднань досліджено недостатньо [2 – 9].

Мета досліджень. Дослідження тиску зварювальної дуги та розробка одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що забезпечує регулювання обертання дуги, зниження енергії, тиску дуги, тепловкладення, структурні перетворення, підвищення якості формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Основний матеріал дослідження. При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле, яке при протіканні струму по провіднику, вивчено Р.М. Уайтом [2]. Наявність сильного магнітного поля при зварюванні в області активної плями підтверджується тим, що дуга діє як насос, який всмоктує з навколишнього середовища повітря, що є діаманетиком, і втягує його в неоднорідне магнітне поле, розігріває і викидає у бік виробів у вигляді потужних плазмових потоків з швидкістю до 10^3 м/с [3]. Міцні плазмові потоки створюють тиск зварювальної дуги, яке залежить від руху активної плями торцем електрода.

Магнітне поле створює стиснення дуги під дією власного поля – пінч-ефект. В області переходу від активних плям до стовпа та його розширення значення напруженості магнітного поля, щільності струму і, отже, тиск знижуються в осьовому напрямку. Це призводить до виникнення плазмових потоків в сторону розширення та тиску дуги. Природа тиску зварювальної дуги під дією пінч-ефекта електромагнітна.

Відповідно до закону Біо-Сав'яру, індукція магнітного поля B прямо пропорційна струму I і обернено пропорційна відстані від струму R [3]:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R} \quad (1)$$

де μ – магнітна проникність середовища, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

Діюча на дугу електромагнітна сила зварювального струму пропорційна струму I , індукції магнітного поля B і довжині дуги L_d [3]:

$$F_{EMD} = IB l_d, \text{ Н.} \quad (2)$$

Швидкість обертання дуги торцем стрічковим електродом, під дією електромагнітної сили зварювального струму, що визначена за кінограмою процесу збудження дуги та підйому стрічки, $V_d = 3,3$ м/с, діаметр дуги $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Тиск зварювальної дуги прямо пропорційний квадрату струму та обернено пропорційний площі, якою обертається дуга [3]:

$$P_{\max} = 10^{-7} \frac{I^2}{\pi R_A^2}, \text{ Па,} \quad (3)$$

де I – зварювальний струм, А;

πR_A^2 – площа, якою обертається дуга, м².

Коефіцієнт 10^{-7} підтверджує електромагнітну природу тиску дуги.

Основна закономірність тиску зварювальної дуги, яка характерна для всіх процесів, з підвищенням площі, якою обертається дуга, тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці.

Площа, якою обертається дуга, визначається законом найменшого опору, згідно якого струм тече шляхом найменшого опору, і дуга збуджується при закорочуванні електрода на виріб. Згідно принципу мінімуму Штеєнбека, дуга прагне горіти при мінімумі енергії. Тому, дуга обертається торцем електрода. Пінч-ефект і обертання дуги торцем електрода визначають тиск зварювальної дуги.

Енергія, що дуга передає металу, визначає процеси в зварювальній ванні. З підвищенням енергії тиск дуги, електромагнітний і гідродинамічний тиски, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зростають, що приводить до порушення формування швів і зниження ударної в'язкості зварних з'єднань, яка характеризує тріщиностійкість наплавленого металу. Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості зварювання та кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Для зниження енергії, за рахунок обертання дуги і підвищення швидкості зварювання, розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, який складається з дроту та U-подібної стрічки. Дуга обертається торцем електрода в повздовжньому і перпендикулярному напрямках. Площа обертання дуги збільшується, що забезпечує зниження тиску дуги в 4 рази, одностороннє високошвидкісне зварювання і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці з склоподібним флюсом незалежно від зазору в стику.

Як встановлено, швидкість плазових потоків при зварюванні дротом $V = 2,37 \cdot 10^3$ м/с, при зварюванні складовим електродом $V = 1,18 \cdot 10^3$ м/с, що забезпечує зниження тиску дуги.

Кінетична енергія плазових потоків при зварюванні плав'ячимся електродом, перетворюється в кінетичну енергію рідини, що рухається, і визначає рух рідкого металу в зварювальній ванні.

Зниження тиску дуги в 4 рази підтверджено тим, що для формування зворотного валику було зменшено тиск повітря в флюсовій подушці з 3,5 атм до 0,8 атм.

При односторонньому зварюванні складовим електродом швидкість зварювання і кристалізації підвищується з 40 м/г до 75 м/г, погонна енергія зменшується. Зростає швидкість кристалізації, подрібнюється мікроструктура, зменшується міжатомна відстань, підвищуються міжатомні зв'язки і ударна в'язкість зварних з'єднань.

Спектральним аналізом на дифрактометрі ДРОН-3 встановлено, що зі зростанням швидкості зварювання і зниженням погонної енергії мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зменшуються, що забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Для вимірювання тиску в реальних умовах дуги, що рухається і горить на плав'ячомуся електроді під флюсом, розроблена спеціальна методика (рис.1), яка полягає в наступному. При наближенні електрода (1) спрацьовує фотоелемент (2) і попередньо встановлений по осі шва зонд (3) переміщається під дією тиску дуги по вертикалі. Лінійні переміщення зонда перетворюються електронно-механічним перетворювачем (4), в пропорційний електричний сигнал постійного струму, який посилюється підсилювачем (5) і фіксується осцилографом (6). Живлення фотоелемента здійснюється за допомогою блока (7). Для вимірювання товщини рідкого прошарку метал зачеканивається тантал (8). Зварювання пластин (9) проводиться під флюсом (10).

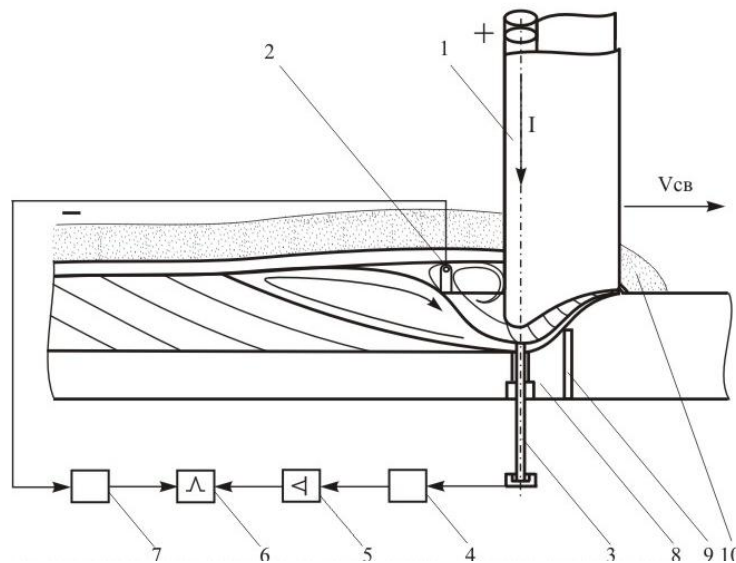


Рисунок 1 – Методика виміру розподілу тиску зварювальної дуги

Вимірювання лінійних переміщень зонда, пропорційних тиску дуги, дає закономірність розподілу тиску по активній плямі. Як зонд використовується стрижень з кварцового скла, що характеризується низькою теплопровідністю – у 400 разів менше теплопровідності міді та мінімальним коефіцієнтом лінійного розширення $5,5 \cdot 10^{-7}$. Температура розм'якшення кварцу 20230К, але в результаті низької теплопровідності та руху під дією тиску дуги він залишається у твердому стані більш тривалий час, ніж тантал.

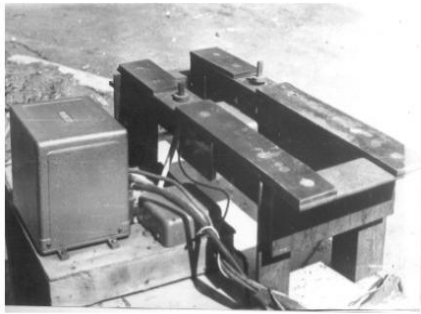


Рисунок 2 – Установка для виміру розподілу тиску зварювальної дуги

Зонд вводиться в просвердлений із зворотного боку отвір (рис.2) на глибину, що забезпечує вимірювання тиску зварювальної дуги в області стовпа, безпосередньо прилеглої до активної плями:

$$l = (S - h_{\text{ПР}} + S_{\text{ПР}} + 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (4)$$

де S – товщина пластини, м;

$h_{\text{ПР}}$ – глибина проплавлення, м;

$S_{\text{ПР}}$ – товщина рідкого прошарку, м.

Обробка експериментальних даних тиску дуги проводилась методом математичної статистики при числі вимірювань не менше п'яти.

Визначення впливу форми електрода на розподіл тиску дуги виробляли при наплавленні струмом зворотної полярності на пластини розміром 0,016x0,25x0,6 м, що забезпечують мінімальні деформації та виключають вплив на показання датчика. Як джерело живлення використовували випрямляч ВМГ-5000. Наплавлення проводили на режимі зварювання складовим електродом: $I = 2100 \text{ А}$; $U = 32 \text{ В}$; $V = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

Встановлено, що природа тиску дуги електромагнітна. Тиск дуги змінюється за законом нормального розподілу. При наближенні дуги тиск зростає, досягає максимуму на осі, де максимальна щільність струму, з видаленням від осі тиск зменшується. Зі збільшенням площі, якою обертається дуга, і підвищенням швидкості зварювання тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику. З ростом швидкості зварювання погонна енергія, кількість наплавленого металу, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій зменшуються і ударна в'язкість зварних з'єднань підвищується.

Дія форми електрода на тиск дуги підтверджується формуванням швів.

Формування швів при зварюванні дротяним електродом вузьке, з великим проплавленням 0,012 м та глибокими підрізами (рис.3). При зварюванні складовим електродом шов широкий, без підрізів, з плавним переходом до основного металу та в 2 рази меншою глибиною проплавлення 0,006 м (рис.2.256)

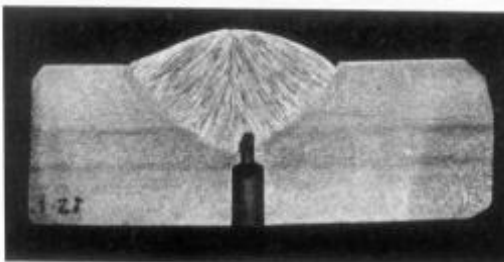


Рисунок 3 – Макрошліф шва з кварцовим стрижнем

Машинобудування і зварювальне виробництво

При зварюванні дротом внаслідок значного занурення дуги і малої ширини шва на поверхні гази не встигають виділитися, тому пористий шов і з тріщинами. При зварюванні складовим електродом внаслідок великої ширини дзеркала зварювальної ванни та шва, гази встигають виділитися, тому шов щільний, без тріщин.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом забезпечується закон мінімуму енергії Закон найменшого опору підтверджує закон мінімуму енергії, згідно якому мінімум енергії – максимум якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, що забезпечує зниження тиску зварювальної дуги, якісне формування швів незалежно від зазору, зростання швидкості зварювання та кристалізації, здрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом, внаслідок обертання дуги торцем U-подібної стрічки, збільшується площа, знижується тиск дуги, що забезпечує якісне формування зворотного валика на флюсовій подушці незалежно від зазору.

Встановленні закономірності та розроблений спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей та котлів залізничних цистерн.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, які забезпечують підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

ВИСНОВКИ

Енергія, що дуга передає металу, визначає процеси в зварювальній ванні. З підвищенням енергії тиск дуги, електромагнітний і гідродинамічний тиски, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зростають, що приводить до порушення формування швів і зниження ударної в'язкості зварних з'єднань, яка характеризує тріщиностійкість наплавленого металу. Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості зварювання та кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Для зниження енергії за рахунок обертання дуги і підвищення швидкості зварювання розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, який складається з дроту та U-подібної стрічки. Струм тече по шляху найменшого опору, тому дуга обертається торцем електроду в повздовжньому і перпендикулярному напрямках. Площа обертання дуги збільшується, що забезпечує зниження тиску дуги в 4 рази, одностороннє високошвидкісне зварювання і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці зі склоподібним флюсом незалежно від зазору в стику і закон мінімуму енергії, згідно якому мінімум енергії – максимум якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Тиск зварювальної дуги вимірювали за розробленою методикою з використанням кварцевого зонду, температура розм'ягчення якого 2023 К, але внаслідок низької теплопровідності кварцу та переміщення під дією тиску дуги залишається в твердому стану довше ніж тантал. При наближенні дуги під дією тиску зонд опускається вниз, при видаленні дуги зонд підіймається нагору. Лінійні переміщення зонду по вертикалі перетворюються електронно-механічним перетворювачем в пропорційний електричний сигнал, що

осцилографується і дає осцилограму тиску дуги в процесі одностороннього зварювання під флюсом.

Встановлено, що природа тиску дуги під дією пінч-ефекта електромагнітна. Тиск дуги змінюється за законом нормального розподілу. При наближенні дуги тиск зростає, досягає максимуму на осі, де максимальна щільність струму, з видаленням від осі тиск зменшується. Зі збільшенням площі, якою обертається дуга, тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику. З ростом швидкості зварювання погонна енергія, кількість наплавленого металу, мікрспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій зменшуються і ударна в'язкість зварних з'єднань підвищується.

Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, що забезпечує мінімум енергії, зниження тиску зварювальної дуги, електромагнітного і гідродинамічного тисків рідкого металу ванни, мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг і щільності дислокацій, саморегулювання та автоматичне регулювання дуги, якісне формування швів незалежно від зазору в стику, зростання швидкості зварювання та кристалізації, здрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зав'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

Список використаних джерел

1. Фуджита Ю. Технологія зварювання в сучасній промисловості промисленности Японії / Ю. Фуджита, Ю. Наканісі, Н. Юріока // Автоматичне зварювання. – 2008. – Листопад. – С.48 – 54.
2. Бернадський В.Н. Японія визначає пріоритети в зварюванні на ХХІ століття / В.Н. Бернадський // Автоматичне зварювання. – 2002. – №3. – С.46.
3. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р.М. Рижов, В.Д. Кузнецов. – К.: Екотехнологія, 2010. – 288 с.
4. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. – К.: Світ, 1992. – 306с.
5. Рижов Р.Н. Використання шостиполусної електромагнітної системи для керування параметрами формування швів при зварюванні електродом що не плавиться / Р.Н. Рижов, В.Д. Кузнецов, А.В. Малишев // Автоматичне зварювання. – 2004. – №2. – С.45 – 49.
6. Розмишляєв О.Д. Магнітне керування формуванням швів при дуговому зварюванні / О.Д. Розмишляєв. – Маріуполь, 2000. – 241 с.
7. Черниш В.П., Рижов Р.М. Залежність параметрів керуючого магнітного впливу від енерговкладення встик при дуговому зварюванні / В.П. Черниш, Р.Н. Рижов // Автоматичне зварювання. – 1998. – №5. – С.49 – 51.
8. Корольков П.М. Природа виникнення та методи усунення магнітного дуття при зварюванні / П.М. Корольков // Зварювальне виробництво. – 1998. – №5. – С.6–8.
9. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 1. The origin of magnetic fields // Metal Construction. – 1994. – №7. – Vol.16. – P.441 – 445.

THE ONE-SIDED HIGH-SPEED COMPOSITE ELECTRODE WELDING ON A FLUX CUSHION

The energy that the arc transfers to the metal determines the processes in the welding bath. With high-energy arc vice, electromagnetic and hydrodynamic vice, micro-permeable crystal lattice, micro-stresses, dislocation strength and welding stresses grow, which leads to damage to the molding of seams and a decrease in welded joints impact toughness, which characterizes the crack resistance of the deposited metal. An effective way to reduce linear energy is to increase the welding speed and crystallization of the liquid metal, refine the microstructure, reduce the interatomic distance, increase interatomic bonds and welded joints impact toughness.

To reduce energy by rotating the arc and increase the welding speed, a process of one-sided high-speed welding with a composite electrode has been developed, which consists of a wire and a U-shaped tape. The current flows along the path of least resistance, so the arc rotates along the end of the electrode in the longitudinal and transverse directions. The area of rotation increases, which ensures a 4-fold reduction in arc pressure, one-sided high-speed welding on a flux cushion with a glassy flux regardless of the gap in the joint, and the law of minimum energy, according to which minimum energy is the maximum quality and impact welded joints toughness.

The welding arc pressure was measured using a developed method using a quartz probe, the softening temperature of which is 2023 K, but as a result of the low thermal conductivity of quartz and movement under the action of the arc pressure, it remains in a solid state longer than tantalum. pressure the probe goes down, when the arc is removed the probe goes up. The linear vertical movements of the probe are converted by the electronic-mechanical converter into a proportional electrical signal, which is oscillographed and gives an oscillogram of the arc pressure during one-sided submerged arc welding.

It has been established that the nature of the welding arc pressure under the influence of the pinch effect is electromagnetic.. The arc pressure varies according to the normal distribution law. As the arc approaches, the pressure increases, reaches a maximum on the axis where the current density is maximum, and the pressure decreases with distance from the axis. The main pattern, characteristic of all processes, is that with an increase in the area over which the arc rotates, the pressure decreases, which ensures high-quality formation of the return bead on flux cushion regardless of the gap in the joint. With increasing welding speed, the linear energy, the amount of deposited metal, microdistortion of the crystal lattice, microstresses, welding stresses, dislocation density decrease and the welded joints impact toughness increases.

The one-sided high-speed composite electrode welding on a flux cushion has been developed, which provides a reduction in energy, welding arc pressure, electromagnetic and hydrodynamic pressure of the liquid metal bath, microdistortions of the crystal lattice, microstresses, welding stresses. and dislocation density, self-regulation and automatic arc regulation, high-quality formation of seams regardless of the gap in the joint, increased welding and crystallization speed, refinement of the microstructure, reduction of interatomic distance, increase in interatomic bonds and welded joints impact toughness by 2 times.

Keywords: *One-sided high-speed compound electrode welding on flux pad, arc pressure, arc rotating area, energy, welding and crystallization rate of liquid metal of the bath, microstructure grinding, impact toughness of welded joints.*

Стаття надійшла 08.12.2025р.