

## **ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ШВІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ З НЕПЛАВКИМ КАТОДОМ**

**© Сітніков Б.В., Маршуба В.П.**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

### **Інформація про авторів:**

**Сітніков Борис Валентинович: ORCID: 0000-0003-2581-1486;** sitnikovboris@ outlook.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Маршуба В'ячеслав Павлович: ORCID: 0000-0003-1426-6240;** marshuba\_vp@ outlook.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

У статті розглянуто деякі аспекти фізико-технологічних особливостей формування зварних швів у магнітному полі струму, що протікає по прямолінійному провіднику, розташованому над хвостовою частиною зварювальної ванни, в площині стику, що зварюється, перпендикулярно електроду при зварюванні з підвищеною швидкістю магнітокерованою дугою з неплавким катодом. А також показані результати досліджень при зварюванні з підвищеною швидкістю магнітокерованою дугою, та їх вплив утворення підрізів зварного шва. При дослідженні фізичних явищ виникаючих при зварюванні з підвищеною швидкістю магнітокерованою дугою з неплавким катодом встановлено, що немає істотних протиріч, між однієї точки зору, коли одні дослідники розглядають умови формування шва на основі загального закону рівноваги діючої і протидіючої сил, тоді як інші акцентують увагу на особливостях утворення дефектів у зв'язку з порушеннями цієї рівноваги, що викликається просторовими змінами положення дуги, як джерела нагріву і перерозподілом щільності лоренцевих сил по розплаву зварювальної ванни.

На підставі проведених досліджень по встановленню особливостей формування зварних швів при зварюванні з підвищеною швидкістю магнітокерованою дугою з неплавким катодом, описано поведінку зварювальної дуги з вольфрамовим катодом в магнітному полі струму, що протікає по прямолінійному провіднику, розташованому над хвостовою частиною зварювальної ванни, в площині стику, яка зварюється, перпендикулярно електроду.

Наведено також відомості, що встановлені при проведенні дослідів, про деякі особливості формування швів і стійкості неплавких електродів марок ЕВЛ і ЕВЛ-3 в магнітному полі бічного струмопідведення, які можуть бути використані при зварюванні з підвищеною швидкістю магнітокерованою дугою з неплавким катодом.

**Ключові слова:** зварювання, вольфрамовий електрод, аргон, шов, підрізи, провідник, струм, поперечне магнітне поле, електромагнітні сили, відхилення дуги.

**Sitnikov B., Marshuba V.** "Some features of weld formation in the process of welding with the help of a magneto-controlled arc with non-fusible cathode". The article considers some aspects of physical and technological features of weld formation in a magnetic field of current flowing along a rectilinear conductor located above the tail of the welding bath in the plane of the welded joint perpendicular to the electrode in high speed magneto-controlled welding. The results of research on welding with the increased speed by a magneto-controlled arc, and their influence on

formation of undercuts of a weld are also shown. In the study of the physical phenomena arising from high-speed welding of a magnetically controlled arc with a non-fusible cathode, it is established that there are no significant contradictions, except for one point of view, when some researchers consider the conditions of seam formation on the basis of the general law of equilibrium of acting and counteracting forces, while others focus on the features of the formation of defects due to violations of this balance caused by spatial changes in the arc position as a source of heat and redistribution of density of Lorentz forces on a melt of a welding bath.

Based on the research into establishing the peculiarities of the formation of welds in high-speed welding of a magnetically controlled arc with a non-fusible cathode, the behavior of a welding arc with a tungsten cathode in a magnetic field flowing through a rectilinear conductor located above the tail which is welded perpendicular to the electrode is described.

The information established during the experiments on some features of seam formation and stability of non-fusible electrodes of EVL and EVL-3 brands in the magnetic field of lateral current supply, which can be used in high-speed welding of a magneto-controlled arc with non-fusible cathode, is also given.

**Keywords:** WELDING, TUNGSTEN ELECTRODE, ARGON, SEAM, CUTTINGS, CONDUCTOR, CURRENT, TRANSVERSE MAGNETIC FIELD, ELECTROMAGNETIC FORCES, STRENGTHS.

### **Постановка проблеми в загальному вигляді**

Одним із шляхів збільшення продуктивності процесу зварювання, зниження енергоємності, скорочення тривалості перебування металу в області несприятливих температур, зменшення залишкових напруг і деформацій є зварювання з підвищеною швидкістю. Однак підвищення швидкості дугового зварювання вище певного значення, як правило, призводить до утворення протяжних підрізів. Таке явище має місце практично при всіх способах дугового зварювання, небезпека виникнення дефектів зростає зі збільшенням струму і швидкості зварювання [1-3]. Тому розробка способів, що дозволяють підвищити якість формування шва при зварюванні з підвищеною швидкістю, залишається однією з актуальних проблем у цій галузі.

### **Аналіз досліджень і публікацій по темі статті**

Природа утворення підрізів ще повністю не вивчена. Автори роботи [1] вважають, що формування шва є результатом взаємодії двох сил: тиску дуги і сили тяжіння рідкого металу, витісненого цим тиском. Динамічна рівновага рідкого металу в зварювальній ванні, при якому забезпечується нормальне формування швів, досягається при перевищенні тиску рідкого металу ванни над тиском дуги в результаті зміни товщини шару розплаву під дугою. За суті аналогічну схему утворення підрізів приводять і автори роботи [4, 13]. Які вважають, що підрізи утворюються в тих випадках, коли мінімальний рівень рідкого металу співпадає з максимальною шириною ванни, де починається кристалізація у кромки шва, яка виявляється нижче поверхні основного металу внаслідок значного нахилу дзеркала ванни. Чим вище сила тиску дуги, тим більше нахил дзеркала ванни і більше величина підрізу. Відповідно до іншої точки зору [5, 15], утворення підрізів при зварюванні з підвищеною швидкістю пов'язано з відхиленням дуги в сторону шва, що викликає більш інтенсивне витіснення розплаву в хвостову частину зварювальної ванни. Внаслідок цього стає більше розрив у часі між проплавленням і заповненням рідким металом канавки, що утворюється. Істотний вплив на формування швів при зварюванні можуть надавати і об'ємні електромагнітні сили, що виникають в рідкому металі в результаті взаємодії магнітних полів струмів, що протікають по дузі, рідкого металу ванни і з'єднуються деталям. Результати, що отримані в роботі [6, 14],

свідчать про те, що в залежності від напрямку зварювання щодо токоподвода, утворюються об'ємні сили, які можуть змінювати розташування зварювальної ванни і, як наслідок, робити істотний вплив на формування шва. Автори роботи [7] вважають, що гранична швидкість зварювання, при якій утворюються підрізи, визначається шириною шва і діаметром силової плями дуги, та обмеженим тиском здатним викликати відтискування металу ванни з бічних стінок.

Поява дефектів, з їх точки зору, відповідає рівності діаметра силового плями дуги і ширини ванни. Вивчаючи особливості формування швів при зварюванні неплавким електродом в аргоні автори роботи [8] приходять до висновку тому, що утворення підрізів визначається силою тиску дуги, масою металу зварювальної ванни, фізичними властивостями основного металу і швидкістю його охолодження. Однак тут же підкреслюється, що загальна форма критичних кривих відношення струм / швидкість зварювання для різних матеріалів наводить на думку, що явище утворення підрізів може бути пов'язано, швидше, з природою дугового зварювання, ніж виключно з властивостями зварюваного металу. Тому автори вважають, що найбільш перспективним шляхом ліквідації підрізів є зменшення сили тиску дуги на розплав зварювальної ванни. Для формування швів без підрізів при зварюванні з підвищеною швидкістю вдаються до відхилення дуги "кутом вперед" в напрямку зварювання керуючим магнітним полем [9]. Спосіб здійснюють пристроєм, який містить електромагніт, що складається з сердечника, основної обмотки, яка підключена до стороннього джерела струму, додаткової обмотки, що включена послідовно в ланцюг джерела живлення дуги, електрода і виробу. Здійснення даного способу вимагає наявності складних і громіздких електромагнітів для створення поперечного магнітного поля в зоні горіння дуги, а також наявності додаткового джерела живлення для створення основного поперечного магнітного поля, що ускладнює здійснення способу і конструкцію пристрою.

Для формування швів без підрізів при зварюванні з підвищеною швидкістю вдаються до відхилення дуги "кутом вперед" в напрямку зварювання керуючим магнітним полем [9]. Цей спосіб здійснюють пристроєм, що містить електромагніт, який складається з сердечника, основної обмотки, що підключена до стороннього джерела струму, додаткової обмотки, яка включена послідовно в ланцюг джерела живлення дуги, електрода і виробу. Здійснення даного способу вимагає наявності складних і громіздких електромагнітів для створення поперечного магнітного поля в зоні горіння дуги, а також наявності додаткового джерела живлення для створення основного поперечного магнітного поля, що ускладнює здійснення способу і конструкцію пристрою.

### **Виклад основного матеріалу**

Досліди проводилися при автоматичному зварюванні пластин зі сталі 12X18H10T розміром 2×150×400 мм. Зварювання стикових швів виконували на постійному струмі прямої полярності в нижньому положенні вольфрамовим електродом в аргоні на автоматі АДСВ-2М. Вимірювання величини підрізу  $h$  проводили за допомогою інструментального мікроскопа. Стійкість вольфрамових катодів марок ЕВЛ і ЕВЛ-3 діаметром 4 мм визначали при конічній симетричній, конічній асиметричній і плоскою клиновий формах їх робочої частини при кутах заточення 20, 45 і 60 градусів. Витрату електрода оцінювали за втратою його маси. Геометрію дуги визначали по фотографіях, стан робочої частини електрода – за допомогою металографічних досліджень. Схема пристрою для введення в зону зварювання керуючого магнітного поля наведена на рис. 1. У пристрої встановлено джерело живлення 1 зварювальної дуги 2, один з полюсів якого через опору  $R1$ ,  $R2$  і прямолінійний провідник 3, розташований в площині стику, що зварюється над хвостовою частиною зварювальної ванни

4, приєднаний до електрода 5, а інший до виробу 6. При запаленні дуги 2 на зварюваній виробі 6, струм, що пропускають по провіднику 3, який визначається співвідношенням опорів  $R1$  і  $R2$ , створює магнітне поле, взаємодія якого із зварювальним струмом  $I_{zs}$  дуги призводить до виникнення електромагнітних сил, які відхиляють її «кутом вперед» в напрямку зварювання. При  $R1 \rightarrow \infty$  по провіднику 3 протікає весь зварювальний струм, електромагнітні сили і, як наслідок, відхилення дуги «кутом вперед», досягають своїх максимальних значень.

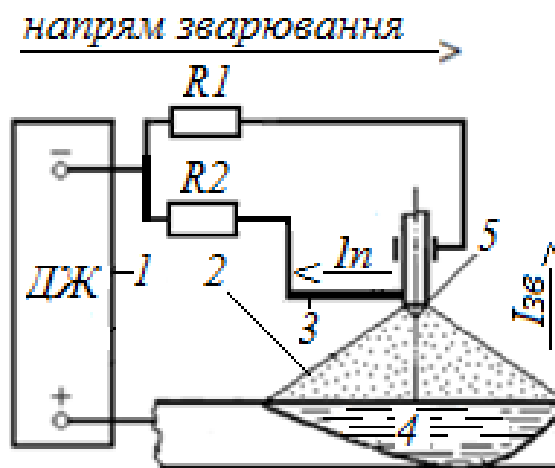


Рис 1 – Принципова схема пристрою для проведення дослідів:  
1 – джерело живлення; 2 – зварювальна дуга; 3 – прямолінійний провідник; 4 – зварювальна ванна; 5 – електрод; 6 – виріб, що зварюють

Для якісної оцінки процесів, що відбуваються тут, можна прийняти таке припущення, що на одиницю довжини дуги в цьому випадку діють три такі різні за своїм характером сили [10]: сила  $F1$  – взаємодії зварювального струму  $I_{zs}$  в дузі із зовнішнім магнітним полем  $F1 = \kappa_1 \cdot I_{zs} \cdot B$ ; електро-магнітна сила  $F2$ , що перешкоджає деформації дуги  $F2 = \kappa_2 \cdot I_{zs}^2$ ; газодинамічна сила  $F3$ , що виникає в результаті наявності потоків плазми  $F3 = \kappa_3 \cdot I_{zs}^2$ , де  $B$  – вектор магнітної індукції;  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  – коефіцієнти пропорційності. Сила  $F1$  деформує дугу, сили  $F2$  і  $F3$  перешкоджають цієї деформації. Склавши ставлення сил, що деформують, і сил опору, отримуємо:  $F1 / (F2 + F3) = \kappa_1 / (\kappa_2 + \kappa_3) \cdot B / I_{zs}$ . З останнього рівняння випливає, що зі збільшенням зварювального струму  $I_{zs}$ , при незмінній величині індукції. У поперечного магнітного поля, сили, стабілізуючі дугу, ростуть швидше, ніж сили, що її відхиляють. Це означає, що з підвищенням швидкості зварювання, коли величина зварювального струму  $I_{zs}$  зростає, відхилення дуги «кутом вперед» зменшується, витіснення розплаву в хвостову частину зварювальної ванни збільшується, ймовірність утворення підрізів зростає. При зварюванні в магнітному полі струму, що протікає по провіднику 3, збільшення зварювального струму призводить до одночасному зростанню всіх трьох сил  $F1$ ,  $F2$  і  $F3$ , кута  $\alpha$  відхилення дуги «кутом вперед» повинен змінюватися в незначних межах і визначатися лише умовами проведення зварювальних робіт.

Відхилення зварювальної дуги «кутом вперед» в магнітним полем струму, що протікає по провіднику 3, вивчали шляхом її фотографування з подальшим фотометрування плівок на Мікрофотометр МФ-2 за напрямками, перпендикулярним осі електрода (рис. 2). Використовували фотоапарат «Зеніт Е». Режим фотографування: світлофільтр марки Е-2; витримка 1:25; діафрагма 5.6; світлочутливість фотоплівки 130 од. Отримання після

фотографування негативні кадри дуги на фотоплівці фотометрівать по лініях, що знаходяться на відстані  $\Delta = 0,5$  мм від основи. За одиницю інтенсивності засвітки негативу приймали величину, звану відносною інтенсивність засветки  $S = \lg A_0 / A$ , де  $A_0$  – відлік за шкалою мікрофотометра для незасвічені плівки;  $A$  – то ж, тільки для засвічених точок на негативі.

Оптимальний розмір щілини мікрофотометра, що забезпечує достатню чутливість вимірів, знаходився в межах 3 мм. Інтервал фотометрівання брали, виходячи з можливостей приладу МФ-2, що дорівнює 0,5мм. Залежність  $\lg \alpha$  від величини струму  $I_n$  визначали з відношення  $\lg \alpha = x / (1\vartheta - \Delta)$ , де  $\alpha$  – кут відхилення дуги;  $1\vartheta$  – довжина дуги;  $x$  – відстань від максимальних фотопочернень нормально палаючої дуги і дуги в магнітному полі струму  $I_n$ .

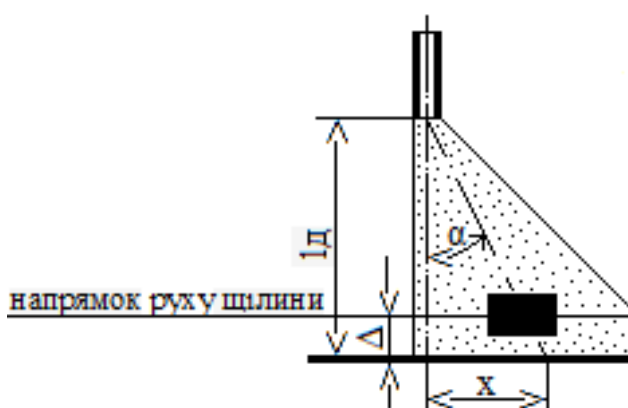


Рис. 2 – Схема фотометрівання плівок

Результати проведених експериментів наведені на рис. 3. Як видно з наведених залежностей, в досліджуваному інтервалі струмів зварювальна дуга в аргоні з вольфрамовим катодом добре керується магнітним полем струму  $I_n$  у межах кута  $\alpha \in [0..34^\circ]$  і практично мало залежить від величини зварювального струму.

Пальники типу ДПА для автоматичного зварювання неплавким електродом в захисних газах з боковим струмопідведення у вигляді прямолінійного провідника були апробовано при зварюванні пластин зі сталі типу 18-10. За базової технології зварювання хромонікелевої аустенітної сталі 12X18H10T товщиною до 3 мм проводили без оброблення крайок за один прохід вольфрамовим електродом в аргоні дугою постійного струму прямої полярності. Спроби підвищення продуктивності зварювальних робіт, шляхом форсування режиму по току і швидкості зварювання, приводили до утворення протяжних підрізів (рис. 4, а) і нестабільності формуванні зворотного валика. Шви або не мали зворотного валика, що при мають місце випадкових коливаннях струму і геометрії крайок з'єднання призводить до непроварення в корені шва, або при збільшенні оператором зварювального струму з метою отримання зворотного валика великих розмірів, які гарантують проварена при випадкових змінах режиму і геометрії крайок, в шві утворюються пропали (рис. 4, б).

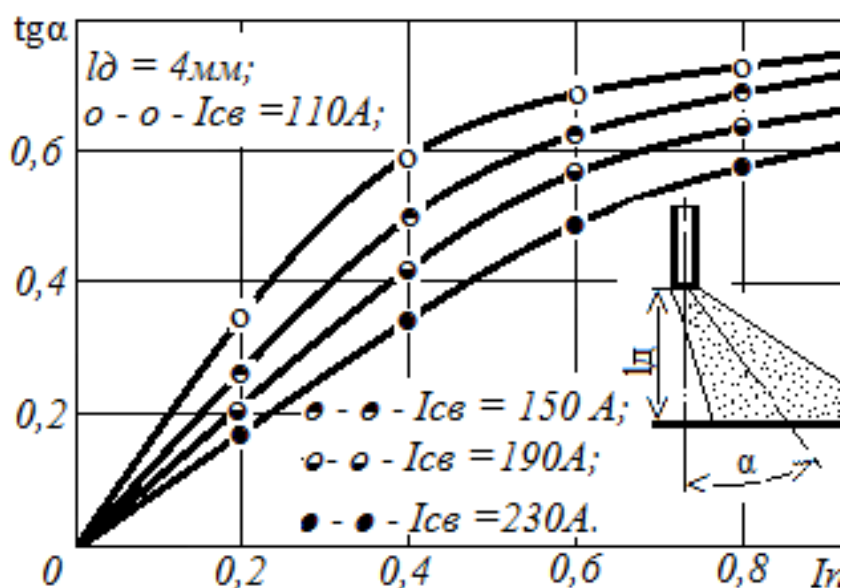


Рис. 3 – Залежність кута відхилення зварювальної дуги від величини струму в бічному струмовідводі

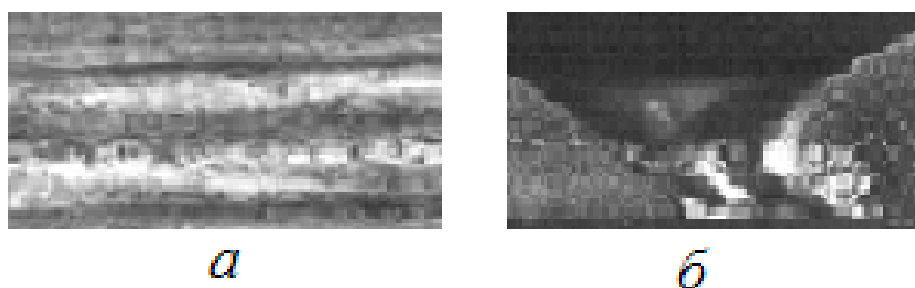
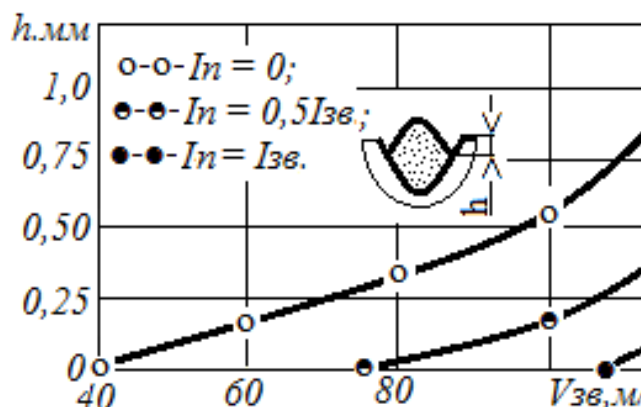


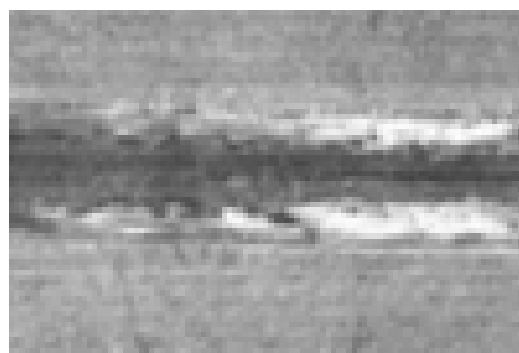
Рис. 4 – Дефекти формування шва при зварюванні з підвищеною швидкістю: а – підрізи; б – пропали;  $V_{zs} = 80$  м/год.;  $I_n = 0$

При зварюванні в магнітному полі струм, що протікає по прямолінійному провіднику, розташованому над хвостовою частиною зварювальної ванни, в площині стику, що зварюється, перпендикулярно електроду, швидкість зварювання, при якій забезпечується якісне формування шва, може бути істотно збільшена (рис. 5). Так збільшення струму  $I_n$ , що протікає за прямолінійним провіднику від нуля до  $0,5 I_{zs}$  призводило до наступних змін величини підрізу  $h$ : при  $V_{zs} = 60$  м/год. від 0,15 до 0,0 мм; при  $V_{zs} = 70$  м/год. від 0,25 до 0,0 мм; при  $V_{zs} = 80$  м/год. від 0,35 до 0,05 мм; при  $V_{zs} = 90$  м/год. від 0,4 до 0,1 мм; при  $V_{zs} = 100$  м/год. від 0,6 до 0,2 мм; при  $V_{zs} = 110$  м/год. від 0,8 до 0,3 мм; при  $V_{zs} = 120$  м/год. від 1,1 до 0,5 мм. При  $I_n = I_{zs}$  шви формувалися без підрізів при швидкостях зварювання досягають 110 м/год., пропали не спостерігалося (рис. 6).

Якість з'єднання, отриманого при зварюванні електродів, що не плавиться, в чималому ступені залежить від стану його робочої частини [11]. У процесі зварювання, особливо при тривалому горінні дуги, стан робочої частини електрода змінюється (порушується його поверхню, форма та ін.), Що призводить до втрати просторової стійкості дуги і порушення початкового розподілу температури і силового впливу дуги.

Рис. 5 – Характер зміни величини підрізу з підвищенням струму  $I_n$  і швидкості зварюванняРис. 6 – Формування шва при зварюванні в магнітному полі струму  $I_n$ :

$$V_{зв} = 100 \text{ м/год.}; I_n = I_{зв}$$



Для електродів з боковим струмопідведенням у вигляді прямолінійного провідника характерна підвищена інтенсивність охолодження робочої ділянки, що надає неоднозначний вплив на можливість існування дуги з розосередженою катодною плямою. З одного боку, при інтенсивному охолодженні зони катодної плями, повинна зменшуватися його площа [12]. З іншого боку, інтенсивне охолодження робочої ділянки дозволяє збільшити щільність струму на ньому і в результаті тепловиділення на його омичному опорі. Таким чином, зменшується нерівномірність нагріву робочої ділянки, що сприяє існуванню дуги з розосередженим катодним плямою. Це зумовлює низьку щільність струму на катодній плямі, яка забезпечується без надмірного збільшення його температури і, як наслідок, підвищення стійкості вольфрамового електрода. Результати експериментів показали, що витрата вольфрамового електрода на 100 м / шва при зварюванні з відхиленням дуги «кутом вперед» досягає своїх мінімальних значень при  $I_n = I_{зв}$ , але в основному визначається його маркою, формою і кутом заточування робочої частини. Руйнування лантанованого електрода, після порушення дуги, починається з утворення на деякій відстані від катодної плями кільцеподібного наросту, який з часом, в результаті збільшення і провисання, потрапляє в область більш високих температур, де і оплавляється. При цьому спостерігається блукання дуги, що виникає внаслідок переміщення катодного плями, і погіршення якості формування шва. Аналогічний характер руйнування катода був відзначений і при зварюванні ітрированими електродом, однак їх стійкість, при всіх значеннях струму  $I_n$ , формах і кутах заточення робочої частини, була вище ніж у лантанованій електродів.

**Висновок**

Показана можливість підвищення продуктивності і якості формування швів при зварюванні електродом, що не плавляється в аргоні сталі 12Х18Н10Т шляхом впливу на дугу і метал зварювальної ванни магнітним полем струму, що протікає за прямолінійним провіднику, розташованому над хвостовою частиною зварювальної ванни, в площині стику, що зварюється, перпендикулярно електроду.

**Список використаних джерел:**

1. Патон Б. Е. Некоторые особенности формирования швов при сварке с повышенной скоростью / Б. Е. Патон, С. Л. Мандельберг, Б. Г. Сидоренко // *Автоматическая сварка*. – 1971. – № 8. – С. 1–6.
2. Рыбаков А. А. Влияние скорости сварки на первичную кристаллизацию швов низколегированных сталей / А. А. Рыбаков, С. Л. Мандельберг, Л. Г. Шитова. // *Автоматическая сварка*. – 1980. – № 10. – С. 15–18.
3. Ситников Б. В. Влияние магнитного поля сварочного контура на формирование шва при сварке на весу / Б. В. Ситников, В. П. Маршуба // *Сварочное производство*. – 2020. – Вып. № 7. – С. 03–08.
4. Ерохин А. А. Влияние угла заточки вольфрамового катода на образование подрезов и газовых полостей при сварке / А. А. Ерохин, В. А. Букаров, Ю. С. Ищенко // *Сварочное производство*. – 1972. – № 5. – С. 20–22.
5. Ковалёв И. М. Пространственная устойчивость движущейся дуги с неплавящимся катодом / И. М. Ковалёв // *Сварочное производство*. – 1972. – № 8. – С. 1–3.
6. Мандельберг С. Л. Влияние расположения токоподвода на формирование швов при однодуговой сварке / С. Л. Мандельберг, Б. Г. Сидоренко, В. Е. Лопата // *Автоматическая сварка*. – 1976. – № 8. – С. 11–15.
7. Чернышов Г. Г. Влияние теплового потока и давления дуги на предельную скорость сварки / Г. Г. Чернышов, В. Л. Ковтун // *Сварочное производство*. – 1985. – № 2. – С. 14–15.
8. Жуковский Б. Д. Влияние предварительного подогрева на скорость аргоно-дуговой сварки труб / Б. Д. Жуковский, Л. Н. Зильберштейн, Е. П. Петрунин // *Сварочное производство*. – 1968. – № 9. – С. 11–13.
9. А. с. 546446 СССР, М. Кл. В23К 9/08. Способ сварки магнитоуправляемой дугой и устройство для его осуществления / И. М. Ковалев, В. А. Судник, А. С. Рыбаков, Е. Н. Хорошев ; Тульский политехн. ин-т, Москов. трубный завод. – № 2110565/27 ; Заявл. 06.03.1975; Оpubл. 15.02.1977, Бюл. № 6. – \* л.
10. Акулов А. И. Об отклонении дуги в поперечном магнитном поле / А. И. Акулов, Л. К. Мартинсон, И. М. Ковалёв // *Сварочное производство*. – 1969. – № 11. – С. 43–45.
11. Ерохин А. А. Влияние геометрии вольфрамового катода на некоторые характеристики сварочной дуги и проплавление металла / А. А. Ерохин, В. А. Букаров, Ю. С. Ищенко // *Сварочное производство*. – 1971. – № 12. – С. 17–19.
12. Фролов В. В. Теория сварочных процессов / В. В. Фролов. – М. : Высш. школа, 1988. – 559 с.
13. Dmitrik V. Recrystallization in the metal of welding Joist / V. Dmitrik, A. Glushko, A. Tsaryk // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2019. – № 5. – С. 49–52.
14. Глушко А. В. Ползучесть металла сварных соединений паропроводов / А. В. Глушко, В. В. Дмитрик, Т. А. Серенко // *Металлофизика новейшие технологии*. – 2018. – Т. 40, № 5. – С. 683–700.
15. Сітніков Б. В. Використання інтегрованих технологій при визначенні поперечних деформацій металу в зоні шва при аргоно-дуговому зварюванні алюмінію марки АД0 / Б. В. Сітніков, В. П. Маршуба // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2019. – Вып. 24. – С. 115–123.

**References:**

1. Paton, BE, Mandelberg, SL & Sidorenko, BG 1971, 'Nekotorye osobennosti formirovaniya shvov pri svarke s povyshennoj skorostju' [Some features of the formation of seams when welding at an increased speed], *Avtomaticheskaja svarka*, no. 8, pp. 1-6.



2. Rybakov, AA, Mandelberg, SL & Shitova, LG 1980, 'Vlijanie skorosti svarki na pervichnuju kristallizaciju shvov nizkolegirovannyh stalej' [Influence of welding speed on primary crystallization of seams of low-alloy steels], *Maidelberg, Avtomaticheskaja svarka*, no. 10, pp. 15-18.
3. Sitnikov, BV & Marshuba, VP 2020, 'Vlijanie magnitnogo polja svarochnogo kontura na formirovanie shva pri svarke na vesu' [Influence of the magnetic field of the welding circuit on the formation of the seam during welding by weight], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 7 (1028), pp. 03-08.
4. Erokhin, AA, Bukarov, VA & Ishchenko, YS 1972, 'Vlijanie ugla zatocki volframovogo katoda na obrazovanie podrezov i gazovyh polostej pri svarke' [Influence of the angle of sharpening of a tungsten cathode on the formation of undercuts and gas cavities during welding], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 5, pp. 20-22.
5. Kovalev, IM 1972, 'Prostranstvennaja ustojchivost dvizhushhejsja dugi s nepla-vjashhimsja katodom' [Spatial stability of a moving arc with a nonconsumable cathode], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 8, pp. 1-3.
6. Mandelberg, SL, Sidorenko, BG & Lopata, VE 1976, 'Vlijanie raspolozhenija tokopodvoda na formirovanie shvov pri odnodugovoj svarke' [Influence of the current lead location on the formation of seams in single-arc welding], *Avtomaticheskaja svarka*, no. 8, pp. 11-15.
7. Chernyshov, GG & Kovtun, VL 1985, 'Vlijanie teplovogo potoka i davlenija dugi na predelnuju skorost svarki' [Influence of heat flow and arc pressure on the limiting welding speed], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 2, pp. 14-15.
8. Zhukovsky, BD, Zilbershtein, LN & Petrunin, EP 1968, 'Vlijanie predvaritelnogo podogreva na skorost argono-dugovoj svarki trub' [Influence of preheating on the speed of argon-arc welding of pipes], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 9, pp. 11-13.
9. Kovalev, IM, Sudnik, VA, Rybakov, AS & Horoshev, EN 1977, *Sposob svarki magnitoupravljaemoj dugoj i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija*, USSR Avtorskoe svidetelstvo 546446, cl. B23K 9/08, 15.02.77.
10. Akulov, AI, Martinson, LK & Kovalev, IM 1969, 'Ob otklonenii dugi v poperechnom magnitnom pole' [On the deviation of the arc in the transverse magnetic field], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 11, pp. 43-45.
11. Erokhin, AA, Bukarov, VA & Ishchenko, YS 1971, 'Vlijanie geometrii volframovogo katoda na ne kotorye harakteristiki svarochnoj dugi i proplavlenie metala' [Influence of the geometry of a tungsten cathode on some characteristics of the welding arc and metal penetration], *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 17-19.
12. Frolov, VV 1988, *Teorija svarochnyh processov* [Theory of welding processes], Vysshaja shkola, Moskva.
13. Dmitrik, V, Glushko, A & Tsaryk, A 2019, 'Recrystallization in the metal of welding Joist', *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*, no. 5 (123), pp. 49-52.
14. Glushko, A, Dmitrik, V & Serenko, TA 2018, 'Polzuchest metalla svarnyh soedinenij paroprovodov' [Creep of metal welded joints of steam pipelines], *Metallofizika novejshe tehnologii*, vol. 40, no. 5, pp. 683-700.
15. Sitnikov, BV & Marshuba, VP 2019, 'Vykorystannia intehrovanykh tekhnolohii pry vyznachenni poperechnykh deformatsii metalu v zoni shva pry arhono-duhovomu zvariuvanni aliuminiu marky AD0' [The use of integrated technologies in determining the transverse deformations of the metal in the weld zone during argon-arc welding of aluminum grade AD0], *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, iss 24, pp. 115-123.

Стаття надійшла до редакції 12 квітня 2021 року