

3. Pokhodnia I.K., Shlepakov V.N., Maksimov S.Iu., Riabtsev I.A. Issledovaniia i razrabotki IES im. E.O. Patona v oblasti elektrodugovoi svarki i na plavki poroshkovoii provolokoi [Research and development of IES them. E.O. Paton in the field of electric arc welding and melting with flux-cored wire]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 2010, № 12, pp. 34-42. (Rus.)
4. Finkel' V.M. *Fizika razrusheniia* [Physics of destruction]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1970. 376 p. (Rus.)
5. Riabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kyiv, Ekotekhnologiiia Publ., 2004. 160 p. (Rus.)
6. Kalenskii V.K., Cherniak Ia.P., Vasil'ev V.G., Solomiichuk T.G. Vliianie pogonnoi energii na obrazovanie otkolov pri naplavke vysokouglerodistoi stali austenitnymi provolokami [Influence of heat input on the formation of spalls in the surfacing of high-carbon steel with austenitic wires]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 2001, № 11, pp. 11-14. (Rus.)
7. Savitskii A.M., Savitskii M.M., Novikova D.P. Vliianie skorosti svarki i dlitel'nosti periodicheskogo okhlazhdeniia na formirovanie struktury svarnykh soedinenii zakalivaiushchikhsia stali pri dugovoi svarke s termotsiklirovaniem [Influence of welding speed and duration of periodic cooling on the formation of the structure of welded joints of hardening steels in arc welding with thermal cycling]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 2004, № 8, pp.41-45. (Rus.)
8. Suslova E.A., Ignatov V.A., Zubchenko A.S. Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na sklonnost' k obrazovaniiu treshchin [The influence of technological factors on the tendency to cracking]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1990, № 5, pp. 35-36. (Rus.)
9. Vinokurov V.A., Grigor'iants A.G. *Teoriia svarochnykh deformatsii i napriazhenii* [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (Rus.)
10. Rykalin N.N. *Raschet teplovykh protsessov pri svarke* [Calculation of thermal processes during welding]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.08.2021

УДК 621.791.753.042

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.9

© Щетинін С.В.¹, Щетиніна В.І.², Никитенко П.В.³, Елсаєд Халед⁴,
Коваль О.В.⁵

ОДНОСТОРОННЄ ВИСОКОШВИДКІСНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ СКЛАДОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Встановлені закономірності регулювання переміщення дуги по торцю електрода і ванні при зварюванні складовим електродом. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом, що забезпечує за рахунок регулювання переміщення дуги по торцю електрода і зварювальній ванні, зниження тиску дуги і якісне формування зворотного валуку на флюсовій подушці, зменшення магнітного поля, відсутність

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁵ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

підрізів, стабільність процесу, зниження тепловкладення, зварних напруг, здрібнення мікроструктури і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Ключові слова: складовий електрод, ударна в'язкість зварних з'єднань, переміщення дуги по торцю електрода і ванні, тиск дуги, магнітне поле, погонна енергія, зварювальні напруги, здрібнення мікроструктури, одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей.

S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled, A.V. Coval. One-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines by a composite electrode. *One-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines is limited by the violation of the back bead formation on the flux pad due to liquid metal leakage from the pool, by the violation of the process stability and the undercuts formation under the welding current magnetic field influence, and welded joints toughness decrease. Therefore, the development of one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines that affords increase in stability, quality and impact strength of welded joints is an important scientific and technical problem. At one-sided high-speed welding using a composite electrode, the arc moves in the longitudinal and perpendicular to normal directions, the arc pressure is reduced by 4 times, the liquid metal crystallization rate increases, and the high-quality back bead seams on the flux pad are formed regardless of the gap in the joint; there being no metal leakage from the pool. The regulation of the arc movement along the electrode end and the weld pool provides heat input into the pool side edges, the increase of electrical resistance and the decrease of the current that flows through the side edges and the decrease of the magnetic field, as a result of which the downward magnetic pressure is reduced and the formation of undercuts is prevented; their nature being electromagnetic. One-sided high-speed welding provides the decrease in heat input and in welding stresses, the increase in crystallization rate, which is equal to the welding speed, the refinement of the microstructure, the reduction of interatomic distance, the increase in interatomic bonds and in welded joints toughness. One-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines by a composite electrode has been developed. This process, due to the arc movement along the electrode end and the weld pool, provides the arc pressure reduction and a back bead on a flux cushion high-quality formation, the decrease in magnetic pressure and the undercuts absence, provides the process stability, the reduction in heat input and welding stresses, provides the microstructure refinement and the increase in welded joints toughness by 2–2.5 times.*

Key words: composite electrode, welded joints toughness, the arc movement along the electrode end and the weld pool, arc pressure, magnetic field, heat input, welding stresses, microstructure refinement, one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines.

Постановка проблеми. Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей обмежено порушенням формування зворотного валика на флюсовій подушці внаслідок витікання рідкого металу з ванни, стабільності процесу під дією магнітного поля зварювального струму, утворенням підрізів, і зниженням ударної в'язкості зварних з'єднань. Тому розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом, що забезпечує зниження тиску дуги, магнітного поля зварювального струму, підвищення стабільності процесу, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей здійснюється дводуговим способом, при якому перший дріт, розташований перпендикулярно, забезпечує проплавлення основного металу, а другий – формування зварного шва за рахунок нахилу дроту під кутом вперед. Дводуговий процес досліджено в значній мірі [1-8], проте одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом і способи регулювання переміщення дуги по торцю електрода і зварювальній ванні, зниження тиску дуги і магнітного поля зварювального струму, підвищення стабільності процесу, формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань досліджено недостатньо [1-8].

Мета дослідження – регулювання переміщення дуги по торцю електрода і зварювальній ванні та розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом, що забезпечує зниження тиску дуги і магнітного поля зварювального струму, підвищення стабільності процесу, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань

Виклад основного матеріалу. При електродуговому зварюванні переміщення дуги по торцю електрода і зварювальній ванні визначає тиск дуги, магнітне поле зварювального струму, стабільність процесу, тепловкладення, погонну енергію, зварювальні напруги, швидкість кристалізації рідкого металу і навколошовної зони, здрибнення мікроструктури і ударну в'язкість зварних з'єднань.

Дуга створює магнітне поле зварювального струму і магнітний тиск – пінч-ефект, під дією якого діаметр дуги зменшується до нуля і обриву дуги. Дуга знову збуджується в місті меншої відстані електроду і ванни згідно закону найменшого опору або при закорочуванні електродом дугового проміжку. В процесі зварювання дуга постійно переміщається по торцях електрода і ванні, що визначає тепловкладення і ударну в'язкість зварних з'єднань. Зменшення діаметра приводить до збільшення магнітного поля і посилення пінч-ефекту.

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 в сторону виробів у вигляді потужних плазмових потоків, з швидкістю до 10^3 м/с [5]. Потужні плазмові потоки створюють тиск зварювальної дуги, який залежить від руху активної плями торцем електрода.

Пінч-ефект визначає переміщення активної плями торцем електроду, відрив крапель з торця електроду, зниження температури крапель, тепловкладення і зварювальних напруг, перенесення крапель, кристалізацію металу і час існування зварювальної ванни, мікроструктуру і ударну в'язкість зварних з'єднань.

Для одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей розроблено процес зварювання складовим електродом, який складається з дроту всередині U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовані попереду дроту в напрямку зварювання (рис. 1).

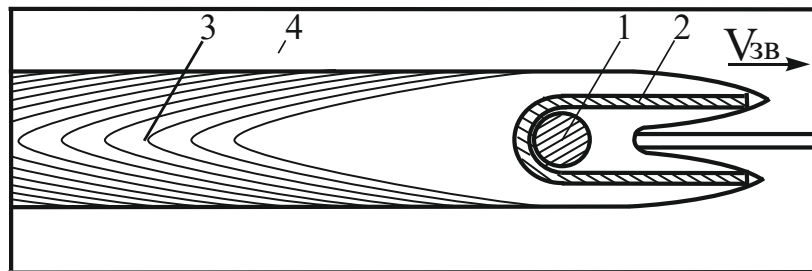
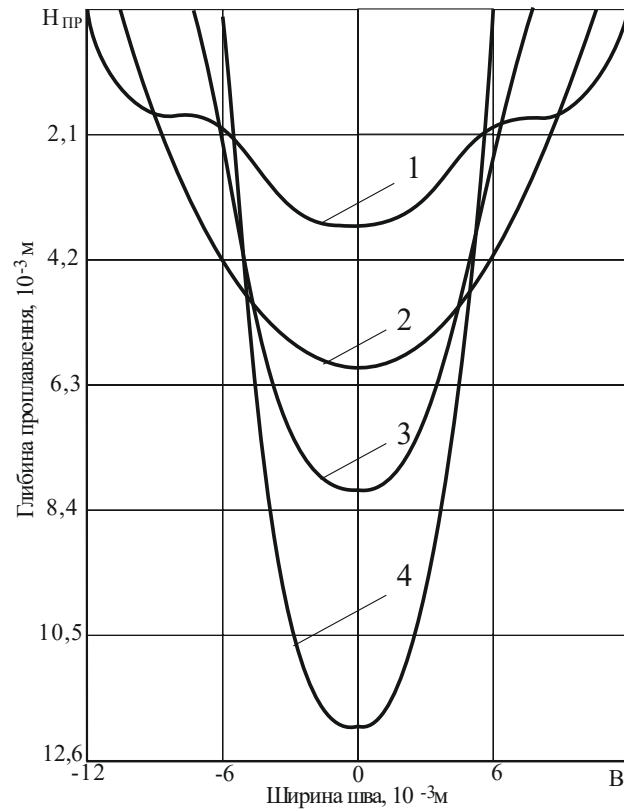


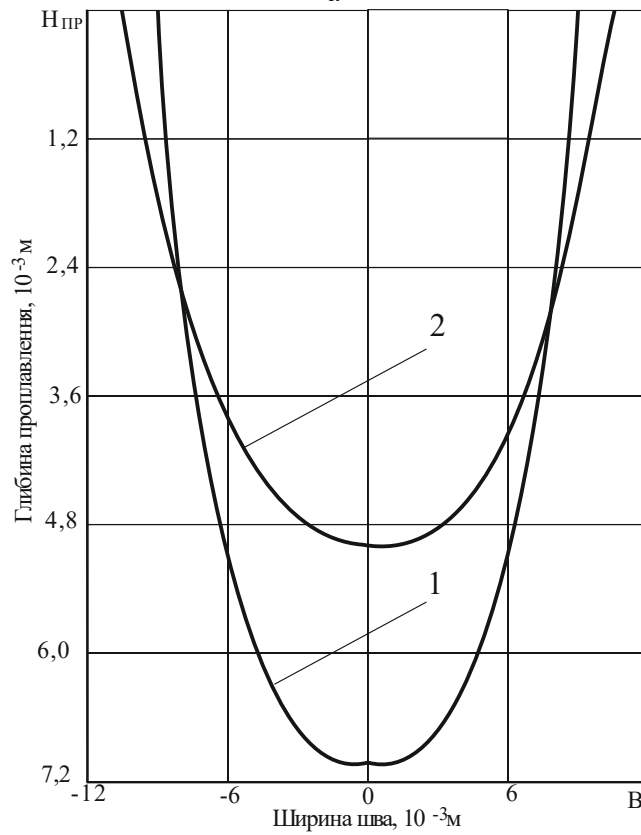
Рис. 1 – Одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом: 1 – дріт, 2 – U-подібна стрічка, 3 зварний шов, 4 – основний метал

В процесі зварювання складовим електродом дуга переміщується по торцю електрода в поздовжньому і поперечному напрямках. При горінні дуги на дроті і прилеглих ділянках стрічки зростає тепловкладення і глибина проплавлення (рис. 2). При горінні на прямолінійних ділянках стрічки зростає тепловкладення в бокових крайках ванни. Дослідження переміщення дуги і тепловкладення проводили при зварюванні дротом діаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м і складовим електродом, який складається з дроту діаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м і стрічки $(45 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ м. Наплавлення проводили при струмі 2100 А, напруги на дузі 32 В і швидкості $3,8 \cdot 10^{-2}$ м/с. Тепловкладення оцінювали за макрошліфами шляхом вимірювання глибини проплавлення і ширини шва.

При зварюванні дротяним електродом дуга переміщується по концентрованій поверхні дроту, посилюється тепловкладення на осі, глибина проплавлення зростає до $12 \cdot 10^{-3}$ м, а ширина шва зменшується до $12 \cdot 10^{-3}$ м.



а



б

Рис. 2 – Вплив форми електроду (а) і відстані між прямолінійними ділянками стрічки (б) на розміри шва: а – 1, 2, 3 – складовий електрод (1 – $B = 31,9 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $B = 18 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $B = 6,9 \cdot 10^{-3}$ м); 4 – дротяний електрод; б – 1 – $K = 2 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $K = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $I = 2100$ А, $U = 32$ В, $V = 3,8 \cdot 10^{-2}$ м/с

При зварюванні складовим електродом дуга переміщується в поздовжньому і перпендикулярному напрямках на прямолінійних ділянках стрічки і дроті, глибина проплавлення зменшується, ширина шва збільшується. Значно зростає площа, по якій переміщується дуга і знижується тиск дуги, що експериментально встановлено при вимірі тиску. Зниження тиску дуги забезпечує відсутність витікання рідкого металу з ванни і якісне формування зворотного валику при односторонньому високошвидкісному зварюванні на флюсовій подушці з склоподібним флюсом мілкої грануляції незалежно від зазору в стику.

Зі збільшенням довжини прямолінійних ділянок стрічки з $6,9 \cdot 10^{-3}$ м до $31,9 \cdot 10^{-3}$ м зростає переміщення дуги на стрічці і тепловкладення в бокові крайки ванни, глибина проплавлення в області стрічки збільшується, в області дроту зменшується з $8 \cdot 10^{-3}$ м до $4 \cdot 10^{-3}$ м, ширина шва зростає з $15 \cdot 10^{-3}$ м до $24 \cdot 10^{-3}$ м. Однак в області переходу від проплавлення стрічкою до проплавлення дротом утворюються тріщини, тому довжина прямолінійних ділянок обмежена

Значно менше впливає на розміри шва і тепловкладення відстань між прямолінійними ділянками U-подібної стрічки. При зростанні відстані між прямолінійними ділянками стрічки з $4 \cdot 10^{-3}$ м до $12 \cdot 10^{-3}$ м зменшується тепловкладення на осі і глибина проплавлення та збільшується тепловкладення у бокових крайок ванни і ширина шва, що забезпечує зниження магнітного тиску і відсутність утворення підрізів.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні зростає швидкість кристалізації $V_{кр} = V_{зв} \cdot \cos\phi$, здрібнюється мікроструктура, зменшується міжатомна відстань, зростають міжатомні зв'язки і підвищується ударна в'язкість зварних з'єднань.

Переміщення дуги по торцю електрода в поздовжньому і перпендикулярному напрямках досліджено при високошвидкісній кінозйомці 1500 кадрів в секунду. На кінограмах чітко видно, що дуга збуджується на кромці стрічки тільки при закорочуванні на основний метал. Дуга переміщується в сторону меншого магнітного поля зварювального струму під дією електромагнітної сили в хвостову частину ванни, де магнітне поле менше, так як струм тече по шляху найменшого опору більше за межами ванни.

Згідно закону Біо-Савара індукція магнітного поля прямо пропорційна магнітній проникності μ і величині струму I і обернено пропорційна відстані від провідника опором R :

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

Пропорційно індукції, величині струму I і довжині дуги L змінюється електромагнітна сила [5]:

$$F = IBL, \text{ Н.} \quad (2)$$

В квадратичній залежності від індукції змінюється магнітний тиск [7], який прямо пропорційний квадрату індукції магнітного поля B і обернено пропорційний магнітній проникності середовища μ :

$$P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu}, \text{ Па.} \quad (3)$$

Магнітний тиск визначає пінч-ефект, який залежить від діаметра зварювального дроту і площі, якою переміщується дуга, концентрацію дуги і тепловкладення.

На основі проведених досліджень впливу форми електрода на переміщення дуги по торцю електрода і тепловкладення, встановлено оптимальні розміри складового електрода – дріт Зв08Г2С діаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м, U-подібна стрічка Ст08КП $(45 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ м з довжиною прямолінійних ділянок стрічки $18 \cdot 10^{-3}$ м і відстанню $7 \cdot 10^{-3}$ м між ними.

Розроблено рівняння процесу розповсюдження тепла при односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом, який представлено як сукупність трьох джерел тепла: дуги на торці дроту з прилеглими ділянками стрічки і двох прямолінійних ділянок стрічки. Дуга на торці дроту, яка проплавляє метал на всю товщину, – лінійне джерело тепла, дуга на прямолінійних ділянках стрічки – поверхневе джерело кінцевої ширини. Розрахунок за розробленим рівнянням дає хорошу схожість розрахункових даних з шириною шва, що підтверджує адекватність розробленого рівняння. Таким чином, складовий електрод можна представити як сукупність трьох джерел тепла – одного лінійного і двох поверхневих кінцевої ширини.

Висновки

1. Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей обмежено порушенням формування зворотного валика на флюсовій подушці внаслідок витікання рідкого металу з ванни, стабільності процесу та утворенням підрізів під дією магнітного поля зварювального струму і зниженням ударної в'язкості зварних з'єднань.

2. При односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом забезпечується переміщення дуги в подовжньому і перпендикулярному напрямках, зниження тиску дуги в 4 рази, зростання швидкості кристалізації рідкого металу, відсутність витікання металу з ванни і якісне формування швів зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику.

3. Регулювання переміщення дуги по торцю електрода і зварювальній ванні забезпечує посилення тепловкладення у бокових крайок ванни, електричного опору і зменшення струму, що тече по боковим крайкам ванни і магнітного поля, внаслідок чого знижується спрямований вниз магнітний тиск і попереджається утворення підрізів, природа яких електромагнітна.

4. Одностороннє високошвидкісне зварювання забезпечує зменшення тепловкладення, погонної енергії, зварювальних напруг, зростання швидкості кристалізації, яка рівна швидкості зварювання, здрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань

5. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом, який забезпечує за рахунок регулювання переміщення дуги по торцю електрода і зварювальній ванні зниження тиску дуги і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці, зменшення магнітного тиску і відсутність підрізів, стабільність процесу, зниження тепловкладення і зварних напруг, здрібнення мікроструктури і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2-2,5 рази.

Перелік використаних джерел:

1. К вопросу о саморегулировании дуги при сварке плавящимся электродом / Б.Е. Патон, С.Ю. Максимов, В.С. Сидорук, Ю.Н. Сараев // Сварочное производство. – 2014. – № 12. – С. 3-11.
2. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой / И.К. Походня, В.Н. Шлепаков, С.Ю. Максимов, И.А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34-42.
3. Максимов С.Ю. Особенности дуги с импульсным саморегулированием процессу плавления электрода при ручному дуговому зварюванні / В.С. Сидорук, Д.М. Кражановський // Автоматичне зварювання. – 2019. – № 12. – С. 25-32. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/as2019.12.03>.
4. Управление геометрией сварного шва аппаратными средствами при механизированной и автоматической дуговой сварке плавящимся электродом / В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов, А.М. Жерносеков, Ю.Н. Сараев // Сварочное производство. – 2014. – № 5. – С. 10-16.
5. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 369 с.
6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
7. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
8. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.

References:

1. Paton B.E., Maksimov S.Iu., Sidoruk B.C., Saraev Iu.N. K voprosu o samoregulirovanii dugi pri svarke plaviashchimsia elektrodom [On the issue of arc self-regulation in consumable electrode welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 2014, № 12, pp. 3-11. (Rus.)
2. Pokhodnia I.K., Shlepakov V.N., Maksimov S.Iu., Riabtsev I.A. Issledovaniia i razrabotki IES im. E.O. Patona v oblasti elektrodugovoi svarki i na plavki poroshkovoii provolokoi [Research and development of IES them. E.O. Paton in the field of electric arc welding and melting with flux-cored wire]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 2010, № 12, pp. 34-42. (Rus.)
3. Sidoruk V.S., Krazhanovskii D.M. Osoblivosti dugi z impul'snim samoregulirovanniam protsesu plavlennia elektroda pri ruchnomu dugovomu zvariuvanni [Features of an arc with pulse self-

- regulation of process of melting of an electrode at manual arc welding]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, 2019, № 12, pp. 25-32. doi:10.15407/as2019.12.03.
4. Lebedev V.A., Maksimov S.Iu., Zhernosekov A.M., Saraev Iu.N. Upravlenie geometrii svarnogo shva apparatnymi sredstvami pri mekhanizirovannoi i avtomaticheskoi dugovoi svarke plaviashchimsia elektrodom [Control of the geometry of the weld by hardware in mechanized and automatic arc welding with a consumable electrode]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 2014, № 5, pp. 10-16. (Rus.)
 5. Finkel'burg V., Mekker G. *Elektricheskie dugi i termicheskaja plazma* [Electric arcs and thermal plasma]. Moscow, Izd-vo inostr. lit. Publ., 1961. 369 p. (Rus.)
 6. Abramovich G.N. *Prikladnaia gazovaia dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 824 p. (Rus.)
 7. Vinokurov V.A., Grigor'iants A.G. *Teoriia svarochnykh deformatsii i napriazhenii* [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (Rus.)
 8. Rykalin N.N. *Raschet teplovykh protsessov pri svarke* [Calculation of thermal processes during welding]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.08.2021