

УДК 621.791.753.042

© Щетинин С.В.<sup>1</sup>, Щетинина В.І.<sup>2</sup>, Никитенко П.В.<sup>3</sup>,  
Коваль А.В.<sup>4</sup>**ПРИРОДА ОБРАЗОВАНИЯ ПОДРЕЗОВ**

Установлены закономерности влияния формы электрода на движение дуги по торцу электрода и сварочной ванне, тепловложение, формирование швов и электромагнитная природа образования подрезов. Разработан способ односторонней высокоскоростной сварки составным электродом на низкой погонной энергии, обеспечивающий качественное формирование швов на флюсовой подушке и повышение ударной вязкости сварных соединений в 2-2,5 раза.

**Ключевые слова:** подрезы, электромагнитная сила, магнитное давление, высокоскоростная односторонняя сварка, составной электрод, ударная вязкость.

**Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Никитенко П.В., Коваль О.В. Природа утворення підрізів.** Встановлені закономірності впливу форми електроду на рух дуги по торцю електроду і зварювальній ванні, тепловкладення, формування швів і електромагнітна природа утворення підрізів. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання на низькій погонній енергії, який забезпечує якісне формування швів на флюсовій подушці і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань у 2-2,5 рази.

**Ключеві слова:** підрізи, електромагнітна сила, магнітний тиск, високошвидкісне одностороннє зварювання, складовий електрод, ударна в'язкість.

**S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, P.V. Nikitenko, O.V. Koval. The nature of the undercuts formation.** The electromagnetic nature of the undercuts formation has been established. As welding speed increases, the diameter of active spots decreases, heat input to the side edges of the bath reduces, the electrical resistance of the side edges decreasing. As a result, the amount of current flow through the bath side edges increases as well as increase of the field induction, electromagnetic force and the magnetic pressure, under which the liquid metal flows down from the bath edges, which leads to the undercuts formation. The regularity of the electrode shape influence and the metal thickness on the formation of welded joints and the undercuts formation is established, according to which, with a decrease of the metal thickness, the tendency to undercutting decreases as a result of a decrease in the ferromagnetic mass directed downward in the region of the bath side edges of the electromagnetic forces and magnetic pressure, what provides the qualitative welds formation and confirms the electromagnetic nature of the undercuts formation. A method has been developed for high-speed one-side welding with a composite electrode. This process provides a heat input increase to the side edges of the bath, electrical resistance increase, current decrease, electromagnetic forces and magnetic pressure, directed downward in the regions of the bath side edges decrease, high-quality seams without undercuts, the reverse roller on the flux cushion, the microstructure grinding and an increase in the toughness of welded joints.

**Keywords:** undercuts, electromagnetic force, magnetic pressure, high-speed one-sided welding, composite electrode, impact strength.

**Постановка проблемы.** Эффективным способом повышения механических свойств сварных соединений и улучшения формирования обратного валика при односторонней сварке на флюсовой подушке является увеличение скорости сварки и кристаллизации, что обеспечива-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>4</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

ет измельчение микроструктуры и предотвращает вытекание жидкого металла из сварочной ванны. Однако повышение скорости сварки ограничено нарушением формирования швов в результате образования подрезов, природа которых полностью не установлена, поэтому разработка процессов высокоскоростной односторонней сварки является важной научно-технической проблемой.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Природа образования подрезов фундаментально изучена Б.Е. Патонем, В.К. Лебедевым, И.В. Пентеговым и С.Л. Мандельбергом [1, 2]. Одни считают, что подрезы образуются вследствие увеличения поверхностного натяжения [3], другие – вследствие отклонения дуги назад [4], третьи – в результате повышения давления дуги [1, 2, 5-9]. Однако природа образования подрезов при высокоскоростной сварке полностью не установлена.

**Цель статьи** – исследование причин возникновения подрезов и обеспечение качественного формирования швов, за счет повышения скорости сварки, уменьшения погонной энергии и применения составного электрода.

**Изложение основного материала.** Каждый из изученных факторов влияет на образование подрезов. Давление дуги является результатом действия на дугу собственного магнитного поля, поэтому определяющим является магнитное поле сварочного тока.

По нашему мнению, при увеличении скорости сварки тепловложение по краям сварочной ванны уменьшается, в результате чего сопротивление падает. Соответственно, увеличивается величина тока, проходящего по краям сварочной ванны, и пропорционально току – электромагнитная индукция. В прямой зависимости от индукции возрастают направленные вниз электромагнитная сила и магнитное давление, под действием которых жидкий металл стекает с кромок, что приводит к образованию подрезов при высокоскоростной сварке.

Таким образом, природа образования подрезов – электромагнитная. На основании электромагнитной природы образования подрезов разработан процесс высокоскоростной односторонней сварки составным электродом, состоящим из проволоки внутри *U*-образной ленты, прямолинейные участки которой располагаются впереди проволоки по направлению сварки. Дуга, горящая на прямолинейных участках ленты, увеличивает тепловложение в боковые кромки ванны. В результате электрическое сопротивление возрастает, уменьшается ток через боковые кромки и направленная вниз электромагнитная сила, что предотвращает образование подрезов.

Форма электрода (рис. 1) является одним из основных параметров процесса сварки. Магнитное поле сварочного тока заставляет дугу двигаться, при сварке ленточным электродом: – в перпендикулярном направлении (рис. 1, а); – в продольном направлении (рис. 1, б); – концентрироваться при сварке проволокой (рис. 1, в). При сварке составным электродом дуга движется под действием магнитного поля сварочного тока по торцу электрода в продольном и перпендикулярном направлениях (рис. 1, г).

Для изучения природы образования подрезов исследовали влияние формы электрода и толщины металла на образование подрезов в следующих режимах: проволоочный электрод – ток  $I = 660-760$  А, напряжение  $U = 31-32$  В, скорость  $V_{CB} = (0,55; 0,8; 1,0) \cdot 10^{-2}$  м/с; перпендикулярная лента –  $I = 440-540$  А, напряжение  $U = 29-30$  В, скорость  $V_{CB} = (0,32; 0,45; 0,65) \cdot 10^{-2}$  м/с; составной электрод –  $I = 1900-2000$  А, напряжение  $U = 29-30$  В, скорость  $V_{CB} = (1,3; 2,0; 2,7) \cdot 10^{-2}$  м/с. Пределы изменения погонной энергии ( $q/V$ ): 1,7; 2,6; 3,5 МДж/м.

Вследствие воздействия на движение дуги по торцу электрода и сварочной ванне, форма электрода влияет на критическую скорость сварки, превышение которой приводит к образованию подрезов. Для наплавки перпендикулярной лентой критическая скорость минимальная, продольной лентой – максимальная, проволокой – выше, чем при наплавке перпендикулярной лентой, и составным электродом – выше, чем при наплавке проволокой.

Установлено, что при снижении толщины металла критическая скорость сварки повышается (рис. 2). Это является результатом уменьшения ферромагнитной массы, индукции и направленной вниз электромагнитной силы.

Электромагнитная природа образования подрезов подтверждается тем, что при увеличении толщины свариваемого металла склонность к образованию подрезов возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении толщины возрастает ферромагнитная масса и согласно прин-

ципу суперпозиції індукція магнітного поля сварочного тока, електромагнітна сила і магнітне тиск, максимальне значення якого розташоване на поверхні, де утворюються подрезы.

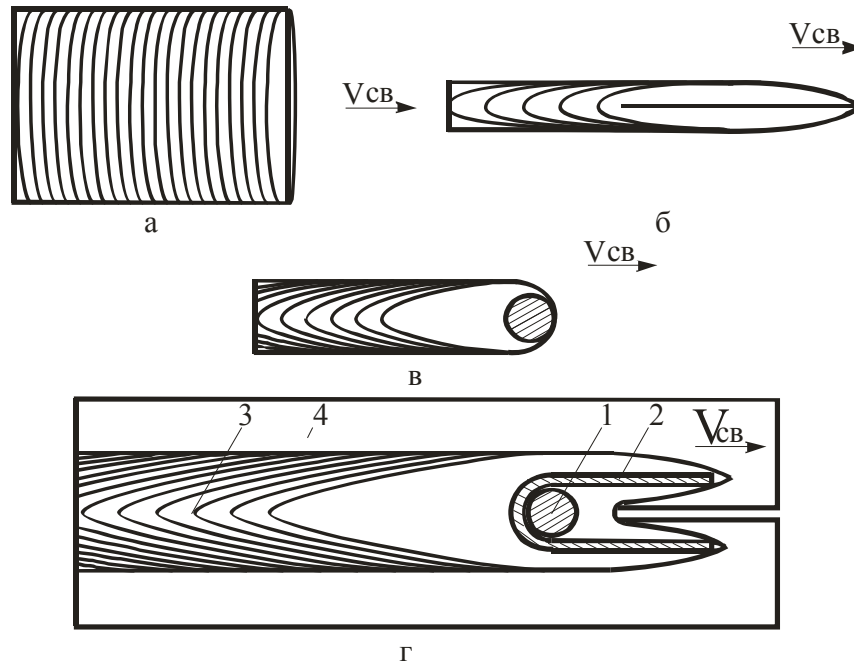


Рис. 1 – Форма електрода: а – перпендикулярна лента; б – подовжня лента; в – проволочка; г – складний електрод

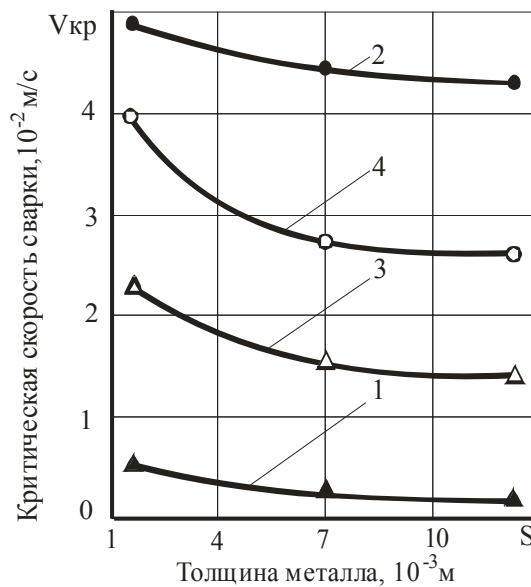


Рис. 2 – Зависимость критической скорости сварки от толщины металла: 1 – перпендикулярная лента  $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$  м; 2 – подовжня лента  $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$  м; 3 – проволочка диаметром  $4 \cdot 10^{-3}$  м; 4 – складний електрод, лента  $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$  м, проволочка диаметром  $4 \cdot 10^{-3}$  м

Исследованные причины образования подрезов позволили разработать способ высокоскоростной односторонней сварки составным электродом, позволяющий улучшить качество формирования обратного валика на флюсовой подушке, обеспечить измельчение микроструктуры и повышение ударной вязкости сварных соединений в 2-2,5 раза.

Установленные закономерности влияния формы электрода и погонной энергии на критическую скорость сварки и разработанный процесс высокоскоростной односторонней сварки могут быть использованы при наплавке.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволяют разработать новые процессы высокоскоростной односторонней сварки, обеспечивающие повышение ударной вязкости и формирование швов без подрезов.

### Выводы

1. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при увеличении скорости сварки тепловложение по краям сварочной ванны уменьшается, в результате чего электрическое сопротивление падает. Соответственно, увеличивается величина тока, проходящего по краям сварочной ванны, и пропорционально току – электромагнитная индукция. В прямой зависимости от индукции возрастают направленные вниз электромагнитная сила и магнитное давление, под действием которых жидкий металл стекает с кромок, что приводит к образованию подрезов при высокоскоростной сварке. Природа образования подрезов – электромагнитная.

2. Установлено, что при уменьшении толщины металла склонность к образованию подрезов снижается вследствие сокращения ферромагнитной массы, индукции и направленной вниз электромагнитной силы, критическая скорость сварки повышается, что подтверждает электромагнитную природу образования подрезов.

3. Разработан процесс высокоскоростной односторонней сварки составным электродом, состоящим из проволоки внутри  $U$ -образной ленты, прямолинейные участки которой располагаются впереди проволоки, по направлению сварки. Дуга, горящая на прямолинейных участках ленты, увеличивает тепловложение в боковые кромки ванны. В результате электрическое сопротивление возрастает, уменьшается ток через боковые кромки и направленная вниз электромагнитная сила, что предотвращает образование подрезов.

### Список использованных источников:

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. Лебедев В.К. Силовое воздействие сварочной дуги / В.К. Лебедев, И.В. Пентегов // Автоматическая сварка. – 1981. – № 1. – С. 7-14.
3. Березовский Б.М. Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла / Б.М. Березовский. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 485 с. – (Математические модели дуговой сварки : в 3-х т.; Т. 3).
4. Казаков Ю.В. Отставание анодного пятна движущейся сварочной дуги / Ю.В. Казаков, В.И. Столбов, К.Б. Корякин // Сварочное производство. – 1986. – № 10. – С. 19-21.
5. Wealleans J.W. Undercutting and weld bead turbulence in TIG-welding / J.W. Wealleans, P. Adams // Welding and metal Fabrication. – June. – 1969. – Pp. 225-257.
6. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением / А.А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.
7. Чернышов Г.Г. Еще раз о роли силового и теплового воздействия дуги в образовании подрезов на повышенных скоростях сварки / Г.Г. Чернышов, В.Л. Ковтун // Сварочное производство. – 1987. – № 2. – С. 42-43.
8. Потехин В.П. Роль давления сварочной дуги в образовании подрезов / В.П. Потехин // Сварочное производство. – 1986. – № 8. – С. 38-39.
9. 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.

### References:

1. Paton B.E., Mandelberg S.L., Sidorenko B.G. Nekotorye osobennosti formirovaniia shvov pri svarke s povyshennoi skorost'iu [Some features of the formation of welds with increased speed]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1971, no.8, pp. 1-6. (Rus.)
2. Lebedev V.K., Pentegov I.V. Silovoe vozdeistvie svarochnoi dugi [Power action of the welding arc]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1981, no.1, pp.7-14. (Rus.)

3. Berezovsky B.M. *Matematicheskie modeli dugovoi svarki. Tom 3: Davlenie dugi, defekty svarnykh shvov, perenos elektrodnoho metalla* [Mathematical models of arc welding. Volume 3: Arc pressure, defects of welded seams, transfer of electrode metal]. Chelyabinsk, IuUrGU Publ., 2003. 485 p. (Rus.)
4. Kazakov Yu.V., Stolbov V.I., Koryakin K.B. Otstavanie anodnogo piatna dvizhushcheisia svarochnoi dugi [The lag of the anode spot of the moving welding arc]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1986, no.10, pp. 19-21. (Rus.)
5. Wealleans J.W., Adams P. Undercutting and weld bead turbulence in TIG-welding. *Welding and metal Fabrication*, 1969, June, pp. 225-257.
6. Erokhin A.A. *Osnovy svarki plavlaniem* [Fundamentals of welding by fusion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 448 p. (Rus.)
7. Chernyshov G.G., Kovtun V.L. Eshche raz o roli silovogo i teplovogo vozdeistviia dugi v obrazovanii podrezov na povyshennykh skorostiakh svarki [Once again on the role of the power and thermal action of the arc in the formation of undercuts at high welding speeds]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1987, no.2, pp. 42-43. (Rus.)
8. Potekhin V.P. Rol' davleniia svarochnoi dugi v obrazovanii podrezov [The role of welding arc pressure in the formation of undercutting]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1986, no. 8, pp. 38-39. (Rus.)
9. Chernyshov G.G., Kovtun V.L. Vliianie teplovogo potoka i davleniia dugi na predel'nuiu skorost' svarki [Influence of heat flow and arc pressure on the maximum welding speed]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1985, no.2, pp. 14-15. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 27.07.2017