

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.927

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160243

© Лещинский Л.К.¹, Матвиенко В.Н.², Здорьев В.Н.³, Жижома О.И.⁴,
Богданов И.В.⁵, Писарев А.К.⁶, Павлюк М.П.⁷**НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА
РАСПЛАВОМ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ**

Представлены данные, свидетельствующие, что при наплавке одним и двумя ленточными электродами от параметров режима зависит соотношение дугового и шлакового процессов, направление и интенсивность конвективных потоков в сварочной ванне, что влияет на неравномерность проплавления основного металла. Анализ результатов экспериментов показывает, что возникновение неравномерного проплавления связано с механизмом теплопередачи от расплава ванны основному металлу. Это в значительной мере влияет на неравномерность абсолютной величины глубины проплавления. В условиях наплавки двумя ленточными электродами абсолютная величина, неравномерность, а также несимметричность поперечного сечения зоны проплавления, зависят от токовой нагрузки ленточных электродов.

Ключевые слова: наплавка, основной металл, глубина проплавления, неравномерность, сварочная ванна, расплав, теплопередача, конвективные потоки, ленточные электроды, токовая нагрузка электродов.

Лещинський Л.К., Матвієнко В.М., Здор'єв В.М., Жижома О.І., Богданов І.В., Писарев А.К., Павлюк М.П. Нерівномірність проплавлення основного металу розплавом зварювальної ванни при наплавленні. Наведені дані, які показують, що при наплавленні одним і двома стрічковими електродами від параметрів режиму залежить співвідношення дугового і шлакового процесів, напрямок та інтенсивність потоків в зварювальній ванні, що впливає на нерівномірність проплавлення основного металу. Аналіз результатів експериментів показує, що виникнення нерівномірного проплавлення пов'язано з механізмом теплообміну між розплавом ванни та основним металом. Це в значній мірі впливає на нерівномірність абсолютного значення глибини проплавлення. В умовах наплавлення двома стрічковими електродами абсолютне значення, нерівномірність, а також асиметрія поперечного перерізу зони проплавлення основного металу, залежать від співвідношення струмів в стрічкових електродах. Це впливає на характер процесу наплавлення під флюсом, розподіл теплової енергії по ширині джерела, формоутворення зварювальної ванни, об'єм розплавленого металу, площу поперечного перерізу та глибину проплавлення основного металу. При рівному значенні струмів в обох електродах нерівномірність розподілу температури та швидкостей потоку в ванні призводять до заглиблення проплавлення в середині ванни. Коли доля струму у другому (в напрямку наплавлення) електроді зростає до 0,6, збільшується інтенсивність циркуляції розплавленого шлаку, його температура вирівнюється, що впливає на швидкість пото-

¹ д-р техн. наук, професор, Бостон, США

² д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, matviyenkovn@gmail.com

³ студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

⁴ студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

⁵ студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

⁶ студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

⁷ студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

ку металевого розплаву і його рівномірність по ширині зварювальної ванни. Різниця найбільшої й середньої температури, ентальпії та в'язкості розплаву ванни зменшується, як і швидкість потоку. Це підтверджується даними експериментів та показує зниження нерівномірності глибини проплавлення.

Ключові слова: наплавлення, основний метал, глибина проплавлення, нерівномірність, зварювальна ванна, розплав, теплообмін, потоки, стрічкові електроди, співвідношення струмів в електродах.

L.K. Leshchinskiy, V.M. Matvienko, V.M. Zdorev, O.I. Zhyzhoma, I.V. Bogdanov, A.K. Pisarev, M.P. Pavlyuk. *The effect of the molten weld pool on the non-uniform penetration of the parent metal at of surfacing. The data of the molten weld pool influence on the increasing non-uniformity of the parent metal penetration during submerged arc surfacing using one or two strip electrodes have been presented. The experimental results of the investigation show that non-uniform penetration of the parent metal is influenced by the mass and heat flow in the weld pool. The axial bottom flow of the liquid metal during surfacing with one and two strip electrodes results in non-uniform penetration of the parent metal. In the process of submerged arc surfacing using two strip electrodes, the liquid weld metal flow and the penetration of the parent metal depend on the ratio of the current in the first and second strip electrodes. When the current in the first and second strip electrodes is the same the distribution of the temperature and flow rate across the width of the weld pool is not uniform. It leads to mass and heat flow just in the middle of the weld pool and non-uniform penetration of the parent metal with the bottom flow. The non-uniform penetration of the parent metal is influenced by the axial bottom flow. It is shown that raising the fraction of the current in the second strip electrode up to 0,6 from the total current increases the intensity of the circulation of the molten slag; its temperature becomes more equal which changes the flow rate across the width of the weld pool. The difference of the value of the maximum and average temperature, enthalpy and viscosity of the molten weld pool decreases, what influences on flow rate of the liquid metal. The experiments show that the non-uniformity of the parent metal penetration decreases.*

Keywords: submerged arc surfacing, strip electrode, parent metal, penetration, non-uniformity, molten weld pool, axial bottom flow.

Постановка проблеми. Неравномерность проплавления основного металла при наплавке ленточными электродами под флюсом связана не только с поведением источника нагрева, но также с воздействием расплавленного металла ванны, оценка роли которого представляет значительный интерес.

Анализ последних исследований и публикаций. Стремление снизить неравномерность проплавления основного металла вызвано не только необходимостью обеспечить требуемое качество формирования валика. При характерной для наплавки ленточными электродами малой глубине проплавления даже небольшие отклонения от среднего значения приводят к образованию как несплавлений (непроваров), так и локальных проплавлений на отдельных участках границы сплавления. Для широкослойной наплавки возникновение такой неравномерности связано с природой процесса наплавки под флюсом одной и двумя лентами, изменением формы источника нагрева при профилировании, с теплофизическими характеристиками металлической и шлаковой ванны, а также со свойствами основного металла. Неравномерность проплавления зависит от параметров режима, профиля ленточного электрода, поведения дуги и времени её пребывания на отдельных участках торца ленты, величины тока шунтирования, температуры шлака и металла в зазоре между двумя лентами в зависимости от величины зазора и токовой нагрузки (соотношения токов) в лентах. С ростом доли тока во втором электроде увеличивается тепломассоперенос в направлении зоны подачи второго электрода, способствуя выравниванию по ширине ванны поля скоростей потока жидкого металла и более равномерному проплавлению. С гидродинамическими условиями в ванне, направлением и интенсивностью краевых потоков связано влияние геометрии составного электрода на неравномерность проплавления, которое в наибольшей мере проявляется на краях. Подробный анализ природы отмеченных процессов и их влияния на неравномерность проплавления проведен авторами

настоящей статьи в работах [1-4]. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные и обобщённые авторами, базируются на физико-химических закономерностях процесса сварки плавлением, сформулированных А.А. Ерохиным [5]. Это же относится к представлениям о роли расплава ванны в механизме проплавления. Здесь следует отметить полученные экспериментальным и расчётным путём численные данные об изменении ширины и глубины проплавления под воздействием гидродинамических потоков в сварочной ванне [2], результаты изучения влияния тепло-физических свойств расплавленного металла на массотеплоперенос в ванне, изменяющий форму и размеры зоны проплавления [6-8], а также оценку этих изменений, связанных с температурной зависимостью энтальпии и вязкости расплава ванны [9]. Ссылка на работу [8] сделана в связи с сопоставлением приведенных в этой работе расчётных значений энтальпии с полученными в работе [6] экспериментальными данными. Исходя из рассмотренных выше данных, задачей настоящего исследования является получение количественной оценки роли расплава сварочной ванны в неравномерном проплавлении основного металла.

Цель статьи – оценка роли расплава сварочной ванны в неравномерном проплавлении основного металла при широкослойной наплавке.

Изложение основного материала. Нагрев и плавление основного металла, образование сварочной ванны и формирование сварного шва (наплавленного валика) происходит под воздействием источника тепла. Характеристики такого источника при наплавке под флюсом одним и двумя параллельными ленточными электродами существенно отличаются. Однако, несмотря на различия, неравномерность проплавления в поперечном сечении наплавленного валика установлена для обоих процессов. При использовании ленточных электродов Св-07Х25Н13 размерами 60×0,5 мм (флюс ОФ-10) режим наплавки на постоянном токе обратной полярности: для одной ленты – $I_H = 900 \dots 950$ А, $U = 30 \dots 32$ В, $v_H = 10$ м/ч; для двух лент – $I_H = 1250 \dots 1300$ А, $U = 30 \dots 32$ В, $v_H = 20$ м/ч, зазор между лентами – 14...16 мм, соотношение токов в электродах – $N = 0,50 \dots 0,70$; вылет ленточных электродов – 40 мм. В перемежающемся процессе наплавки одной лентой (доля тока, шунтирующего дугу через шлак, – до 40...45%) важная роль в формировании зоны проплавления принадлежит перемещающейся дуге, взаимодействию дуги с расплавом ванны и развитию инициируемых дугой конвективных потоков под воздействием, главным образом, объёмной электромагнитной силы Лоренца. При наплавке двумя ленточными электродами доля шлаковой составляющей может превышать 65...70% и ведущую роль играет перегретый шлак в зазоре между лентами. В случае, когда соотношение токов в электродах $N = 0,50$, высота подъёма и температура шлака максимальна в средней части ванны, что способствует формированию продольного донного потока и локальному проплавлению (рис. 1, а). Наблюдаемая асимметричность зоны проплавления (относительно оси ванны) может быть связана с реакцией сварочного контура на энергетические и технологические возмущения, возникающие в процессе наплавки. В то же время, с ростом токовой нагрузки во втором (по направлению наплавки) электроде до $N = 0,60 \dots 0,70$ усиливается циркуляция шлака в зазоре (что экспериментально подтверждено по распределению в головной части кратера элемента-индикатора, введенного в сварочную ванну через второй электрод), выравнивается температура и высота подъёма шлака. Намного более равномерным по ширине ванны становится поле скоростей течения потока расплавленного металла, о чём можно судить по распределению «островков» аустенита на наплавляемой поверхности [10]. С установленным при этом увеличением ширины ванны (от 54 до 66 мм) и уменьшением её длины (от 63 до 57 мм), сопровождаемым резким снижением неравномерности проплавления (рис. 1, б), связано формирование широкой и мелкой ванны.

При изучении влияния расплава ванны на проплавление основного металла целесообразно использовать методику, позволяющую оценить растворение тугоплавких вставок. Такие вставки в виде пластинок из тантала, вольфрама, молибдена применяются для изучения размеров жидкой прослойки под дугой при сварке и наплавке [5]. Скорость их растворения в жидкой стали зависит от температуры плавления, времени взаимодействия с расплавом, соотношения между площадью поверхности и поперечным сечением пластинки. Это соотношение, зависящее только от толщины пластинки, возрастает почти в четыре раза при уменьшении её толщины от 0,5 до 0,2 мм и является определяющим фактором, влияющим на интенсивность растворения. Подтверждением служит корреляция указанного соотношения с данными о скорости растворения в сварочной ванне вставок из тантала и вольфрама (с учётом их температуры

плавления) [1]. Исходя из более низкой температуры плавления вставок из молибдена, необходимо обеспечить совпадение скорости плавления вставок и основного металла, а также стремления к технологичности составного образца для наплавки под флюсом двумя лентами, толщина вставки, составляющая 0,3 мм, является оптимальной [11].

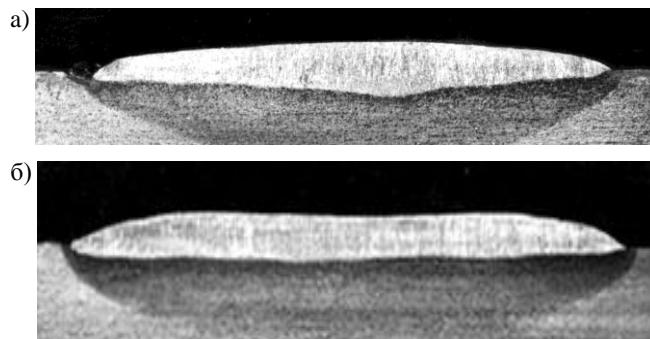


Рис. 1 – Форма валика и характер проплавления при наплавке двумя лентами Св-08Х25Н13 сечением 60×0,5 мм: а) – $N = 0,50$; б) – $N = 0,60$

Обработка результатов выполненных в работе [11] экспериментов по определению глубины проплавления тепломассопереносом конвективными потоками жидкого металла (рис. 2, линии 1, 2) позволила оценить неравномерность проплавления по ширине ванны. При соотношении токов в ленточных электродах $N = 0,50$ такую неравномерность можно описать кривой с максимумом, расположенным в середине ванны. В то же время, характер изменения по ширине ванны общей глубины проплавления отличается не только неравномерностью, но и асимметрией (рис. 1, а; рис. 2, линия 3).

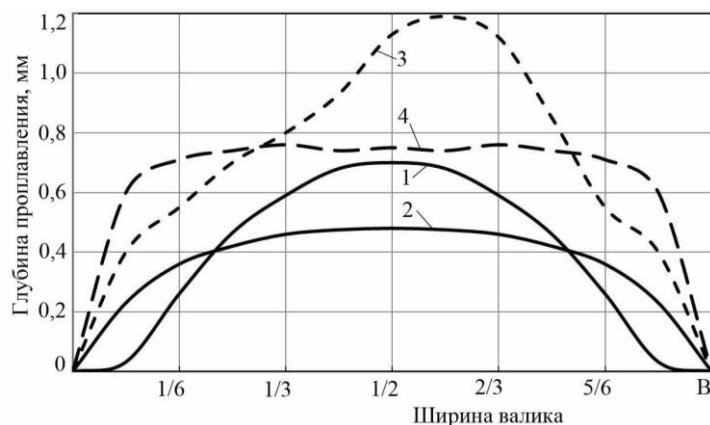


Рис. 2. – Изменение глубины проплавления по ширине наплавленного валика: 1, 2 – проплавление жидким металлом; 3, 4 – общая глубина; 1, 3 – $N = 0,50$; 2, 4 – $N = 0,60$

С ростом доли тока до $N = 0,60...0,65$ снижается неравномерность проплавления жидким металлом, а также общей глубины проплавления (рис. 2, линии 2, 4). Доля проплавления жидким металлом в общей глубине проплавления изменяется от 45...50% на краях ванны до 58...62% в средней части.

Выводы

1. Анализ результатов замеров глубины проплавления основного металла при наплавке двумя ленточными электродами с равной токовой нагрузкой показывает, что проплавление жидким металлом изменяется по кривой с максимумом в средней части ванны и определяется формированием продольного осевого потока. Общая глубина проплавления характеризуется не только неравномерностью, но и асимметрией относительно продольной оси. Возрастание доли тока во втором электроде приводит к большей равномерности по ширине ванны

продольного потока, с чем связана более стабильная глубина проплавления.

- Для рассматриваемого процесса наплавки под флюсом двумя ленточными электродами доля проплавления жидким металлом достигает в средней части ванны ~60% от общей глубины и несколько ниже (~50%) вблизи краёв.

Список использованных источников:

- Лещинский Л.К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин. – Мариуполь : Новый мир, 2005. – 392 с.
- Матвиенко В.Н. Нагрев и плавление основного металла при наплавке составным ленточным электродом / В.Н. Матвиенко, Л.К. Лещинский, В.А. Мазур // Сварочное производство. – 2014. – № 4. – С. 3-7.
- Матвиенко В.Н. Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом / В.Н. Матвиенко, В.А. Мазур, Л.К. Лещинский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – С. 30-33.
- Матвиенко В.М. Математична модель оцінки нерівномірності проплавлення при наплавленні складеним стрічковим електродом / В.М. Матвієнко, В.О. Мазур, Л.К. Лещинський // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 19-20 травня 2015 р. – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 120-121.
- Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А.А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.
- Лаврик В.П. Влияние теплофизических свойств расплава ленточного электрода на характер проплавления металла при широкослойной наплавке / В.П. Лаврик, Л.К. Лещинский, И.И. Пирч // Сварочное производство. – 1985. – № 3. – С. 34-35.
- Матвиенко В.Н. Влияние состава электродной ленты на проплавление основного металла / В.Н. Матвиенко, Л.К. Лещинский, В.А. Мазур // Автоматическая сварка. – 2016. – № 8. – С. 12-14.
- Oh Y.K. Low-Dilution Electroslag Cladding for Shipbuilding / Y.K. Oh, J.H. Davletian // Welding Journal. – 1990. – № 8. – P. 37-44.
- О влиянии энтальпии и вязкости расплава сварочной ванны на формирование зоны проплавления / Л.К. Лещинский [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2017. – Вип. 35. – С. 87-91. – (Серія : Технічні науки).
- Лаврик В.П. Влияние соотношения токов в электродах на условия формообразования ванны при наплавке / В.П. Лаврик, Л.К. Лещинский, В.В. Тарасов // Сварочное производство. – 1986. – № 2. – С. 41-43.
- Особенности формообразования и кристаллизации ванны при наплавке двумя ленточными электродами / В.П. Лаврик, Л.К. Лещинский, В.Н. Бардюгов, В.И. Верник // Сварочное производство. – 1987. – № 2. – С. 39-41.

References:

- Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S. *Sloistye naplavlennyye i uprochnennyye kompozitsii* [Multilayer compositions: surfacing and hardening]. Mariupol, Noviy mir Publ., 2005. 392 p. (Rus.)
- Matvienko V.N., Leschinsky L.K., Mazur V.A. Nagrev i plavlenie osnovnogo metalla pri naplavke sostavnym lentochnym elektrodom [Parent material heating and melting at compound strip-electrode flux surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 2014, no. 4, pp. 3-7. (Rus.)
- Matvienko V.N., Mazur V.A., Leshchinskiy L.K. Otsenka formy i razmerov svarochnoy vanny pri naplavke kombinirovannym lentochnym elektrodom [Evaluation of shape and sizes of weld pool in surfacing using combined strip electrode]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2015, no. 9, pp. 30-33. (Rus.)
- Matvienko V.N., Mazur V.A., Leshchinskiy L.K. Matematychna model' ocinky nerivnomirnosti proplavlenija pry naplavlenni skladenym strichkovym elektrodom. *Dopovidi Mezhn. nauk.-tekhn. konf. «Fundamental'ni ta prykladni problemy suchasnyh tehnologij»* [Mathematical model of computation of nonuniformity of penetration in submerged-arc surfacing with composite strip electrode. Abstracts of the Int. sci.-tech. conf. «Fundamental and applied problems of modern technologies»]. Ternopil, 2015, pp. 120-121. (Ukr.)

5. Erokhin A.A. *Osnovy svarki plavlaniem. Fiziko-khimicheskie zakonomernosti* [Basics of fusion welding. Physico-chemical regularities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 448 p. (Rus.)
6. Lavrik V.P., Leshchinskiy L.K., Pirch I.I. Vliyanie teplofizicheskikh svoystv rasplava lentochного elektroda na kharakter proplavlениya metalla pri shirokosloynoy naplavke [Influence of thermophysical properties of melt strip electrode on the nature of the penetration of metal was explained in coarse-grained surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1985, no. 3, pp. 34-35. (Rus.)
7. Matvienko V.N., Leshchinskiy L.K., Mazur V.A. Vliyanie sostava elektrodnoy lenty na proplavlenie osnovnogo metalla [Influence of electrode strip composition on base metal penetration]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2016, no. 8, pp. 12-14. (Rus.)
8. Oh Y.K., Davletian J.H. Low-Dilution Electroslag Cladding for Shipbuilding. *Welding Journal*, 1990, no. 8, pp. 37-44.
9. Leshchinskiy L.K., Matvienko V.M., Yurchenko I.V., Sukhov N.S., Sopov A.S., Rusnak A.S., Medved P.V. O vliyaniі entalpii i vyazkosti rasplava svarochnoy vanny na formirovaniye zony proplavlениya [The molten weld pool enthalpy and viscosity influence on the formation of the fusion zone]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehniknogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 2017, iss. 35, pp. 87-91. (Rus.)
10. Lavrik V.P., Leshchinskiy L.K., Tarasov V.V. Vliyanie sootnosheniya tokov v elektrodakh na usloviya formoobrazovaniya vanny pri naplavke [Influence of ratio of currents in the electrodes on the conditions shaping baths at surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1986, no. 2, pp. 41-43. (Rus.)
11. Lavrik V.P., Leshchinskiy L.K., Bardyugov V.N., Vernik V.I. Osobennosni formoobrazovaniya i kristallizatsii vanny pri naplavke dvumya lentochnymi elektrodami [Peculiarities of formation and crystallization of the baths at surfacing two strip electrodes]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1987, no. 2, pp. 39-41. (Rus.)

Рецензент: В.И. Щетинина
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 05.09.2018

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160249

© Щетинин С.В.¹, Щетинина В.И.², Коваль А.В.³,
Никитенко П.В.⁴, Элсаед Халед⁵

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ НА НИЗКОЙ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ ВАЛКОВ

Установлены закономерности влияния скорости сварки на процессы в сварочной ванне, формирование швов, сварочные напряжения и трещиностойкость наплавленного металла. Разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, обеспечивающий снижение сварочных напряжений и измельчение микроструктуры, предотвращение образования трещин, повышение трещиностойкости и износостойкости.

Ключевые слова: скорость сварки, сварочные напряжения, микроструктура, высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии, трещиностойкость.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, shchetynin.sergey2012@gmail.com

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

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь