

**ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО**

УДК 621.791.927

© Лещинский Л.К.<sup>1</sup>, Матвиенко В.Н.<sup>2</sup>, Юрченко И.В.<sup>3</sup>,  
Сузов Н.С.<sup>4</sup>, Сопов А.С.<sup>5</sup>, Руснак А.С.<sup>6</sup>, Медведь П.В.<sup>7</sup>**О ВЛИЯНИИ ЭНТАЛЬПИИ И ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВА СВАРОЧНОЙ  
ВАННЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ**

Приведены данные, свидетельствующие, что при наплавке ленточным электродом на размеры зоны проплавления основного металла влияют энтальпия и вязкость расплава, зависящие от среднemasсовой и максимальной температуры сварочной ванны. Показано, что значительно более высокая максимальная температура расплава низкоуглеродистой стали по сравнению с хромоникелевой сталью определяет повышение энтальпии и снижение вязкости расплавленного металла. В условиях наплавки на поверхность изделия с поперечным наклоном возрастание температуры, энтальпии и жидкотекучести расплава приводит к несимметричности сечения зоны проплавления.

**Ключевые слова:** наплавка, ленточный электрод, плавление основного металла, сварочная ванна, расплав, температура, энтальпия, вязкость, площадь проплавления, несимметричность границы сплавления.

*Лещинський Л.К., Матвієнко В.М., Юрченко І.В., Сузов М.С., Сопов О.С., Руснак О.С., Медвідь П.В. Вплив ентальпії та в'язкості розплаву зварювальної ванни на формування зони проплавлення. Наведені дані, які свідчать, що при наплавленні стрічковим електродом на розміри зони проплавлення впливають ентальпія та в'язкість розплаву, які залежать від середньомасової та максимальної температури зварювальної ванни. Показано, що значно більш висока максимальна температура розплаву маловуглецевої сталі в порівнянні з хромонікелевою сталлю визначає збільшення ентальпії і зниження в'язкості. В умовах наплавлення на поверхню виробу з поперечним кутом нахилу збільшення температури, ентальпії та рідинноплинності розплаву приводить до асиметрії перетину зони проплавлення.*

**Ключові слова:** наплавлення, стрічковий електрод, плавлення основного металу, зварювальна ванна, розплав, температура, ентальпія, в'язкість, площа проплавлення, асиметрія межі сплавлення.

**L.K. Leshchinskiy, V.M. Matvienko, I.V. Yurchenko, N.S. Sukhov, A.S. Sopov, A.S. Rusnak, P.V. Medved. The molten weld pool enthalpy and viscosity influence on the formation of the fusion zone. The data of the effect of the chemical composition, enthalpy, and viscosity of the molten metal in submerged arc surfacing with a strip electrode on the shape and size of the fusion zone of the parent metal has been presented. The enthalpy and viscosity of the molten weld pool depend on its temperature and influence on the liquid metal flow and heat transfer. The average values of enthalpy and viscosity**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, г. Бостон, США

<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, [matviyenkovn@gmail.com](mailto:matviyenkovn@gmail.com)

<sup>3</sup> студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

<sup>4</sup> студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

<sup>5</sup> студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

<sup>6</sup> студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

<sup>7</sup> студент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

*of the molten weld pool of mild carbon steel and stainless steel are different. It is shown that the difference in the values of the maximum and average mass temperature of molten weld pool of mild carbon steel is much greater than that of the stainless steel molten weld pool. It should be taken into consideration that the difference in these values in some parts of the weld pool is even greater. Because of that, the effective values of enthalpy may be much higher and the viscosity much lower than the mean values. The increased fluidity of the mild carbon steel weld pool favours the flow rate and intensifies its convection. It results in asymmetry of the fusion zone cross section in hardfacing with a strip electrode on the plate with a transverse slope.*

**Keywords:** *submerged arc surfacing, strip electrode, weld pool, temperature, enthalpy, viscosity, parent metal, fusion zone, shape, size, penetration, asymmetry.*

**Постановка проблеми.** В формировании зоны проплавления основного металла, определяемом мощностью и сосредоточенностью источника нагрева, вместе с тем значительна роль расплава сварочной ванны. Роль последнего зависит от характера передачи тепла от перегретой источником нагрева поверхности ванны вглубь и связана с факторами, определяющими интенсивность тепломассопереноса. При этом в зависимости от погонной энергии источника, состава и температуры плавления основного металла изменяется не только объём ванны, но также степень её перегрева выше температуры плавления, что должно влиять на теплофизические свойства и интенсивность конвекции жидкого металла. Поэтому в исследовании влияния тепломассопереноса расплавом ванны на формирование зоны проплавления значительный интерес представляет оценка влияния температуры ванны на энтальпию и вязкость расплавленного металла.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для процесса сварки плавлением (наплавки) форма и размеры зоны проплавления зависят от погонной энергии источника нагрева. С увеличением погонной энергии от 2000 до 8000 кал/см площадь проплавления возрастает в 3,5-4,0 раза, что характерно для использования в качестве основного металла стали и цветных металлов. Такое влияние погонной энергии, согласно представлениям о механизме проплавления при дуговой сварке, связывают с взаимодействием дугового разряда с расплавленным металлом ванны, вытеснением давлением дуги жидкой прослойки из головной части ванны и улучшением передачи тепла твёрдому металлу [1, 2]. С этих позиций, однако, трудно объяснить влияние скорости сварки на геометрию проплавления. По данным работы [3], которые согласуются с другими работами, с увеличением скорости сварки глубина проплавления возрастает, а затем снижается. Неоднозначный характер этой зависимости связан со сложностью механизма проплавления. Так, с увеличением скорости сварки с 1,5 до 2,0 мм/с, хотя погонная энергия снижается с 1825 до 1370 Дж/мм, глубина проплавления возрастает от 4,6 до 5,6 мм. Однако дальнейшее увеличение скорости сварки лишь на 0,16 мм/с приводит к снижению глубины проплавления на 0,6 мм. Следовательно, можно говорить об изменении характера теплопередачи (о наличии точки перегиба), после прохождения которой размеры зоны проплавления уменьшаются, несмотря на снижение толщины жидкой прослойки. По-видимому, здесь оказывает влияние конвективный тепломассоперенос в сварочной ванне и передача существенной части тепла расплавленным металлом. Последнее зависит от температуры (степени перегрева ванны над точкой плавления металла) и её влияния на теплофизические свойства расплава [4, 5]. При этом основным является влияние степени перегрева на возрастание энтальпии (теплосодержания) и снижение вязкости расплавленной стали, во многом определяющих эффективность проплавления жидким металлом.

**Цель статьи** – оценка влияния энтальпии и вязкости расплава ванны на эффективность проплавления основного металла.

**Изложение основного материала.** Влияние температуры плавления  $T_{пл}$  и энтальпии расплава сварочной ванны на нагрев и расплавление основного металла, оцениваемое площадью проплавления при наплавке под флюсом ленточным электродом сечением 60×0,5 мм, показано на рис. 1.

Представленные данные получены при обработке результатов экспериментов, проведенных в работе [4], а также с использованием расчётов на математической модели процесса нагрева основного металла путём решения нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности с учётом зависимости от температуры теплофизических свойств материала.

ла [6]. При этом изменение расчётных значений площади проплавления хорошо согласуется с изменением энтальпии расплава ванны. Аналогичная оценка влияния энтальпии на размеры зоны проплавления, полученные экспериментальным путём, отличаются в большей мере. По-видимому, здесь следует учитывать зависимость энтальпии от температуры. Результаты таких исследований, выполненных в работах [7-9], показывают, что величина энтальпии растёт от 1320-1580 Дж/г с повышением температуры в пределах 1560-1850°С для низкоуглеродистой стали 10ГС и от 1136 до 1280 Дж/г с повышением температуры от 1450 до 1630°С для хромо-никелевой стали 08Х19Н10. При этом усреднённые по объёму значения температуры сварочной ванны для низкоуглеродистой и хромоникелевой стали отличаются на 140-150°, а максимальные отличаются на 350-400°. Следовательно, эффективные значения энтальпии расплавов этих сталей различаются в значительно большей мере, чем усреднённые, что подтверждается анализом полученной в работе [9] температурной зависимости энтальпии:

$$(H_T - H_{298}) = a'(T) + (b'/2)T^2 + c'/T^{-1} - d' \dots,$$

где  $a, b, c$  – константы, связанные с составом расплавленного металла;  
 $d' = a(298) + (b/2)298^2 + (c/298)$ .

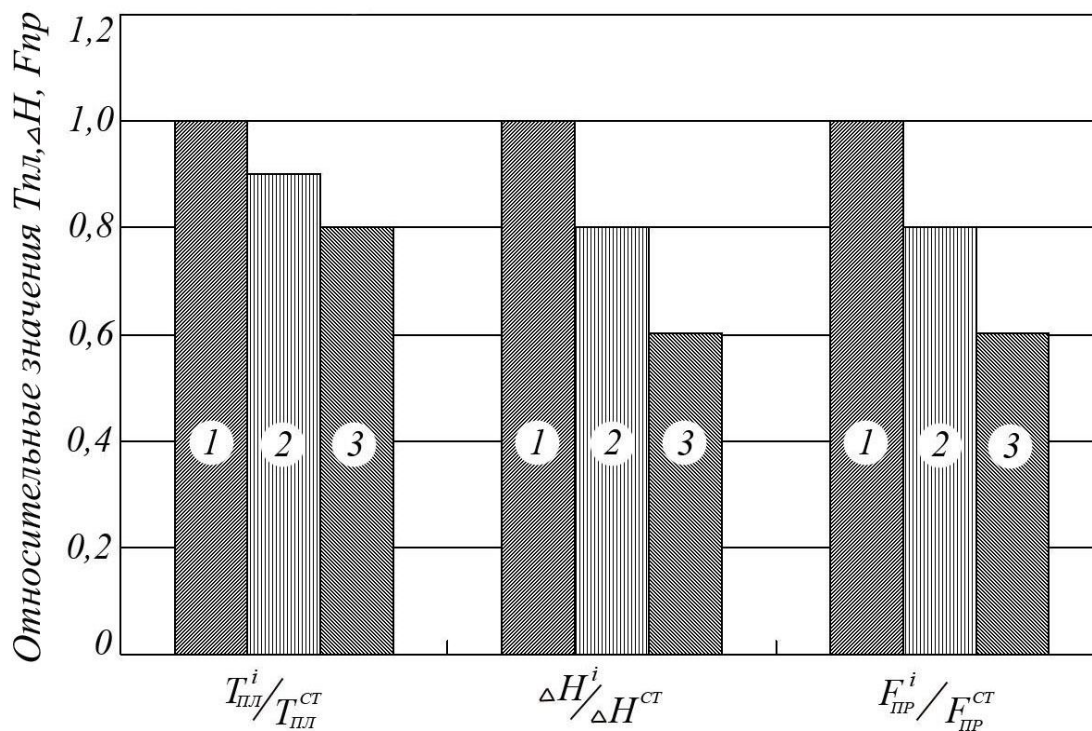


Рис. 1 – Влияние изменения температуры плавления  $T_{пл}$  и энтальпии расплава ванны  $\Delta H$  на относительное значение площади проплавления  $F_{пр}$ : 1 – низкоуглеродистая сталь; 2 – хромоникелевая сталь; 3 – медно-никелевый сплав

График этой зависимости в диапазоне температуры 200-2200 К характеризуется разрывом функции и изменением градиента роста энтальпии (при температуре, превышающей 1750 К, градиент составляет 170 Дж/г на 100 К).

Изучение макрошлифов наплавленных валиков, представленных в работе [4], показало, что при наплавке на пластину, наклонённую на 8° в направлении, перпендикулярном вектору скорости наплавки, зона проплавления в поперечном сечении становится несимметричной относительно оси валика (рис. 2).

Нарушение симметрии вызвано влиянием силы гравитации, воздействующей на расплавленный металл ванны [10]. Поскольку представленная на рис. 2 несимметричность проплавления выявлена при наплавке валика малоуглеродистой стали (что не имеет места для хромони-

келевой стали), её образование, по-видимому, связано с влиянием состава на течение расплавленного металла. Оценить течение жидкости позволяет зависящее от состава и температуры значение вязкости – величины, обратной текучести. Экспериментальные и расчётные значения вязкости в зависимости от температуры для ряда составов расплавленной стали получены в работах [8, 11, 12]. Анализ представленных в этих работах уточнённых данных, полученных с использованием вибрационного метода вискозиметрии, позволяет оценить пределы изменения вязкости расплава в диапазоне температур существования ванны. Для состава ванны, соответствующего стали 08X18H10 (с температурой перегрева над точкой плавления до 150°C), вязкость изменяется от 6,8 до 5,8 МПа·с и при наплавке с наклоном пластины форма зоны проплавления изменяется незначительно. В то же время, для расплава малоуглеродистой стали, за счёт большого перегрева над точкой плавления (до 400°C), вязкость изменяется от 6,0 до 4,4 МПа·с. При столь низкой вязкости течение перегретого до 1800-1850°C жидкого металла, направленное от середины к краям мелкой ванны, оплавляет основной металл, нагретый до температуры плавления. В результате формируется граница сплавления с максимумом глубины проплавления, расположенным на расстоянии  $\sim 1/4$  ширины от края валика, что необходимо учитывать при разработке технологии наплавки.

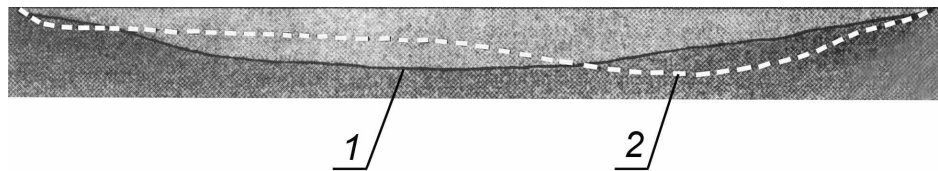


Рис. 2 – Граница поперечного сечения зоны проплавления при наплавке ленточным электродом горизонтальную плоскость (1) и с поперечным наклоном пластины (2)

### Выводы

1. Эффективные значения энтальпии расплава сварочной ванны связаны с максимальной температурой и превосходят усреднённые. Это же относится к снижению вязкости расплава (увеличению жидкотекучести).
2. Превышению максимальной температуры расплава низкоуглеродистой стали в сравнении с хромоникелевой сталью соответствуют более высокие значения энтальпии и меньшие – вязкости. Этим определяется большая проплавливающая способность направленного от середины к краям ванны потока жидкого металла, следствием чего является несимметричность сечения зоны проплавления при наплавке ленточным электродом на поверхность с поперечным наклоном.

### Список использованных источников:

1. Debroy T. Mathematical Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Fusion Welding / T. Debroy // Mathematical Modeling of Weld Phenomena. – London : The Institute of Materials, 2001. – Vol. 5. – Pp. 1-19.
2. Kou S. Welding Metallurgy / S. Kou. – 2nd ed. – New Jersey : A Wiley-Interscience Publication, 2003. – 461 p.
3. Singh J. Effect of Welding Speed on Depth of Penetration During Arc Welding of Mild Steel Plate / J. Singh // International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology. – 2014. – Vol. 4. – Issue 2. – Pp. 50-52.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Miettinen J. Calculation of Thermo-physical Properties of Carbon and Low Alloyed Steels for Modeling of Solidification Processes / J. Miettinen, S. Louhenkilpi // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 1994. – Vol. 25. – Issue 6. – Pp. 909-916.
8. Mills K.C. Recommended values of Thermo-physical properties for selected commercial alloys / K.C. Mills. – Cambridge : Wood head Publishing, 2002. – 244 p.
9. Mills K.C. Equations for the Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steels / K.C. Mills, Y. Su, Z. Li, R.F. Brooks // *ISIJ International*. – 2004. – Vol. 44. – Issue 10. – Pp. 1661-1668.
10. Лещинский Л.К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин. – Мариуполь : Новый мир, 2005. – 392 с.
11. Measurement of viscosities of metals and alloys with an oscillating viscometer / R.F. Brooks [et al.] // *High Temperatures–High Pressures*. – 2001. – Vol. 33. – Pp. 73-82.
12. Макуров Л.С. Оценка расчётных методов определения вязкости жидкой стали / Л.С. Макуров, М.В. Епишев // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Мариуполь, 2006. – Вип. 16. – С. 31-34.

#### References:

1. Debroy T. Mathematical Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Fusion Welding. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena*, 2001, vol.5, pp. 1-19.
2. Kou S. *Welding Metallurgy* (second edition). New Jersey, A Wiley-Interscience Publ., 2003. 461 p.
3. Singh, J. Effect of Welding Speed on Depth of Penetration During Arc Welding of Mild Steel Plate. *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, 2014, vol.4, iss.2, pp. 50-52.
4. Lavrik V.P., Leshchinskiy L.K., Pirch I.I. Vliyanie teplofizicheskikh svoystv rasplava lentochного электрода na kharakter proplavleniya metalla pri shirokosloynoy naplavke [Influence of thermo-physical 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.)
5. Matvienko V.N., Leshchinskiy L.K., Mazur V.A. Vliyanie sostava elektrodnoy lentyy na proplavlenie osnovnogo metalla [Influence of electrode strip composition on base metal penetration]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2016, no.8, pp. 12-14. (Rus.)
6. 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.)
7. Miettinen J., Louhenkilpi S. Calculation of Thermo-physical Properties of Carbon and Low Alloyed Steels for Modeling of Solidification Processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1994, vol. 25, iss.6, pp. 909-916.
8. Mills K.C. Recommended values of Thermo-physical properties for selected commercial alloys. Cambridge, Wood head Publ., 2002. 244 p.
9. Mills K.C., Su Y., Li Z., Brooks R.F. Equations for the Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steels. *ISIJ International*, 2004, vol. 44, iss. 10, pp. 1661-1668.
10. Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S. *Sloistye naplavlennyye i uprochnennyye kompozitsii* [Multilayer compositions: surfacing and hardening]. Mariupol, Noviy mir Publ., 2005. 392 p. (Rus.)
11. Brooks R.F., Day A.P., Andon R., Chapman L., Mills K., Quedstedt P. Measurement of viscosities of metals and alloys with an oscillating viscometer. *High Temperatures – High Pressures*, 2001, vol.33, pp. 73-82.
12. Makurov L.S., Epishev M.V. Otsenka raschetnykh metodov opredeleniya vyazkosti zhidkoy stali [Evaluation of calculation methods for determining the viscosity of liquid steel]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehniknogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2006, iss. 16, pp. 31-34. (Rus.)

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

Статья поступила 16.10.2017