

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 Priazovskogo 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

Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Коваль А.В., Никитенко П.В., Елсаєд Халед. Підвищення тріциностійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії валків. Валки прокатних станів працюють при високих питомих тисках і виготовляються з високовуглецевої сталі, схильної до утворення тріщин. Тому підвищення тріциностійкості є важливою науково-технічною проблемою. Ефективним способом підвищення тріциностійкості є високошвидкісне електродугове наплавлення на низькій погонній енергії, при якому змінюються умови існування дуги, зменшується тепловкладення, збільшується швидкість нагріву і охолодження рідкого металу. Це призводить до зміни умов кристалізації ванни і якості наплавленого металу. Підвищення швидкості наплавлення призводить до посилення охолодження стовпа і скорочення діаметра дуги, посилення пінч-ефекту і концентрації тепловкладення, що дозволяє збільшити швидкість процесу. Встановлено механізм підвищення тріциностійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії, закономірності впливу швидкості зварювання на процеси в зварювальній ванні, формування швів, деформацію, зварювальні напруги і тріциностійкість наплавленого металу. При збільшенні швидкості наплавлення зменшуються тепловкладення, погонна енергія, деформація, зварювальні напруги, що забезпечує підвищення тріциностійкості. Зі збільшенням швидкості зварювання пропорційно зростає швидкість кристалізації рідкого металу, кристали не встигають вирости, що забезпечує подрібнення мікроструктури, збільшення міжатомих сил зв'язків, межі міцності і підвищення тріциностійкості. Одночасне зниження зварювальних напруг і збільшення межі міцності при швидкісному наплавленні забезпечує підвищення тріциностійкості валків, зниження зварювальних напруг і подрібнення мікроструктури, запобігання утворенню тріщин, підвищення тріциностійкості і зносостійкості валків.

Ключові слова: швидкість зварювання, зварювальні напруги, мікроструктура, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії, тріциностійкість.

S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, A.V. Koval, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled. Crack resistance increase at high-speed surfacing with low heat input. The rolling-mill rolls crack resistance increases at high-speed surfacing with low heat input. The rolling-mill rolls operate under high specific pressures conditions and are produced of high-carbon steel, prone to cracking formation. Therefore crack resistance increase is an important scientific and technical problem. The effective way to improve crack resistance is high-speed electric arc surfacing with low heat input, which changes the arc existence conditions, decreases heat input, increases the rate of the liquid metal heating and cooling. This results in a change in the bath crystallization conditions and the deposited metal quality. The welding speed increase leads to column cooling and the pinch-effect intensification, arc diameter reduction and the heat input concentration, which makes it possible to increase the process speed. Increasing crack resistance mechanism at high-speed surfacing with low heat input, the influence of welding speed regularities on the processes in the weld pool, the weld formation, deformation, welding stresses and the weld metal crack resistance has been established. With the surfacing speed increase both the heat input and heat input rate, and deformation and welding stresses decrease, which provides crack resistance increase. With the welding speed increase the liquid metal crystallization rate increases proportionally, the crystals do not have time to grow, which ensures the microstructure grinding, the interatomic bond forces increase, the tensile strength increase, and increasing crack resistance. Concurrent welding stresses decrease and the tensile strength increase at high-speed surfacing with low heat input provide for increasing crack resistance of rolling-mill rolls. The high-speed surfacing with low heat input which provides welding stresses decrease and microstructure reduction, cracking prevention of rolling-mill rolls and wear resistances increase has been developed.

Keywords: welding speed, welding stresses, microstructure, high-speed surfacing with low heat input, crack resistance.

Постановка проблемы. Валки прокатных станов, которые эксплуатируются при высоких удельных давлениях, подвергаются абразивному износу, термоциклированию и коррозионному износу, в значительной степени определяют качество прокатываемого металла и производительность процесса прокатки. Валки изготавливаются из высокоуглеродистой стали 90ХФ, склонной к образованию трещин, поэтому повышение трещиностойкости и износостойкости является важной научно-технической задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Общеизвестно, что при увеличении скорости сварки усиливается скорость охлаждения и повышается вероятность образования трещин [1]. Однако Н.Н. Прохоров [1] отмечает, что значительное повышение скорости сварки и соответствующее увеличение скорости охлаждения могут привести к снижению вероятности образования трещин. Данные влияния скорости сварки на трещиностойкость наплавленного металла противоречивы. Закономерности воздействия скорости сварки на деформацию, сварочные напряжения и склонность к образованию трещин исследованы недостаточно [1-9].

Цель статьи – изучение механизма повышения трещиностойкости наплавленного металла и разработка процесса высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии валков.

Изложение основного материала. Эффективным способом повышения трещиностойкости является высокоскоростная электродуговая наплавка на низкой погонной энергии, при которой изменяются условия существования дуги, уменьшается тепловложение, увеличивается скорость нагрева и охлаждения жидкого металла. Это приводит к изменению условий кристаллизации ванны и качества наплавленного металла.

Увеличение скорости наплавки приводит к усилению охлаждения столба и сокращению диаметра дуги, усилению пинч-эффекта и концентрации тепловложения.

Повышение скорости сварки ограничено нарушением формирования швов в результате образования подрезов, склонность к образованию которых с увеличением толщины металла возрастает. Природа образования подрезов электромагнитная, поэтому при увеличении толщины свариваемого металла и ферромагнитной массы индукция магнитного поля и направленная вниз электромагнитная сила возрастают, что приводит к стеканию жидкого металла с боковых кромок ванны и образованию подрезов.

При высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии снижается тепловложение и глубина проплавления. Это уменьшает ферромагнитную массу, индукцию магнитного поля и направленную вниз электромагнитную силу, что предотвращает стекание жидкого металла с боковых кромок ванны, образование подрезов и позволяет повысить скорость сварки.

Трещины образуются, когда сварочные напряжения становятся больше предела прочности, поэтому для повышения трещиностойкости необходимо обеспечить минимальные сварочные напряжения, которые определяются по деформациям.

Для исследования влияния скорости сварки на деформацию выполняли сварку пластин $(8 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м и наплавку на пластины $(30 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м составным электродом с различной скоростью. После наплавки измеряли деформацию.

Как установлено, при повышении скорости наплавки, вследствие уменьшения тепловложения, деформация основного металла и сварочные напряжения снижаются (рис.).

Зависимость сварочных напряжений от скорости сварки [5]:

$$\sigma \geq \mu E \frac{q_H}{VF}, \text{ [Па]}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона, для углеродистой стали $\mu = 0,335$ а/с/у;

E – модуль упругости, равный для углеродистой стали $E = (2,0 \dots 2,1)$ МПа;

q_H – эффективная тепловая мощность, Дж/с;

V – скорость сварки, м/с;

F – поперечное сечение пластины, м².

Деформация пластин зависит от сварочных напряжений:

$$f = 0,613l \sqrt{\frac{\sigma - \sigma_{кр}}{E}}, \text{ [м]}, \quad (2)$$

где l – длина пластины, м;

$\sigma_{кр}$ – критическое значение сварочного напряжения, Па.

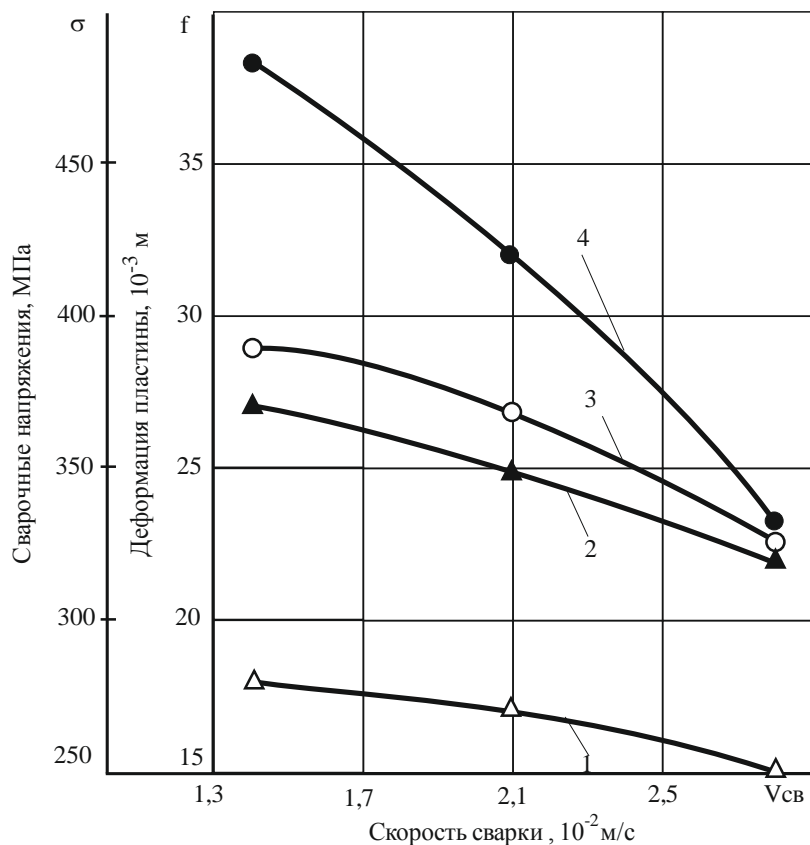


Рисунок – Закономерность влияния скорости сварки на деформацию (1, 2) и сварочные напряжения (3, 4) в пластинах $(30 \times 120 \times 900) 10^{-3}$ м (1, 3); $(30 \times 120 \times 900) 10^{-3}$ м (2, 4)

Критические значения сварочных напряжений:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2, [\text{Па}]. \quad (3)$$

При напряжении больше критического происходит деформация пластины.

Из приведенных выражений следует, что сварочные напряжения прямо пропорциональны деформации пластины:

$$\sigma = \frac{f^2 E}{0,613^2 l^2} + \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2, [\text{МПа}]. \quad (4)$$

С увеличением скорости сварки сварочные напряжения снижаются (рис.), что значительно повышает трещиностойкость и ударную вязкость сварных соединений, которая качественно характеризует трещиностойкость и зависит от микроструктуры. При повышении скорости сварки вследствие увеличения скорости кристаллизации $V_{кр} = V_{св} \cdot \cos\varphi$ уменьшается время пребывания ванны в жидком состоянии, кристаллы не успевают вырасти, что приводит к измельчению микроструктуры, увеличению межатомных сил связей и предела прочности.

Одновременное снижение сварочных напряжений и увеличение предела прочности обеспечивает повышение трещиностойкости и износостойкости валков. На основании установленных закономерностей разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает снижение тепловложения и сварочных напряжений, измельчение микроструктуры, повышение трещиностойкости и износостойкости валков.

Установленные закономерности влияния скорости сварки на сварочные напряжения и микроструктуру и разработанный процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии могут быть использованы при наплавке опорных валков. Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволят разработать новые процессы, обеспечивающие повышение трещиностойкости и износостойкости валков.

Выводы

1. Повышение скорости наплавки приводит к усилению охлаждения столба и сокращению диаметра дуги, усилению пинч-эффекта и концентрации тепловложения, что позволяет увеличить скорость процесса.

2. Установлен механизм повышения трещиностойкости при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии. При увеличении скорости наплавки уменьшаются тепловложение, погонная энергия, деформация и сварочные напряжения, что обеспечивает повышение трещиностойкости наплавленного металла.

3. С увеличением скорости сварки пропорционально возрастает скорость кристаллизации жидкого металла, кристаллы не успевают вырасти, что обеспечивает измельчение микроструктуры, увеличение межзатомных сил связей, предела прочности и повышение трещиностойкости.

4. Одновременное снижение сварочных напряжений и повышение предела прочности обеспечивает при высокоскоростной наплавке повышение трещиностойкости валков.

5. Разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает снижение сварочных напряжений и измельчение микроструктуры, повышение трещиностойкости и износостойкости валков.

Список использованных источников:

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке / Н.Н. Прохоров. – Т. II. – М. : Metallurgy, 1976. – 600 с.
2. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М. : Наука, 1972. – 228 с.
3. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М. : Metallurgy, 1970. – 376 с.
4. Николаев Г.А. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
5. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
6. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – Киев : ЭкоТехнология, 2004. – 160 с.
7. Использование теории твердых тел при расчете напряженно-деформационного состояния деталей, изготовленных с применением аддитивных наплавочных технологий / И.К. Сенченков, И.А. Рябцев, Э. Турык, О.П. Червинко // Автоматическая сварка. – 2016. – № 5-6. – С. 135-140.
8. Оборудование и технологии антикоррозионной электрошлаковой наплавки двумя лентами / И.А. Рябцев, А.А. Бабинец, В.Н. Коржик, И.А. Сийко, Чэкан Юйнен // Автоматическая сварка. – 2017. – № 8. – С. 55-60.
9. Модернизация системы управления плазменно-порошковой наплавки установки А 1756 / Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев, Ю.Н. Ланкин, В.Ф. Семикин, П.П. Осечков // Автоматическая сварка. – 2014. – № 12. – С. 46-49.

References:

1. Prokhorov N.N. *Fizicheskie protsessy v metalle pri svarke. Tom 2* [Physical processes in the metal during welding. Vol. 2]. Moscow, Metallurgy Publ., 1976. 600 p. (Rus.)
2. Shorshorov M.H., Belov V.V. *Fazovye prevrashcheniia i izmeneniia svoistv stali pri svarke* [Phase transformations and changes in properties of the steel during welding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 228 p. (Rus.)
3. Finkel V.M. *Fizika razrusheniia* [Destruction Physics]. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 376 p. (Rus.)
4. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokourov V.A. *Prochnost' svarnykh soedinenii i deformatsii konstruktsii* [Strength of welded joints and structural deformations]. Moscow, Higher School Publ., 1982. 272 p. (Rus.)
5. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. *Teoriia svarochnykh deformatsii i napriazhenii* [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (Rus.)
6. Ryabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kiev, Ecotechnology Publ., 2004. 160 p. (Rus.)

7. Senchenkov I.K., Ryabtsev I.A., Turyk E., Chervinko O.P. Ispol'zovanie teorii tverdykh tel pri raschete napriazhenno-deformatsionnogo sostoianiia detalei, izgotovlennykh s primeneniem additivnykh naplavochnykh tekhnologii [Using the theory of solids in the calculation of the stress-strain state parts made using additive surfacing technology]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 2016, no. 5-6, pp. 135-140. (Rus.)
8. Ryabtsev I.A., Babinets A.A., Korzhik V.N., Siyko I.A., Yunen Chakan. Oborudovanie i tekhnologii antikorrozionnoi elektroshtakovoi naplavki dvumia lentami [Equipment and technologies for anti-corrosion electroslag surfacing with two tapes]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 2017, no. 8, pp. 55-60. (Rus.)
9. Bookbinders E.F., Ryabtsev I.A., Lankin Yu.N., Semikin V.F., Misfire P.P. Modernizatsiia sistemy upravleniia plazmenno-poroshkovoi naplavki ustanovki A 1756 [Modernization of the control system of plasma-powder surfacing of installation A 1756]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 2014, no. 12, pp. 46-49. (Rus.)

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

Статья поступила 31.10.2018

УДК 621.791.927

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160254

© Гулаков С.В.¹, Бурлака В.В.², Міроненко А.І.³

ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ГОРІННЯ ДУГИ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ СТРІЧКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Розглянуто питання стійкості і стабільності горіння дуги при наплавленні стрічковим електродом. Показано, що електрична дуга переміщується по торцю стрічки не поступально, а хаотично. При цьому процес наплавлення супроводжується періодичними короткими замиканнями стрічкового електрода на виріб. Експериментально встановлено, що для підвищення якості наплавленого металу необхідно забезпечити режим з мінімальними флуктуаціями струму дуги. Для вирішення цього завдання необхідно реалізувати можливість швидкого руйнування перемички, що утворюється при замиканні електрода на виріб, і забезпечити надійне повторне збудження електричної дуги. З цією метою запропоновані спосіб і система підвищення стабільності горіння дуги при дуговому наплавленні стрічковим електродом, що складається з інвертора з мікроконтролерним управлінням та узгоджувального високочастотного силового трансформатора, вторинна обмотка якого через конденсатор підключена паралельно зварювальній дузі. При виявленні замикання електрода на виріб (по зниженню напруги на дуговому проміжку) відбувається включення генератора на резонансній частоті контуру, утвореного конденсатором і індуктивністю вторинного ланцюга. На основний робочий струм накладається високочастотна компонента з амплітудою в одиниці кА, що призводить до швидкого нагріву і руйнування перемички. Руйнування фіксується системою управління за фактом підвищення напруги на дуговому проміжку. Після цього генератор відключається до наступного замикання.
Ключові слова: джерело живлення, інвертор, перетворювач, наплавлення, стрічковий електрод, стабільність, зварювальна дуга.

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

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, VladimirV.Burlaka@gmail.com

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, kulyabina-ai@rambler.ru