

17. Kondratiev I.A. The structure and properties of metal, deposited with 25Cr5VMoSi and 30Cr4W2Mo2VSi cored wires / I.A. Kondratiev, V.G. Vasiliyev, V.A. Dovzhenko // Equipment and materials for overlaying. – Kiev : IES im. Ye.O. Patona, 1990. – P. 56-60. (Rus.)
18. Glerdon R. Wear abrasion unlubricated dissimilar metals. Review / R. Glerdon, I. Finni // Theoretical Foundations of engineering calculations. Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers. – 1981. – № 4. – P. 82-93.
19. Bernstein M.L. Strength of steels / M.L. Bernstein. – M. : Metallurgiya. –1974. – 200 p. (Rus.)
20. Gulyaev A.P. About the mechanical properties of structural steels / A.P. Gulyaev // Metallurgy and heat treatment. – 1989. – № 7. – P. 6-8. (Rus.)
21. Panasyuk V.V. Fundamentals of fracture mechanics / V.V. Panasyuk, V.V. Andreikiv, V.Z. Parton. – Kiev : Naukova dumka, 1988. – 488 p. – (Fracture mechanics and strength of materials : reference edition : in 4 vol.; Vol. 1). (Rus.)
22. Utevskiy L.M. Reversible temper brittleness of steel and iron alloys / L.M. Utevskiy, Y.E. Glikman, G.S. Karn. – M. : Metallurgiya, 1987. – 222 p. (Rus.)
23. Armstrong F.W. Weld cladding with wire electrodes / F.W. Armstrong // Weld and Metal Fabrication. – 1973. – 39. – № 3. – P. 87-89.
24. Ivanov V.P. Development of CAD-system for surfacing technology of details of metallurgical equipment : Phd. thesis : 05.03.06 / V.P. Ivanov; Priazovskyi state technical university. – Mariupol, 1996. – 26 p. (Rus.)
25. Dombrovsky F.S. Working capacity of surface rollers of stock continuous casting machines / F.S. Dombrovsky, L.K. Lechtchinski. – Kiev : IES im. Ye.O. Patona, 1995. – 198 p. (Rus.)

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

Статья поступила 24.09.2015

УДК 621.791.753.042

© Щетинин С.В.\*

### ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ НА НИЗКОЙ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Установлены закономерности влияния формы электрода и погонной энергии на скорость охлаждения и кристаллизации жидкого металла сварочной ванны. Разработан способ высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, обеспечивающий измельчение микроструктуры, снижение сварочных напряжений и повышение трещиностойкости деталей металлургического оборудования.*

**Ключевые слова:** скорость кристаллизации, измельчение микроструктуры, сварочные напряжения, высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии.

**Щетинін С.В. Підвищення тріщиностійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії деталей металургійного обладнання.** *Встановлені закономірності впливу форми електроду і погонної енергії на швидкість кристалізації рідкого металу зварювальної ванни. Розроблено спосіб високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує здрібнення микроструктури, зниження зварювальних напруг і підвищення тріщиностійкості деталей металургійного обладнання.*

**Ключеві слова:** швидкість кристалізації, здрібнення микроструктури, зварювальні напруги, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії.

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г.Маріуполь, [schetinin.sergey2012@yandex.ua](mailto:schetinin.sergey2012@yandex.ua)

*S.V. Shchetinin. The metallurgical equipment parts cracking resistance increase at high-speed deposition with low heat input. It has been stated that electrode shape and heat input relates to the arc motion, thermal cycles, the weld pool molten metal crystallization rate and deposited metal microstructure. Surfacing performed with perpendicular and longitudinal ribbon electrodes results in coarse-grained and non-uniform microstructure of the deposited metal. Surfacing made with wire and composite electrodes leads to the microstructure refinement, it becoming small-dispersed and uniform. The electrode shape is the main parameter determining the deposition process, since the arc moving along the butt end of the electrode gets concentrated when surfacing is made with wire and dissipates when surfacing is made with a ribbon electrode, according to its movement either along the longitudinal axis or transverse the weld pool. The arc movement determines heat input in the pool, heating and cooling rates of the molten metal and heat affected zone; surfacing regime being constant. This changes the crystallization conditions of the weld pool, diffusion processes, structural and phase transformations [1,2], and the deposited metal quality. However, the influence of the electrode shape on the deposited metal quality was not investigated properly. It has been proved both through experiments and calculations that when surfacing rate is high and heat input is low, heating and cooling rates increase, the number of crystallization centers grows too and they, lying in front of the growing crystals, slow down their further growth. Deposition rate increasing, the crystallization rate of the weld pool molten metal grows in proportion to it, microstructure gets reduced, welding stresses decrease, these processes resulting in the welded joints toughness increase as well as the cracking resistance of the deposited metal. The process of energy-saving high-speed deposition with low heat input, which provides increase in the heating, cooling and crystallization rates, microstructure reduction, welding stresses decrease and metallurgical equipment parts cracking resistance increase has been developed.*

**Keywords:** *crystallization rate, microstructure reduction, welding stresses, high-speed deposition with low heat input, cracking resistance.*

**Постановка проблеми.** Основной деталью прокатных станов, непосредственно контактирующей с деформируемым металлом, являются валки, которые эксплуатируются при одновременном воздействии высоких температур, ударных нагрузок, развивающихся на входе заготовки в контакт с валками, переменных контактных и термических напряжений, абразивных и коррозионных сред. Поэтому валки изготавливаются из высокоуглеродистой стали, склонной к образованию трещин, и повышение трещиностойкости деталей металлургического оборудования является важной научно-технической проблемой.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Эффективным способом повышения трещиностойкости является высокоскоростная электродуговая наплавка на низкой погонной энергии [1], при которой изменяются условия существования дуги, уменьшается тепловложение, увеличивается скорость нагрева и охлаждения жидкого металла и околошовной зоны. Это приводит к изменению условий кристаллизации ванны [2, 3] и микроструктуры, деформации, сварочных напряжений и качества наплавленного металла. Данные влияния погонной энергии на трещиностойкость наплавленного металла противоречивы [1-10]. Закономерности воздействия формы электрода и погонной энергии на скорость нагрева, охлаждения, кристаллизации, микроструктуру и свойства наплавленного металла исследованы недостаточно.

**Цель статьи** – изучение механизма образования трещин и разработка энергосберегающего процесса высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, обеспечивающего повышение трещиностойкости деталей металлургического оборудования.

**Изложение основного материала.** Форма электрода является основным параметром технологического процесса наплавки, так как дуга, двигаясь по торцу электрода, концентрируется при наплавке проволокой и расконцентрируется при наплавке лентой, в зависимости от расположения которой она движется вдоль продольной оси или поперек сварочной ванны. Движение дуги определяет тепловложение в ванне и при постоянном режиме наплавки скорость нагрева и охлаждения жидкого металла и околошовной зоны. Это изменяет условия кристаллизации ванны, диффузионные процессы, структурные и фазовые превращения [1, 2] и качество наплавленного металла. Однако влияние формы электрода на качество наплавленного

металла досліджено недостатньо.

Крім того, общеизвестно, что при уменьшении погонной энергии, вследствие увеличения скорости охлаждения повышается вероятность образования холодных трещин [1].

Как установлено, форма электрода и погонная энергия значительно влияют на движение дуги, термические циклы и скорость кристаллизации (рис. 1). Наплавку производили под керамическим флюсом ЖСН-5 на характерных для каждого способа оптимальных режимах: проволочным электродом – при токе  $I = 650\text{--}750$  А, напряжении на дуге  $U = 31\text{--}33$  В и скорости наплавки  $V_H = (0,56, 0,83 \text{ и } 1,1) \cdot 10^{-2}$  м/с, продольной и перпендикулярной лентой –  $I = 450\text{--}550$  А,  $U = 29\text{--}31$  В,  $V_H = (0,33, 0,5 \text{ и } 0,67) \cdot 10^{-2}$  м/с, составным электродом –  $I = 1950\text{--}2050$  А,  $U = 29\text{--}31$  В,  $V_H = (1,4, 2,1, 2,8) \cdot 10^{-2}$  м/с. Погонная энергия для каждого способа наплавки изменялась в пределах  $q_H/V = 1,8, 2,7$  и  $3,6$  МДж/м.

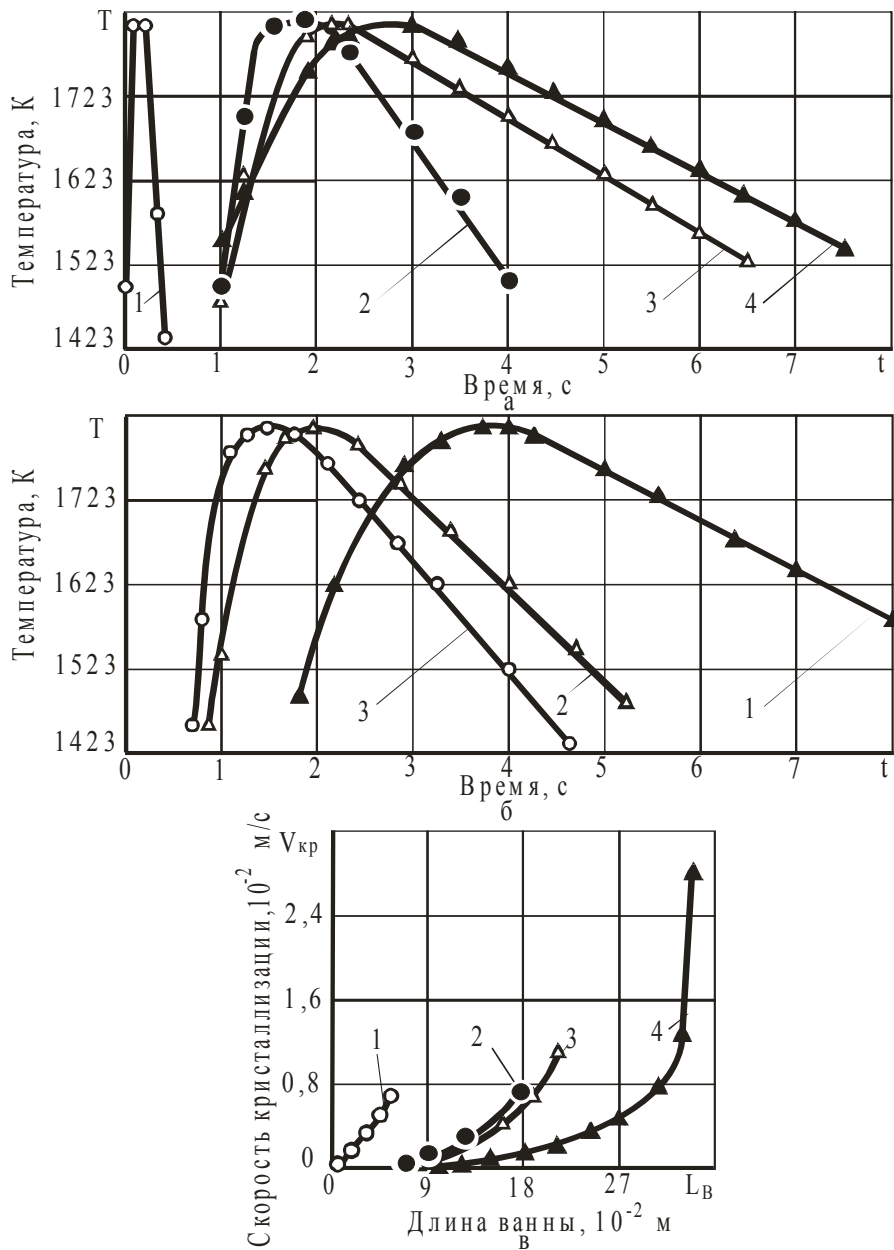


Рис. 1 – Закономерность действия формы электрода (а, в) на термический цикл (а) и скорость кристаллизации жидкого металла сварочной ванны (в): 1 – перпендикулярная лента; 2 – продольная лента; 3 – проволока; 4 – составной электрод, и погонной энергии (1 – 3,6; 2 – 2,7 и 3 – 1,8 МДж/м) на термический цикл (б), составной электрод

При наплавке с одинаковой погонной энергией перпендикулярной лентой скорость нагрева, охлаждения и кристаллизации максимальны. При наплавке продольной лентой в результате движения дуги вдоль сварочной ванны увеличивается тепловложение в боковые кромки ванны и снижается скорость нагрева, охлаждения и кристаллизации металла. При наплавке проволоочным электродом скорость нагрева, охлаждения и кристаллизации еще больше снижается вследствие концентрации и повышения эффективности тепловложения. Минимальная скорость нагрева, охлаждения и кристаллизации обеспечивается при наплавке составным электродом в результате движения дуги по прямолинейным участкам ленты в области боковых кромок ванны. При постоянной погонной энергии скорость охлаждения уменьшается от 300 °/с при наплавке перпендикулярной лентой до 60 °/с при наплавке составным электродом. С уменьшением погонной энергии скорость нагрева и охлаждения возрастают.

Как установлено, при повышении скорости нагрева и охлаждения возрастает дисперсность микроструктуры и трещиностойкость наплавленного металла. При наплавке продольной лентой микроструктура наплавленного металла крупнозернистая и неоднородная (рис. 2а). При наплавке перпендикулярной лентой микроструктура незначительно измельчается, оставаясь крупнозернистой (рис. 2б). Наплавка проволоочным и составным электродом приводит к измельчению микроструктуры (рис. 2в, 2г), которая представляет собой ферритоцементитную смесь и является мелкодисперсной и однородной.

Аналогично измельчается микроструктура наплавленного металла и околошовной зоны при высокоскоростной наплавке, что является следствием повышения скорости нагрева и охлаждения и увеличения количества центров кристаллизации, которые, располагаясь перед фронтом растущих столбчатых кристаллитов, подавляют их дальнейший рост. В результате увеличения скорости нагрева зерна аустенита не успевают вырасти и устойчивость аустенита снижается. При охлаждении распад неустойчивого мелкозернистого аустенита происходит в верхнем субкритическом интервале температур с образованием сорбита и перлита, что предотвращает образование трещин. В результате минимальных микроискажений кристаллической решетки, микронапряжений, плотности дислокаций и мелкодисперсной, однородной структуры повышается трещиностойкость и сваренные на низкой погонной энергии составным электродом соединения обеспечивают высокую ударную вязкость и прочностные характеристики (табл.).

При повышении скорости нагрева и охлаждения микроструктура измельчается (рис. 2), увеличивается площадь контакта и межатомные силы связи, трещиностойкость наплавленного металла возрастает. При наплавке перпендикулярной и продольной лентами микроструктура наплавленного металла крупнозернистая и неоднородная. Наплавка проволоочным и составным электродом приводит к измельчению микроструктуры, которая является мелкодисперсной и однородной.

Аналогично измельчается микроструктура наплавленного металла и околошовной зоны при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии, вследствие повышения скорости нагрева, охлаждения и кристаллизации, которая прямо пропорциональна скорости наплавки  $V_K = V_{CB} \cos \alpha$ .

Измерения ударной вязкости производили для сварных соединений из стали 09Г2С. Стали 90ХФ и 09Г2С различны по химическому составу и склонности к образованию закалочных структур. Однако, как при наплавке высокоуглеродистых сталей 90ХФ трудно обеспечить отсутствие трещин, так и при сварке стали 09Г2С трудно обеспечить ударную вязкость при низких температурах, качественно характеризующую трещиностойкость.

При увеличении скорости сварки до 0,021 м/с и снижении погонной энергии до 2,7 МДж/м ударная вязкость резко возрастает, а затем остается почти неизменной (рис. 3). Увеличение ударной вязкости при повышении скорости сварки является результатом измельчения микроструктуры и уменьшения микроискажений кристаллической решетки, микронапряжений и плотности дислокаций, с которыми связывают зарождение трещин [11].

Аналогично ударной вязкости изменяются при повышении скорости сварки предел прочности, относительное удлинение и сужение. При этом высокие значения ударной вязкости, относительного удлинения и сужения, свидетельствуют о повышенной трещиностойкости наплавленного металла.

Временное сопротивление разрыву при повышении скорости сварки и уменьшении погонной энергии возрастает. При этом высокие значения временного сопротивления разрыву,

ударной вязкости и относительного удлинения достигаются при погонной энергии 2,7 МДж/м и ниже, что подтверждает достоверность экспериментальных данных.

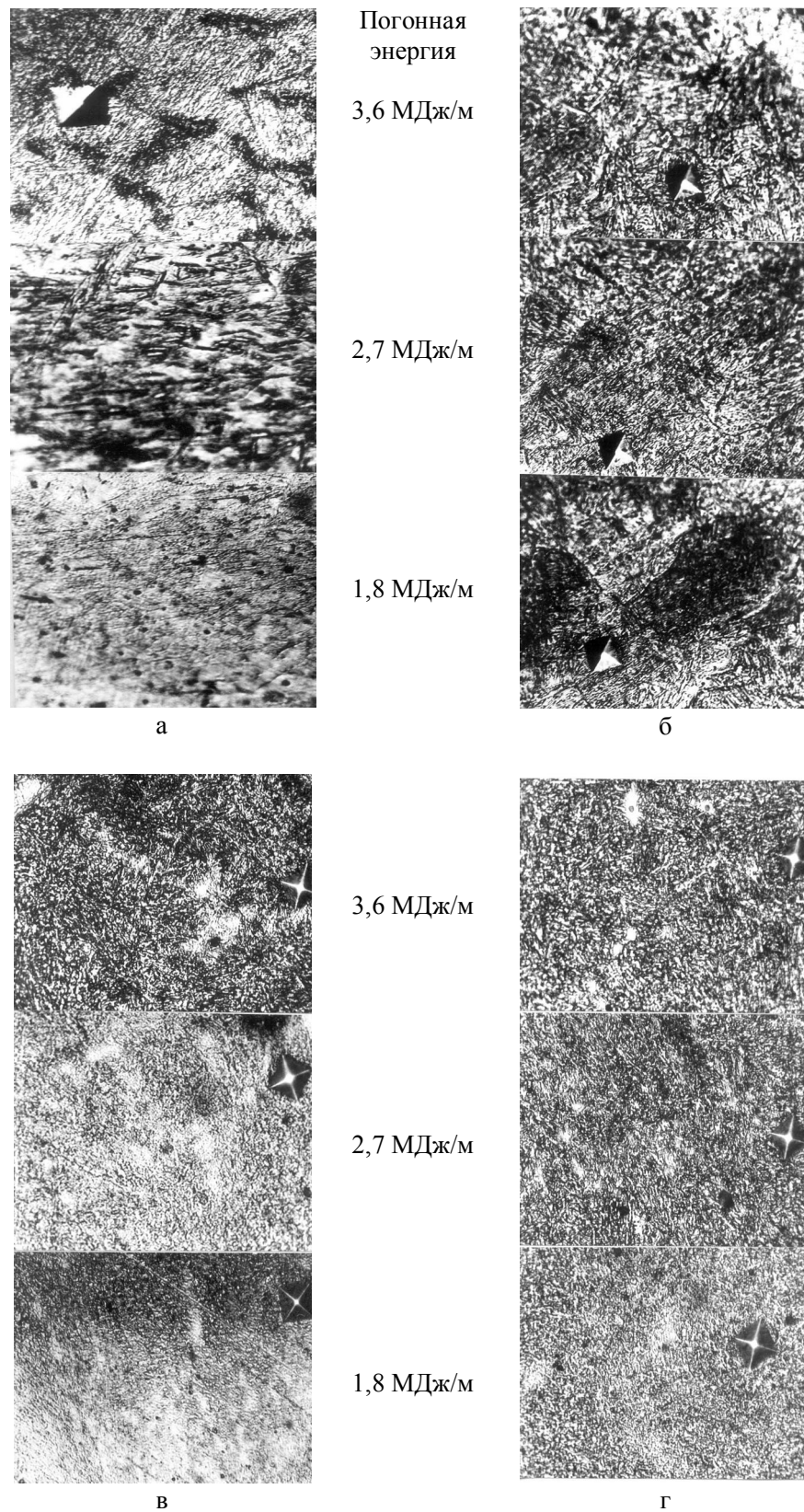


Рис. 2 – Микроструктура металла, наплавленного продольной (а), перпендикулярной (б) лентами, проволочным (в) и составным (г) электродами,  $\times 300$

Таблица

Механические свойства сварных соединений при сварке составным электродом

Марка стали	Временное сопротивление, 9,8 МПа	Предел текучести, 9,8 МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Изгиб в холодном состоянии, Рад	Ударная вязкость, 9,8 КДж/м <sup>2</sup>			
						Температура испытаний, К	KCU	KCU	KCU
10Г2С1	55	29	32	–	–	233	113	108	86
09Г2С	52	30	33	–	–	203	92	88	76
ВСт3сп	50	28	28	62	3,2	293	132	172	146

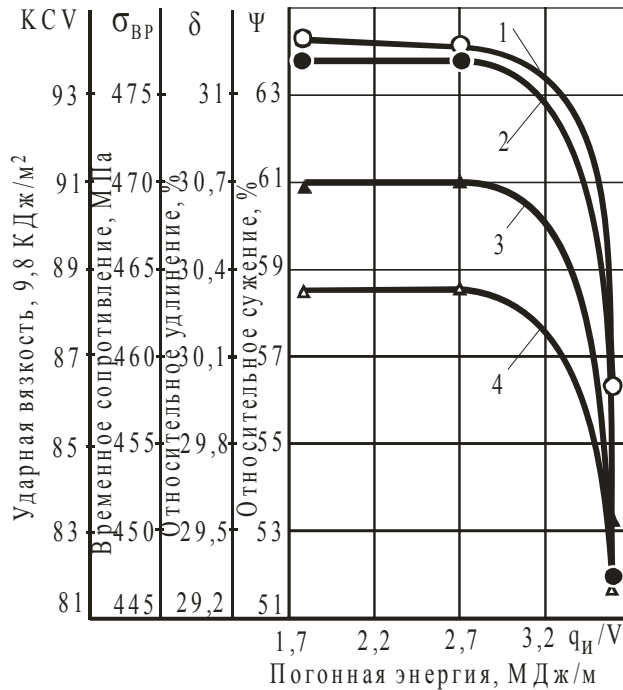


Рис. 3 – Механические свойства сварных соединений при односторонней высокоскоростной сварке составным электродом: 1 – временное сопротивление; 2 – ударная вязкость; 3 – относительное сужение; 4 – относительное удлинение

На основании установленных закономерностей разработан способ высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает снижение тепловложения, повышение скорости нагрева, охлаждения и кристаллизации, измельчение микроструктуры, снижение сварочных напряжений, повышение ударной вязкости сварных соединений и трещиностойкости наплавленного металла.

**Выводы**

1. Форма электрода и погонная энергия значительно влияют на движение дуги, термические циклы, скорость кристаллизации жидкого металла сварочной ванны и микроструктуру наплавленного металла. При наплавке перпендикулярной и продольной лентами микроструктура наплавленного металла крупнозернистая и неоднородная. Наплавка проволочным и составным электродом приводит к измельчению микроструктуры, которая является мелкодисперсной и однородной.

2. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии повышается скорость нагрева и охлаждения, увеличивается количество центров кристаллизации, которые, располагаясь перед растущими кристаллами, замедляют их дальнейший рост.

3. С повышением скорости наплавки пропорционально увеличивается скорость кристаллизации жидкого металла сварочной ванны, измельчается микроструктура и снижаются сварочные напряжения, что обеспечивает повышение ударной вязкости сварных соединений, которая характеризует трещиностойкость наплавленного металла.

4. Разработан энергосберегающий процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает увеличение скорости нагрева, охлаждения и кристаллизации, измельчение микроструктуры, снижение сварочных напряжений и повышение трещиностойкости деталей металлургического оборудования.

#### Список использованных источников:

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке / Н.Н. Прохоров. – Т. II. – М.: Металлургия, 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. Влияние погонной энергии на образование отколов при наплавке высокоуглеродистой стали аустенитными проволоками / В.К. Каленский, Я.П. Черняк, В.Г. Васильев, Т.Г. Соломийчук // Автоматическая сварка. – 2001. – № 11. – С. 11-14.
4. Волобуев Ю.В. Оценка влияния параметров термического цикла сварки на размер аустенитного зерна в зоне термического влияния сталей типа 12ХН4МА / Ю.В. Волобуев, В.Г. Федоров, Г.Б. Кулигин // Сварочное производство. – 1983. – №12. – С. 6-8.
5. Стеклов О.И. Использование плазменного способа наплавки для нанесения коррозионно-стойкого слоя газонефтехимической аппаратуры, работающей в водородсодержащих средах / О.И. Стеклов, А.В. Алексеев, О.А. Александров // Сварочное производство. – 1989. – № 5. – С. 1-3.
6. Сулова Е.А. Влияние технологических факторов на склонность к образованию трещин / Е.А. Сулова, В.А. Игнатов, А.С. Зубченко // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 35-36.
7. Влияние погонной энергии на коррозионную стойкость сварных соединений аустенитно-ферритной стали типа 10Х21Н5Т / Ю.Н. Савонов, А.Г. Александров, В.И. Рубан, В.П. Локтионов // Сварочное производство. – 1987. – № 7. – С. 9-11.
8. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства экономнолегированных хромомарганцевоникелевых сталей / М.А. Хубрих [и др.] // Сварочное производство. – 1988. – № 10. – С. 19-21.
9. Иванова Н.В. Хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений резервуарных конструкций / Н.В. Иванова, В.Н. Дикун, В.А. Винокуров // Сварочное производство. – 1985. – № 11. – С. 15-17.
10. Новая проволока для автоматической сварки под флюсом стали 09Г2С без скоса кромок / А.Ф. Батакшев [и др.] // Сварочное производство. – 1988. – № 1. – С. 23-24.
11. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

#### Bibliography:

1. Prokhorov N.N. Physical processes in the metal during welding / N.N. Prokhorov. – Vol. II. – M.: Metallurgy, 1976. – 600 p. (Rus.)
2. Shorshorov M.H. Phase transformations and changes in properties of the steel during welding / M.H. Shorshorov, V.V. Belov. – M.: Nauka, 1972 – 228 p. (Rus.)
3. Effect of heat input on the formation of splits in high steel deposition austenitic wires / V.K. Kalensky, J.P. Chernyak, V.G. Vasilyev, T.G. Solomiychuk // Automatic welding. – 2001. – № 11. – P. 11-14. (Rus.)
4. Volobuev Yu.V. Assessing the impact of the thermal cycle parameters of welding on the size of the austenitic grains in the HAZ steels 12HN4MA / Yu.V. Volobuev, V.G. Fedorov, G.B. Kuligin // Welding production. – 1983. – № 12. – P. 6-8. (Rus.)
5. Steklov O.I. Using a plasma deposition method for applying corrosion-resistant layer Gas and

- petrochemical equipment operating in hydrogen environments / O.I. Steklov, A.V. Alekseev, O.A. Alexandrov // Welding production. – 1989. – № 5. – P. 1-3. (Rus.)
6. Suslova E.A. Influence of technological factors on the crack susceptibility / E.A. Suslova, V.A. Ignatov, A.S. Zubchenko // Welding production. – 1990. – № 5. – P. 35-36. (Rus.)
  7. Effect of heat input on the corrosion resistance of welded joints of austenitic-ferritic steel type 10H21N5T / Yu.N. Savonov, A.G. Alexandrov, V.I. Ruban, V.P. Loktionov // Welding production. – 1987. – № 7. – P. 9-11. (Rus.)
  8. Welding thermal cycle effect on the structure and properties of economically alloyed steels chromomargantsevonikelevykh / M.A. Khubrikh [et al.] // Welding production. – 1988. – № 10. – P. 19-21. (Rus.)
  9. Ivanova N.V. Cold resistance of HAZ metal of tank constructions welded joints / N.V. Ivanova, V.N. Dykun, V.A. Vinokourov // Welding production. – 1985. – № 11. – P. 15-17. (Rus.)
  10. The new wire for automatic submerged arc welding steel 09G2S without bevel / A.F. Batakshev [et al.] // Welding production. – 1988. – № 1. – P. 23-24. (Rus.)
  11. Finkel V.M. Destruction Physics / V.M. Finkel. – M.: Metallurgy, 1970. – 376 p. (Rus.)

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

Статья поступила 17.11.2015

УДК 621.791.92:669.018.25

© Патюпкін А.В.\*

#### ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ІТРИЄМ НА ФОРМУ І КІЛЬКІСТЬ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКРАПЛЕНЬ В АУСТЕНІТНІЙ ВИСОКОЛЕГОВАНІЙ СТАЛІ

*Вивчено вплив ітрію на форму і кількість неметалевих вкраплень в сталі 06Х23Н18М5. Встановлено, що ітрій зв'язує кисень та інші елементи в гетерогенні з'єднання, що призводить до переходу домішок в пасивний стан. Переважно в структурі мають місце оксидні включення, глобули і сульфідні включення, які утворюються в результаті реакцій компонентів сталі з розчиненими в металі киснем, сіркою і азотом. Встановлено, що рафінуючи і модифікуючи аустенітну сталь домішками ітрію, можна корегувати службові властивості наплавленого шару.*

**Ключові слова:** шкідливі домішки, аустенітна високолегована сталь, службові властивості, неметалеві вкраплення, форма і розміри вкраплень, ітрій, рафінування, модифікування, форма і розміри неметалевих вкраплень.

**Патюпкін А.В. Влияние модифицирования иттрием на форму и количество неметаллических включений в аустенитной высоколегированной стали.** Изучено влияние иттрия на форму и количество неметаллических включений в стали 06Х23Н18М5. Установлено, что итрий связывает кислород и другие элементы в гетерогенные соединения, а также приводит к переходу примесей в пассивное состояние. Преимущественно в структуре обнаружены оксидные включения, глобулы и сульфидные включения, образующиеся в результате реакций компонентов стали с растворенными в металле кислородом, серой и азотом. Установлено, что рафинирование и модифицирование аустенитной стали примесями иттрия способствует корректировке служебных свойств наплавленного слоя.

\* канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, [apatupkin@gmail.com](mailto:apatupkin@gmail.com)