

УДК 621.791.92

© Лебедев В.А.<sup>1</sup>, Яровицын А.В.<sup>2</sup>, Новиков С.В.<sup>3</sup>**СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИГОЛЬЧАТОГО ФЕРРИТА В МЕТАЛЛЕ  
НАПЛАВЛЕННОГО ВАЛИКА (КРАТКИЙ АНАЛИЗ)**

Приведен краткий анализ способов формирования игольчатого феррита, как наиболее предпочтительной структурной составляющей в металле сварного шва. Рассмотрены химические элементы, которые эффективней всего влияют на формирование игольчатого феррита, а также их комбинированное воздействие. Представлены современные технологические методы формирования игольчатого феррита в металле наплавленного валика с применением проволок из низколегированных сталей. Выдвинута гипотеза возможности получения данной структуры в металле шва, формируемого под механическим периодическим воздействием.

**Ключевые слова:** игольчатый феррит, сварной шов, периодическое воздействие, механические колебания.

*Лебедев В.А., Яровицын О.В., Новиков С.В. Способи формування голчастого фериту у металі наплавленого валика (короткий аналіз). Наведено короткий аналіз способів формування голчастого фериту, як найкращої структурної складової в металі зварного шва. Розглянуто вплив тих хімічних елементів, які найефективніше впливають на формування голчастого фериту, а також їх комбінований вплив. Представлені сучасні технологічні методи формування голчастого фериту в металі наплавленого валика із застосуванням дротів з низьколегованих сталей. Висунуто гіпотезу можливості отримання даної структури в металі шва, який формується під механічним періодичним впливом.*

**Ключові слова:** голчастий ферит, зварний шов, періодичний вплив, механічні коливання.

*V.A. Lebedev, O.V. Yarovitsyn, S.V. Novykov. Methods of acicular ferrite forming in the weld bead metal (Brief analysis). A brief analysis of the methods of acicular ferrite formation as the most preferable structural component in the weld metal has been presented. The term «acicular ferrite» is meant as a structure that forms during pearlite and martensite transformation and austenite decomposition. Acicular ferrite is a packet structure consisting of battens of bainitic ferrite, there being no cementite particles inside these battens at all. The chemical elements most effectively influencing on the formation of acicular ferrite have been considered and their combined effect as well. It has been shown in particular, that the most effective chemical element in terms of impact toughness and cost relation is manganese. Besides, the results of multipass surfacing with impulse and constant feed of low-alloy steel wire electrode have been considered. According to these results acicular ferrite forms in both cases. However, at impulse feed of the electrode wire high mechanical properties of surfacing layer were got in the first passes, the form of the acicular ferrite crystallite has been improved and volume shares of polygonal and lamellar ferrite have been reduced. An assumption has been made, according to which acicular ferrite in the surfacing layer may be obtained through superposition of mechanical low-frequency oscillation on the welding torch or on the welding pool instead of periodic thermal effect due to electrode wire periodic feed.*

**Keywords:** acicular ferrite, welding seam, periodic action, mechanical oscillation.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ, [lebedevvladimir@ukr.net](mailto:lebedevvladimir@ukr.net)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ, [yarovitsyn@ukr.net](mailto:yarovitsyn@ukr.net)

<sup>3</sup> вед. інженер, Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ, [novykov76@ukr.net](mailto:novykov76@ukr.net)

**Постановка проблемы.** Формирование структуры, обеспечивающей высокие показатели механических свойств сварных конструкций из низколегированной и особенно из низкоуглеродистой стали, является современной актуальной технической задачей. Как показали последние исследования, оптимальное соотношение ударной вязкости и остального комплекса механических свойств сварных швов достигается при формировании такой структурной составляющей, как игольчатый феррит в металле шва.

**Целью данной работы** является выяснение особенностей формирования и способов получения игольчатого феррита, как наиболее предпочтительной структурной составляющей, обеспечивающей высокие механические качества наплавленного металла.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как отмечено в работе [1], игольчатый феррит является продуктом распада аустенита, формирующимся в температурном интервале перлитного и мартенситного превращений и скоростном диапазоне, лежащим не выше критической и не ниже скорости распада аустенита по диффузионному механизму. Однако в заданных условиях формируются и другие типы структурных составляющих в шве (рис. 1), что обусловило необходимость в формировании системы классификаций продуктов промежуточного превращения по таким признакам, как морфология ферритной составляющей бейнита, присутствие выделений карбида железа, их распределение и морфология, наличие остаточного аустенита или мартенситно-аустенитной смеси. Как показали электронномикроскопические исследования, пластинчатая морфология промежуточных продуктов распада аустенита в низкоуглеродистых сталях встречается редко, а её наличие объясняется смещением критических точек фазовых превращений, обусловленным локальными сегрегациями легирующих элементов, в том числе и углерода.

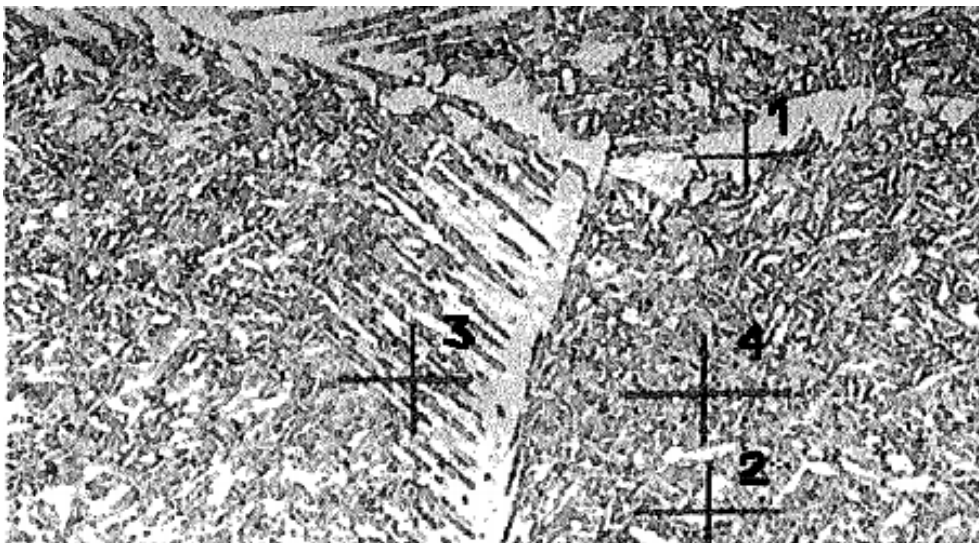


Рис. 1 – Структуры, формирующиеся вместе с игольчатым ферритом [2]: 1 – полигональный феррит на границе зерна; 2 – островки полигонального феррита; 3 – видманштеттов феррит, примыкающий к полигональному; 4 – игольчатый феррит

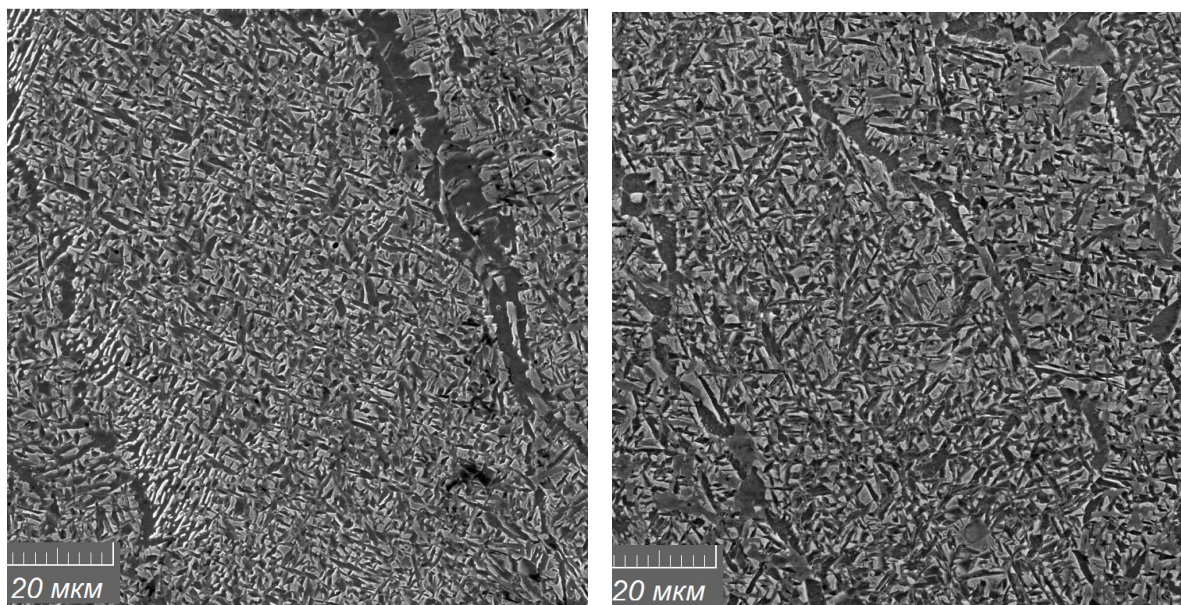
В соответствии с указанной системой классификации принято считать под термином «игольчатый феррит» пакетную структуру, состоящую из рек бейнитного феррита при полном отсутствии цементитных частиц внутри этих рек и по их границам [1, 2].

В настоящее время получение игольчатого феррита в металле сварного шва осуществляется преимущественно металлургическими методами. Для этих целей широко применяется марганец, содержание которого в шве в пределах 1,0÷1,2% обеспечивает формирование 60% игольчатого феррита, при этом ударная вязкость возрастает до 70 Дж/см<sup>2</sup> [3]. Применение титана в количестве 0,02% в сочетании с марганцем обуславливает формирование неметаллических включений, содержащих в своей структуре игольчатый феррит, что в итоге увеличивает его общее содержание в металле шва, при этом снижая количество полигонального феррита [4]. При увеличении содержания марганца свыше 1,2% происходит существенное снижение удар-

ной вязкости, обусловленное формированием двойниковых границ, но содержание игольчатого феррита в металле шва при этом достигает 80%. Избежать подобного недостатка можно применяя сварку низколегированных сталей, содержащих ниобий и ванадий. При доле игольчатого феррита в пределах 70-80% обеспечивается значение ударной вязкости выше 47 Дж/см<sup>2</sup>. Данный результат достигается, если сварка осуществляется порошковой проволокой с системой легирования Mn-Mo-Ti-B в присутствии агломерированного флюса небольшой основности. Однако необходимо, чтобы содержание ниобия не превышало 0,04%, молибдена – 0,42%, титана – 0,02%, бора – 0,003%, т.к. в противном случае формируются полигонизационные границы и МАК- фазы, обуславливающие образование трещин [5].

Среди эффективных технологических методов воздействия на структуру металла шва, позволяющий не только контролировать дисперсность, но и формировать полезные структурные составляющие, является периодическое тепловое или механическое воздействие на расплав ванны.

Так, в работе [6] осуществлялась многослойная наплавка проволокой марки Нп30ХГСА Ø1,2 мм в среде СО<sub>2</sub> на пластины из стали марки 09Г2С. Режим наплавки был как с импульсной подачей проволоки, так и с постоянной. Металлографические исследования показали, что структура наплавленного металла как с постоянной, так и с импульсной подачей электродной проволоки состоит из кристаллитов игольчатого феррита ( $HV_{0,1} = 2360-2540$  МПа), разделенных между собой ферритными прослойками толщиной до 2,5 мкм. При этом служебные характеристики наплавленного слоя с импульсной подачей проволоки (при частоте импульсов 15-20 Гц и скважности 3-5 ед.) уже в первом слое наплавленного металла по показателям износостойкости аналогичны пятислойной наплавке с постоянной подачей электродной проволоки. Кроме того, при импульсной подаче наблюдается улучшение структуры игольчатого феррита, а именно, формирование более благоприятной формы кристаллитов, снижения объемной доли полигонального и пластинчатого феррита на их периферии и, предположительно, оптимизация морфологии и распределения МАК-фазы в составе игольчатого феррита (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2 – Микроструктура наплавленного металла 30ХГСА, данные электронной микроскопии ( $\times 2000$ ) [6]: а – при постоянной подаче электродной проволоки; б – при импульсной подаче электродной проволоки

Ближкие результаты были получены в работе [7] при многопроходной TIG-сварке неповоротных стыков труб из низколегированной стали 09Г2С с применением проволоки марки Св – 08Г2С. Применение шаго-импульсного сварочного режима корня шва и импульсный режим

облицовочного слоя обеспечили скорость охлаждения на уровне  $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$  на всех проходах, что благоприятно сказалось на структуре.

**Изложение основного материала.** Механические колебания, накладываемые на расплав сварочной ванны, оказывают благоприятное воздействие на формирование мелкодисперсности структуры [8-12]. Однако исследованию структурных составляющих практически не уделяется внимания.

Физическая природа процесса формирования структуры в условиях периодического воздействия на расплав вообще и в случае механического воздействия в частности носит гипотетический характер [9-12]. Однако большинство авторов сходятся во мнении, что сочетание частотно-скоростных и энергетических параметров определяют характер кристаллизации, а именно, её мгновенную скорость охлаждения и степень переохлаждения. Так в работе [13] показано, что в случае применения вибрации время кристаллизационных процессов в среднем сокращается на 25-30%. Значит можно предположить, что, изменяя мгновенную скорость охлаждения в интервале мартенситно-перлитного превращения, можно управлять не только степенью дисперсности металла шва, но и формированием составляющих его структуры.

### Выводы

1. Проведен краткий анализ способов получения в металле сварного шва игольчатого феррита, как наиболее предпочтительной структуры, следуя из которого следует, что самый распространённый способ получения такой структуры - металлургический.
2. Применение периодического воздействия на расплав сварочной ванны, как технологического приёма, на сегодняшний день ограничен только импульсным тепловым воздействием на свариваемый (наплавляемый) металл.
3. Выдвинуто предположение о возможности контроля формирования структурных составляющих металла шва и их дисперсности за счёт применения механического периодического или импульсного воздействия на расплав сварочной ванны.

### Список использованных источников:

1. Большаков В.И. Игольчатый феррит / В.И. Большаков // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 9. – С. 10-15.
2. Hee J.K. Microstructural Characteristics of Steel Weld Metal / J.K. Hee, Y.K. Bong // Journal of KWS. – 2000. – 18, № 5. – P. 565-572.
3. Влияние формирования низкотемпературных морфологических форм феррита в микроструктуре сварных швов на их механические свойства / В.В. Головкин, Г.М. Григоренко, В.А. Костин, В.Г. Васильев, В.В. Жуков // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 49-57.
4. Костин В.А. Комплексная оценка влияния содержания марганца и титана на структуру и свойства сварных швов низколегированных сталей / В.А. Костин // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПГТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – С. 198-202.
5. Особенности формирования микроструктуры металла швов газонефтепроводных труб при дуговой сварке микролегированных сталей / А.А. Рыбаков., В.А. Костин, Т.Н. Филиппук, И.А. Прибытько // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – № 1. – С. 125-131.
6. Особенности формирования структуры сварных соединений при дуговой наплавке с импульсной подачей электродной проволоки / В.А. Лебедев, И.В. Лендел, А.В. Яровицын, Е.И. Лось, С.В. Драган // Автоматическая сварка. – 2016. – № 3. – С. 25-30.
7. Управление структурой сварных соединений при орбитальной TIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций / А.В. Шипилов, А.В. Коновалов, В.В. Бровко, С.И. Полосков // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2011. – № 6. – С. 44-52.
8. Макара А.М. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений / А.М. Макара, Б.Н. Кушниренко // Автоматическая сварка. – 1967. – № 1. – С. 31-35.
9. Болдырев А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну / А.М. Болдырев // Сварочное производство. –

1976. – № 2. – С. 52-55.

10. Славин Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну / Г.А. Славин // Сварочное производство. – 1980. – № 6. – С. 3-5.
11. Аристов С.В. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава / С.В. Аристов, В.Л. Руссо // Сварочное производство. – 1982. – № 11. – С. 42-44.
12. Морозов В.П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений / В.П. Морозов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2006. – № 8. – С. 41-54.
13. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны / Г.В. Сутырин // Автоматическая сварка. – 1975. – № 5. – С. 7-10.

#### Bibliography:

1. Bolshakov V.I. Acicular ferrite / V.I. Bolshakov // Bulletin of Prydneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2010. – № 4. – P. 49-57. (Rus.)
2. Hee J.K. Microstructural Characteristics of Steel Weld Metal / J.K. Hee, Y.K. Bong // Journal of KWS. – 2000. – 18, № 5. – P. 565-572.
3. Influence of formation of low-temperature morphological forms of ferrite in the microstructure of welded joints on their mechanical characteristics / V.V. Holovko, H.M. Hryhorenko, V.A. Kostin, V.V. Zhukov // Collection of scientific publications NUS. – 2010. – № 4. – P. 49-57. (Rus.)
4. Kostin V.A. Comprehensive assessment of the effect of contents manganese and titanium on the structure and properties of welded seams of low-alloy steels / V.A. Kostin // Reporter of the Priazovskyi state technical university : collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2008. – Issue 18. – P. 198-202. (Rus.)
5. Features of formation of metal microstructures seams of gas and oil pipelines from microalloyed steels that are obtained by arc welding / A.A. Rybakov, V.A. Kostin, T.N. Filipchuk, I.A. Pribytko // Visnyk of Chernihiv State Technological University. – 2013. – № 1. – P. 125-131. (Rus.)
6. Peculiarities of formation of structure of welded joints in arc surfacing with pulse feed of electrode wire / V.A. Lebedev, I.V. Lendel, A.V. Yarovitsyn, E.I. Los, S.V. Dragan // The Paton Welding Journal. – 2016. – № 3. – P. 25-30. (Rus.)
7. Joint weld structure control during orbital TIG-welding of compressor plant industrial pipelines / A.V. Shipilov, A.V. Konovalov, V.V. Brovko, S.I. Poloskov // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. – 2011. – № 6. – P. 44-52. (Rus.)
8. Makara A.M. The transverse motion of the arc as a factor in improving the structure and properties of welded joints / A.M. Makara, B.N. Kouchnirenko // The Paton Welding Journal. – 1967. – № 1. – P. 31-35. (Rus.)
9. Boldyrev A.M. On the mechanism of formation of the structure of the weld metal with the introduction of low frequency vibrations into the weld pool / A.M. Boldyrev // Svarochnoe Proizvodstvo. – 1976. – № 2. – P. 52-55. (Rus.)
10. Slavin G.A. Formation of the weld metal structure that is disoriented due to applying low-frequency disturbances on the weld pool / G.A. Slavin // Svarochnoe Proizvodstvo. – 1980. – № 6. – P. 3-5. (Rus.)
11. Aristov S.V., Rousseau V.L. Crystallization of the weld metal at the low-frequency oscillations of the melt / S.V. Aristov, V.L. Rousseau // Svarochnoe Proizvodstvo. – 1982. – № 11. – P. 42-44. (Rus.)
12. Morozov V.P. Analysis of the conditions for the formation of structure in the crystallization of the crushed metal weld pool to an external periodic perturbation / V.P. Morozov // Proceedings of the universities. Mechanical Engineering. – 2006. – № 8. – P. 41-54. (Rus.)
13. Cutyryn G.V. Investigation of the mechanism of low-frequency vibration in the crystallization of the weld pool / G.V. Cutyryn // The Paton Welding Journal. – 1975. – № 5. – P. 7-10. (Rus.)

Рецензент: А.Д. Размышляев  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.06.2016