

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МОНОКАРБИДА ВОЛЬФРАМА НА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

*М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков,
А.Н. Емелюшин, Е.Н. Ширяева*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Постановка задачи (актуальность работы): статья посвящена проблемам структурообразования при сварке низкоуглеродистых, низколегированных сталей. Формирование структуры металла сварных соединений происходит в сложных термических условиях, которые определяют комплекс эксплуатационных свойств. Наличие в металле сварного шва крупных столбчатых кристаллов является потенциально опасным фактором, так как при определенных условиях подобные структуры могут выступать концентраторами напряжений и служить источником разрушения. В работе рассматривается возможность управления первичной структурой наплавленного металла путем введения в расплав сварочной ванны нано- и ультрадисперсных частиц тугоплавкого материала. **Цель работы:** исследование влияния нано- и ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама WC на структуру наплавленного металла. **Используемые методы:** был проведен лабораторный эксперимент, который заключался в изготовлении электродов, содержащих в своем покрытии различное количество ультрадисперсного порошка WC; наплавке и изготовлении образцов; исследовании полученных образцов методом световой микроскопии (микроскоп Микромед-Мет) и измерении твердости по Виккерсу (прибор HV-1000). **Новизна:** получены новые данные о влиянии концентрации ультрадисперсного порошка WC в покрытии электрода на структуру наплавленного металла. **Результат:** структура металла, наплавленного электродами, содержащими в обзаке 0; 0,02 и 0,2 % (от массы сухой смеси) порошка WC, характеризуется наличием столбчатых кристаллов, окруженных сеткой периферийного феррита, образовавшегося вдоль границ первичных зерен. Наблюдаются игольчатые включения видманштеттового феррита, прорастающие от края кристаллов к их центру, а также структуры бейнитного типа. Структура металла, наплавленного электродами, содержащими в обзаке 0,4 % (от массы сухой смеси) порошка WC, характеризуется наличием измельченной ячеистой структуры, представленной равноосными кристаллами. Твердость наплавленного металла в образцах находится в диапазоне 184–189 HV. **Практическая значимость:** получены данные, необходимые для создания новых марок покрытых электродов для сварки-наплавки низкоуглеродистых, низколегированных сталей.

Ключевые слова: покрытый электрод, сварка, наплавка, нанопорошок, карбид вольфрама, тугоплавкие соединения, модифицирование, микроструктура, механические свойства.

Введение

Начало XXI века обусловилось переходом ведущих мировых экономик к шестому технологическому укладу. Его реализация заключается в развитии машиностроения, металлургии, строительства, медицины и других отраслей промышленности путем разработки и внедрения в производство нанотехнологий, биотехнологий, информационных технологий. Это позволит повысить эффективность производства за счет снижения энергоемкости и

материалоемкости, а также получения материалов с заданными свойствами [1, 2].

Важным направлением развития нанотехнологий является получение наночастиц (нанопорошков) и их применение. Применение нанопорошков позволяет усовершенствовать существующие технологические процессы и получить новую промышленную продукцию.

В строительстве и машиностроении все большее распространение получают высокопрочные, в том числе наноструктурированные

стали [3]. Предъявляются высокие требования к структуре и механическим свойствам как основного металла, так и наплавленного металла сварных соединений.

Процесс кристаллизации и структурообразования металла сварного шва связан с рядом особенностей. Согласно общепринятому мнению, процесс кристаллизации происходит в две стадии [4]. На первой стадии происходит зарождение мельчайших частиц кристаллов – центров кристаллизации (зародышей). На второй стадии происходит рост кристаллов из этих центров.

При сварке преобладает гетерогенный характер кристаллизации, когда центрами кристаллизации выступают зерна основного металла на границе сплавления. Рост кристаллов происходит от края сварочной ванны к ее центру [5]. Вследствие чего кристаллы имеют столбчатое строение и при определенных условиях могут выступать концентраторами напряжений.

Добиться изменения первичной структуры металла шва можно путем модифицирования сварочной ванны нано- и ультрадисперсными частицами. Частицы порошка выполняют роль центров кристаллизации и изменяют строение и размер первичной структуры металла. Формируется равноосная, мелкодисперсная структура, за счет чего повышается уровень механических свойств металла [6].

Учитывая вышеизложенное, целью данной работы является исследование влияния нано- и ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама WC на структуру наплавленного металла.

Материалы и методы исследования

Модифицирование сталей при дуговой сварке затруднено, так как перегрев переплавляемого электрода дезактивирует модификаторы [7]. Температура в атмосфере стол-

ба дуги, через которую проходит расплавленная капля металла, может достигать 5000–6000 °С, при этом температура самой капли достигает 2300–2500 °С, температура сварочной ванны составляет 1700–1800 °С. Поэтому в качестве модификаторов при сварке могут выступать элементы и соединения, обладающие высокой термической стабильностью, с температурой плавления выше 2500 °С.

Чтобы способствовать процессу кристаллизации, материал модификатора должен обладать кристаллической решеткой, изоморфной кристаллизующему металлу. Если говорить о сталях, то высокотемпературная фаза, в которую переходит жидкий металл, это δ-железо, имеющее кубическую объемно-центрированную решетку (ОЦК решетку), или γ-железо с гранцентрированной (ГЦК) кубической решеткой. Поэтому желательно, чтобы материал модификатора также имел кубическую кристаллическую решетку.

Обзор литературы [8, 9] показал, что в качестве материала для модификатора хорошо подходят соединения тугоплавких металлов с углеродом и азотом (табл. 1).

Представленные в табл. 1 фазы отвечают предъявляемым физическим требованиям. Температура плавления соединений колеблется в интервале 2648–3613 °С, при этом все они обладают кубическим типом ионной кристаллической решетки со структурным типом NaCl [8].

В качестве экспериментального материала был выбран монокарбид вольфрама WC за его относительную дешевизну и возможность провести сравнительный анализ с уже имеющимися экспериментальными данными [7, 10]. Следует отметить, что соединение WC может существовать в двух кристаллографических модификациях: α-WC – с гексагональной решеткой; β-WC – с кубической гранцентрированной решеткой. При нагреве выше 2755 °С

Таблица 1

Физические свойства тугоплавких соединений [8]

Фаза	Температура плавления, °С	Элементарная ячейка
TiC	3257	Кубическая
ZrC	3530	
VC	2648	
WC (β-WC)	2785	
NbC	3613	
TiN	2950	
ZrN	2980	

Сварка, родственные процессы и технологии

α -WC образует фазу β -WC [11], что способствует лучшему эффекту модифицирования в условиях зоны сварки.

Подготовку модификатора осуществляли в две стадии:

- 1) механическое измельчение кускового материала в ступе до размера частиц 10–15 мкм;
- 2) тонкое измельчение порошка, полученного на первой стадии, в жидкой среде с помощью коллоидной мельницы, в течение 120 мин. Таким способом удалось получить порошок с размером частиц 50–1000 нм (рис. 1).

Введение модификатора в сварочную ванну осуществляли через электродное покрытие. На сегодняшний день ручная дуговая сварка покрытыми электродами остается доминирующим способом сварки в промышленности и народном хозяйстве [12].

Электроды с экспериментальными составами покрытий (табл. 2) изготавливали методом окунания в условиях лаборатории «Резание и сварка» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Была выбрана шлаковая система основного типа, так как именно электроды с основным покрытием нашли широкое применение при сварке высокопрочных низкоуглеродистых, низколегированных сталей [13–15]. Экспериментальное покрытие во многом повторяет состав покрытия электродов марки УОНИ-13/55, в который входят: мрамор (CaCO_3), плавиковый шпат (CaF_2), кварц (SiO_2), ферромарганец (FeMn), ферросилиций (FeSi), ферротитан (FeTi) и жидкое стекло (Na_2O). Главное отличие экспериментального покрытия в том, что в нем отсутствует ферротитан. В покрытии УОНИ-13/55 FeTi выполняет функцию раскислителя, однако, переходя в металл сварочной ванны, Ti является еще и модификатором, образуя тугоплавкие соединения. Чтобы исключить побочный модифицирующий эффект со стороны FeTi , этот компонент был исключен из состава, при этом несколько увеличено содержание FeMn и FeSi . Все компоненты покрытия отвечали требованиям соответствующей нормативной

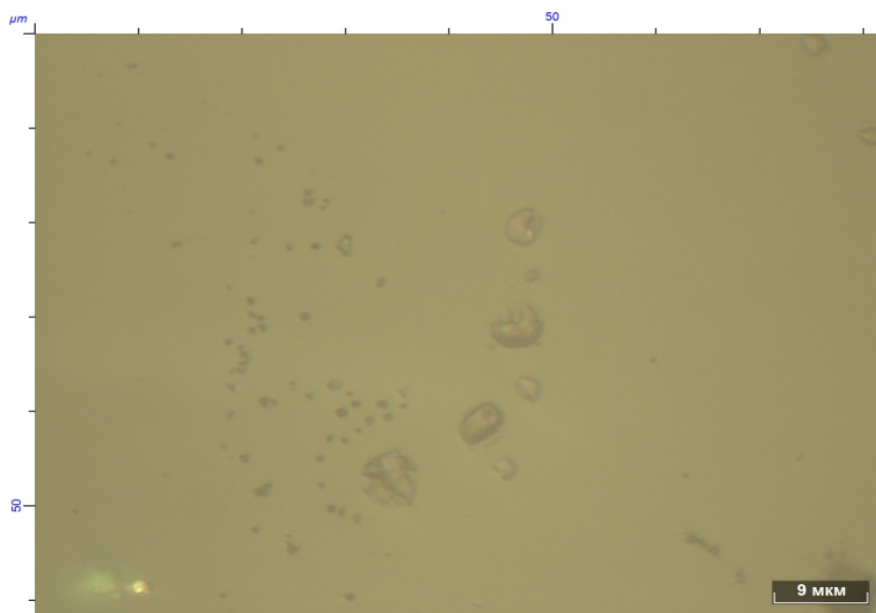


Рис. 1. Частицы порошка WC, $\times 1000$

Таблица 2

Составы покрытий экспериментальных электродов

№ состава	WC _n	CaCO ₃	CaF ₂	SiO ₂	FeMn	FeSi	Na ₂ O
	% от массы сухой смеси	% в сухой смеси					% от массы сухой смеси
1	–	54	15	9	13	9	30–35
11	0,02						
12	0,2						
13	0,4						

документации (НД) – ГОСТов на изготовление электродов.

В качестве электродных стержней применяли проволоку диаметром 3,0 мм из стали марки Св-08А. Было изготовлено четыре состава электродных покрытий с различным содержанием модификатора WC (см. табл. 2), при этом один из составов модификатора не содержал. Все электроды после нанесения обмазки в течение 12 ч просушивали на воздухе при температуре 20 °С, а затем прокаливали в электропечи в течение 1,5 ч при температуре 400 °С.

На подложку из Ст3 размерами 250×150×8 мм экспериментальными электродами производили наплавку валиков на токе 130 А обратной полярности с небольшими колебательными движениями электрода. Затем из пластин вырезали поперечные образцы для металлографических исследований, количественного анализа и измерения твердости. Образцам была присвоена нумерация, соответствующая нумерации экспериментальных электродов.

Металлографические исследования выполняли на травленых и нетравленых образцах с помощью светового микроскопа Микромед-Мет с применением системы компьютерного анализа изображений ScorePhoto.

Твердость металла измеряли по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999–75 на твердомере HV-1000. Производили три измерения при нагрузке на индентор 0,3 кгс.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Металлографические исследования нетравленых образцов показали (рис. 2), что в наплавленном металле отсутствуют микропо-

ры и неметаллические включения. При этом наблюдаются характерные следы от полирования – риски. Темные точки на светлом поле, наблюдаемые во всех образцах, являются остаточными загрязнениями после полирования (остатки полировальной пасты) и к дефектам металла не относятся.

Исследования травленых образцов показали, что структура наплавленного металла образца № 1 (рис. 3) характеризуется наличием столбчатых кристаллов, окруженных сеткой периферийного феррита, образовавшегося вдоль границ первичных зерен. Также наблюдаются игольчатые включения видманштеттового феррита, прорастающие от края кристаллов к их центру. В некоторых участках видно наличие бейнитной структуры в виде характерных пакетов.

В образцах № 11 и 12 (рис. 4, 5) наблюдаются аналогичные типы и морфология структур, что и в образце № 1.

В образце № 13 (рис. 6), в сравнении с другими образцами, заметны некоторые отличия. Наплавленный металл характеризуется наличием ячеистой структуры, представленной равноосными кристаллами, окруженными ферритом, который представляет собой непрерывную сетку вдоль границ первичных зерен. При этом в металле также наблюдаются структуры бейнитного типа.

Результаты измерения твердости наплавленного металла сведены в табл. 3.

Из анализа результатов исследований следует, что эффект модифицирования наплавленного металла лучше всего реализуется в случае образца № 13. В этом образце наблюдается заметное измельчение структуры

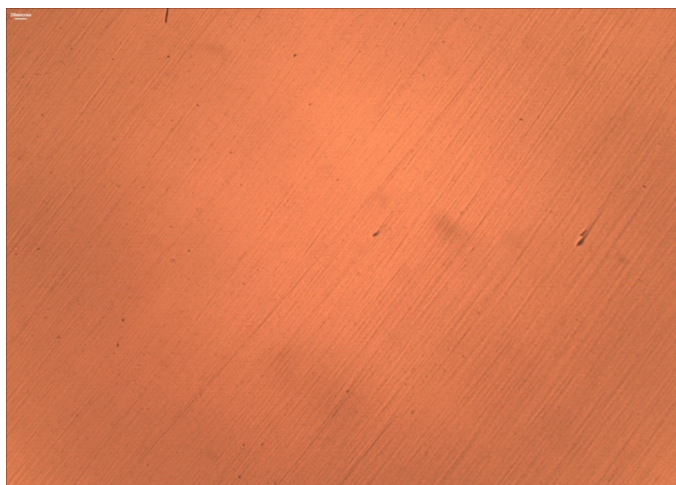


Рис. 2. Образец не травленный № 13, ×100

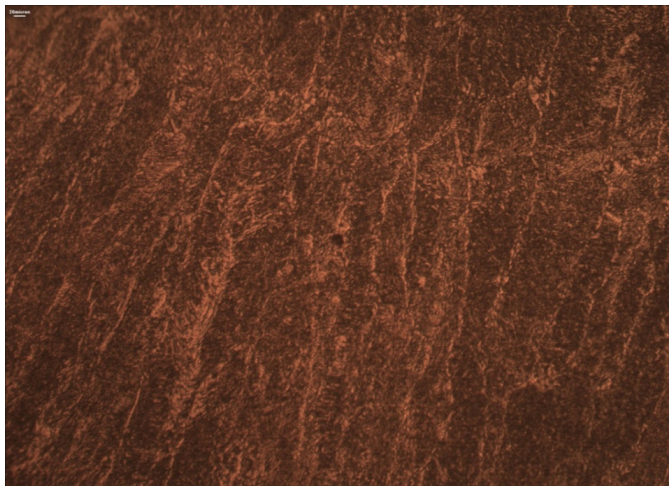


Рис. 3. Образец травленный № 1 (столбчатые кристаллиты, окруженные периферийным ферритом), $\times 100$

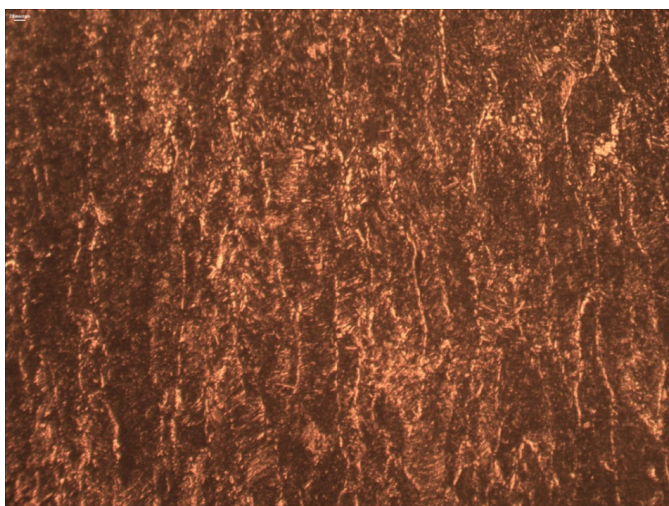


Рис. 4. Образец травленный № 11 (столбчатые кристаллиты, окруженные периферийным ферритом), $\times 100$

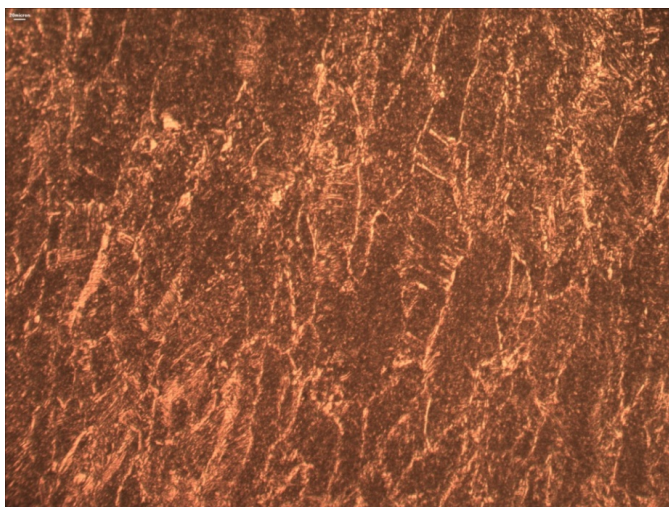


Рис. 5. Образец травленный № 12 (столбчатые кристаллиты, окруженные периферийным ферритом), $\times 100$

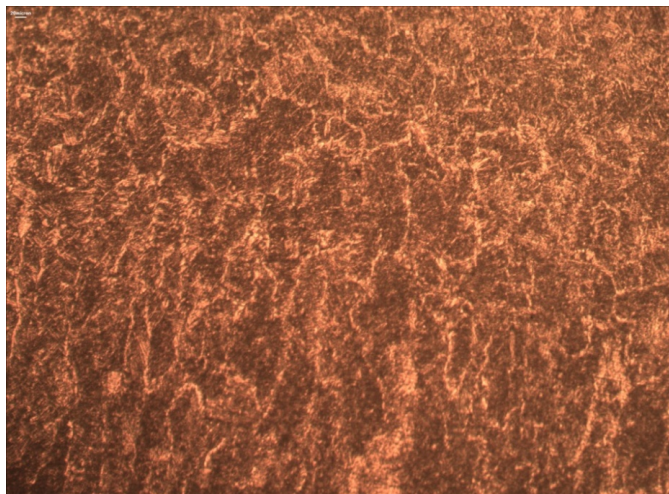


Рис. 6. Образец травленный № 13 (кристаллиты глобулярной формы, окруженные ферритной оторочкой), $\times 100$

металла, вместо столбчатого строения кристаллиты приобрели более равноосное состояние. Этот эффект, вероятно, определяется наибольшим количеством в этом образце модификатора – монокарбида вольфрама.

В случае образцов № 11 и 12 эффект модифицирования не реализуется, так как наблюдаемые структуры идентичны образцу № 1, который не содержит модификатора. Это может быть связано с недостаточным количеством модификатора в обмазке электрода, а также с потерей модифицирующего компонента, связанной с его (WC) переходом в сварочный шлак.

Следует отметить, что твердость наплавленного металла всех образцов находится примерно на одном уровне 184–189 HV. Это объясняется тем, что, не смотря на изменение морфологии структуры, ее фазовый состав не изменился.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других исследователей, также использовавших ультрадисперсный порошок WC для модифицирования металла сварочной ванны. Так, в работе [10] приводятся данные по улучшению структуры и механических свойств металла, наплавленного электродами марки УОНИ-13/45. В работе [7] также удалось добиться измельчения структуры металла за счет его модифицирования наноразмерными частицами WC.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Подобран эффективный модификатор в виде ультрадисперсного порошка WC с размером частиц 50–1000 мкм для управления кристаллизацией металла сварочной ванны низкоуглеродистых, низколегированных сталей.

2. Изготовлена партия экспериментальных электродов с основным покрытием, в обмазке которых содержалось от 0 до 0,4 % (от массы сухой смеси) порошка WC.

3. Наплавлены и изготовлены образцы для металлографических исследований и измерения твердости наплавленного металла.

4. Структура металла, наплавленного электродами, содержащими в обмазке 0; 0,02 и 0,2 % (от массы сухой смеси) порошка WC, характеризуется наличием столбчатых кристаллов, окруженных сеткой периферийного феррита, образовавшегося вдоль границ первичных зерен. Наблюдаются игольчатые включения видманштеттового феррита, прорастающие от края кристаллов к их центру, также структуры бейнитного типа.

5. Структура металла наплавленного электродами, содержащими в обмазке 0,4 % (от массы сухой смеси) порошка WC, характеризуется наличием измельченной ячеистой структуры, представленной равноосными кристаллами.

6. Твердость наплавленного металла в образцах находится примерно на одном уровне, в диапазоне 184–189 HV.

7. Эффект модифицирования проявился только в одном из образцов, наплавленном электродами, содержащими в обмазке 0,4 % (от массы сухой смеси) порошка WC.

8. Необходимы дополнительные исследования с целью поиска эффективного модификатора и оптимальной композиции обмазки электродов.

Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда содействия инновациям» (договор № 118 ГУ/2017)

Литература

1. Кузнецов, М.А. Нанотехнологии и наноматериалы в сварочном производстве (Обзор) / М.А. Кузнецов, Е.А. Зернин // *Сварочное производство*. – 2010. – № 12. – С. 23–26.
2. Горынин, И.В. Исследования и разработки ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области конструкционных наноматериалов / И.В. Горынин // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – № 3–4. С. – 36–57.
3. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2017. – Т. 15, № 2. – С. 85–88.
4. Гольдштейн, Я.Е. Инокулирование железо-углеродистых сплавов / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: *Металлургия*, 1993. – 416 с.
5. Теория сварочных процессов / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; под ред. В.В. Фролова. – М.: *Высшая школа*, 1988. – 559 с.
6. Феноменологическая модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак и др. // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 4. – С. 159–168.
7. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак и др. // *Физика и химия обработки материалов*. – 2009. – № 6. – С. 41–47.
8. Самсонов, Г.В. *Тугоплавкие соединения* / Г.В. Самсонов, И.М. Виницкий. – М.: *Металлургия*, 1976. – 560 с.
9. Стормс, Э. *Тугоплавкие карбиды: моногр.* / Э. Стормс. – М.: *Атомиздат*, 1970. – 304 с.
10. Влияние нанодисперсных карбидов WС и никеля на структуру и свойства наплавленного металла / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак др. // *Сварка и диагностика*. – 2011. – № 3. – С. 36–38.
11. Самсонов, Г.В. *Физическое материаловедение карбидов* / Г.В. Самсонов, Г.Ш. Упадхая, В.С. Нешпор. – Киев: *Наукова думка*, 1974. – 454 с.
12. Макаренко, В.Д. Особенности ручной дуговой сварки корневых швов неповоротных стыков нефтепроводов, эксплуатируемых в условиях Западной Сибири / В.Д. Макаренко, К.А. Муравьев // *Сварочное производство*. – 2005. – № 12. – С. 38–41.
13. Электроды для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе / И.Н. Зверева, А.Д. Картунов и др. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 92–95.
14. The research on surface properties of welding slags and electrode coatings / S.V. Mikhaylitsyn, M.A. Sheksheev et al. // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2017. – Vol. 52, no. 4. – P. 724–730.
15. Исследование вязкости жидких сварочных шлаков и расплавов электродных покрытий / С.В. Михайлицын, М.А. Шекшеев и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 280–287.

Шекшеев Максим Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; shecsheev@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4790-2821>.

Михайлицын Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; svmikhaylitsyn@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6414-3105>.

Сычков Александр Борисович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий металлургии и литейных процессов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; absyckov@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4127-0248>.

Емелюшин Алексей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологий металлургии и литейных процессов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; emelushin@magtu.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2983-1153>.

Ширяева Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; lisyun@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5143-3285>.

Поступила в редакцию 17 октября 2018 г.

DOI: 10.14529/met180414

HOW ULTRAFINE PARTICLES OF TUNGSTEN MONOCARBIDE AFFECT THE WELDED-METAL STRUCTURE

M.A. Sheksheyev, shecsheev@yandex.ru,

S.V. Mikhaylitsyn, svmikhaylitsyn@mail.ru,

A.B. Sychkov, absyckov@mail.ru,

A.N. Emelyushin, emelushin@magtu.ru,

E.N. Shirayeva, lisyun@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Statement of problem (relevance): the paper describes the problem of structure formation in welding low-carbon low-alloy steels. The weld metal structure forms in a complex thermal environment that predetermines the operating performance of the metal. Emergence of large columnar crystals in welds poses a potential hazard, as such structures may under certain conditions concentrate the tension and trigger destruction. The paper dwells upon the possibility of controlling the primary structure of welded metal by injecting nano- and ultrafine particles of a refractory material into the weld pool. The objective is to study how nano- and ultrafine particles of tungsten monocarbide (WC) affect the structure of welded metal. **Methods used:** the researchers have carried out a laboratory experiment consisting in making electrodes with a coating containing a varying amount of ultrafine WC powder, then making welded-metal samples and studying the samples by optical microscopy (a Micromed-Met microscope) as well as measuring the Vickers hardness (a HV-1000 device). The **novelty** of this research consists in gathering new data on how the concentration of ultrafine WC powder in the electrode coating affects the structure of welded metal. **The results:** the structure of metal welded by electrodes with a coating containing 0, 0.02, or 0.2 % of WC powder (% of dry-mix weight) features columnar crystals surrounded by a grid of peripheral ferrite formed along the primary-grain boundaries. Needle-like inclusions of Widmanstätten ferrite sprouting from

the crystal edges to the crystal center are observed along with bainitic structures. Electrodes with a coating containing 0.4% of WC powder produce welded metal of a finer cellular structure in the form of equiaxed crystals. The hardness of the welded-metal samples is within 184 to 189 HV. **Practical significance:** the research has produced data necessary for creating new coated electrodes for welding and surfacing low-carbon low-alloy steels.

Keywords: coated electrode, welding, surfacing, tungsten carbide, nanopowder, refractory compounds, modified, microstructure, mechanical properties.

References

1. Kuznecov M.A., Zernin E.A. [Nanotechnologies and Nanomaterials in the Welding Industry]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2010, no. 12, pp. 23–26. (in Russ.)
2. Gorynin I.V. [Research and Development of FSUE Central Research Institute KM “Prometheus” in the Field of Structural Nanomaterials]. *Rossijskie nanotehnologii*, 200, no. 3–4, pp. 36–57. (in Russ.)
3. Poleckov P.P., Hakimullin K. et al. [Purpose and Scope of Ultra-Cold-Resistant Nanostructured Sheet Metal]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85–88. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88
4. Gol'dshtejn Ja.E., Mizin V.G. *Inokulirovanie zhelezo-uglerodistykh splavov* [Inoculation of Iron-Carbon Alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1993. 416 p.
5. Volchenko V.N., Jampol'skij V.M., Vinokurov V.A. et al., Frolov V.V. (Ed.). *Teorija svarochnykh processov* [Theory of Welding Processes]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1988. 559 p.
6. Sokolov G.N., Lysak V.I. et al. [Phenomenological Model of the Formation of Crystallization Centers in a Metal Melt during Welding under the Influence of Ultrafine Refractory Components]. *Voprosy materialovedenija*, 2015, no. 4, pp. 159–168. (in Russ.)
7. Sokolov G.N., Lysak V.I. et al. [Modification of the Structure of the Weld Metal with Nano-dispersed Tungsten Carbides]. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 2009, no. 6, pp. 41–47. (in Russ.)
8. Samsonov G.V., Vinickij I.M. *Tugoplavkie soedinenija* [Refractory Compounds]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976. 560 p.
9. Storms Je. *Tugoplavkie karbidy* [Refractory Carbides]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 304 p.
10. Sokolov G.N., Lysak V.I. et al. [Effect of Nanodispersed Carbides WC and Nickel on the Structure and Properties of the Weld Metal]. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 3, pp. 36–38. (in Russ.)
11. Samsonov G.V., Upadhaya G.Sh., Neshpor V.S. *Fizicheskoe materialovedenie karbidov* [Physical Materials Carbides]. Kiyev, Naukova dumka Publ., 1974. 454 p.
12. Makarenko V.D., Murav'ev K.A. [Features Manual Arc Welding of Root Welds Butt Position of Pipelines Operating in Western Siberia]. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2005, no. 12, pp. 38–41. (in Russ.)
13. Zvereva I.N., Kartunov A.D., Platov S.I., Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A. Electrodes for Manual Arc Welding in Oil and Gas Complex. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 92–95. (in Russ.)
14. Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A. et al. The Research on Surface Properties of Welding Slags and Electrode Coatings. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2017, vol. 52, no. 4, pp. 724–730.
15. Mikhailitsyn S.V., Sheksheev M.A., Platov S.I., Emelyushin A.N., Naumov S.V. [Investigation of Viscosity of Liquid Welding Slags and Melts of Electrode Coatings]. *Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 280–287. (in Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-280-287

Received 17 October 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование влияния ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама на структуру наплавленного металла / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 128–136. DOI: 10.14529/met180414

FOR CITATION

Sheksheev M.A., Mikhaylitsyn S.V., Sychkov A.B., Emelyushin A.N., Shirayeva E.N. How Ultrafine Particles of Tungsten Monocarbide Affect the Welded-Metal Structure. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 128–136. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180414