

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-2-54-63

УДК 621.791

А. В. ШАБЛОВСКИЙ

Д. И. ЯКУБОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРУ ШВОВ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Аннотация

Представлены результаты исследований по определению условий растворения кремния в сварном шве при различных концентрациях мелкодисперсного карбида кремния в покрытии электрода для ручной дуговой сварки, а также оценка его влияния на структурообразование и механические свойства сварного соединения. Представлены и проанализированы результаты испытаний на статическое растяжение и твердость, а также химического и металлографического анализов образцов сварных швов, полученные в ходе исследований.

Ключевые слова:

мелкодисперсный карбид кремния, сварочные электроды, изменение структуры наплавленного металла, механические свойства сварного шва, ручная дуговая сварка.

Для цитирования:

Шабловский, А. В. Влияние мелкодисперсного карбида кремния на структуру швов при ручной дуговой сварке / А. В. Шабловский, Д. И. Якубович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 2 (91). – С. 54–63.

Введение

В настоящее время широкое применение в области сварки нашло использование различных мелкодисперсных шихтовых материалов в составе покрытия электродов для ручной дуговой сварки, повышающих качество сварных соединений, улучшающих механические свойства шва и прочностные характеристики. Одним из распространенных элементов, добавляемых в сварочные материалы, является кремний и его химические соединения.

Немаловажным фактором в условиях импортозамещения является поиск местных, внутренних альтернатив более дорогим импортным аналогам, что позволяет снизить риски, связанные с изменениями в международной торговле, и увеличить инвестиции в исследования и разработку своих качественных сварочных материалов. Такой подход снизит зависимость от импорта

и в конечном итоге создаст более выгодные условия для потребителя. Заменителем кремния в шихте электрода может служить мелкодисперсный порошок карбида кремния, полученный из отработанной масляной суспензии, используемой при резке монокристаллических пластин [1].

Карбид кремния широко применяется в абразивных инструментах, огнеупорных материалах, керамике, металлообработке, производстве полупроводников, упрочнении деталей машин и других областях техники. В сварочном производстве он выступает как упрочняющая фаза, повышающая твердость и износостойкость наплавленного металла [2].

Кремний имеет высокое сродство к кислороду и помогает эффективно удалять кислород из сварочной ванны, что предотвращает образование оксидов, ухудшающих свойства сварного шва, и препятствует образованию пористости

и неметаллических включений. Дополнительно мелкодисперсный кремний способствует измельчению зерна в наплавленном металле, в результате чего повышаются его прочностные характеристики. Карбиды и силициды, формирующиеся при кристаллизации расплавленного металла, повышают твердость и упрочняют структуру металла сварного шва. Введение кремния в состав наплавленного металла увеличивает его абразивную износостойкость, что особенно важно для деталей, работающих в условиях интенсивного трения и износа. Кремний снижает вязкость сварочной ванны, способствует улучшению текучести расплавленного металла и формированию шва, что обеспечивает качественное заполнение разделки кромок, позволяет достигать более однородных швов и уменьшает склонность наплавленного металла к образованию холодных трещин.

В [3, 4] описаны способы применения карбида кремния при автоматической сварке и наплавке в среде защитных газов. Установлено, что карбид кремния при дуговой наплавке нестабилен, т. к. приводит к легированию наплавленного металла кремнием и углеродом, что целесообразно при использовании в электродной или присадочной проволоке. Также он выступает как раскислитель, предотвращая окисление других легирующих элементов. В частности, при наплавке на стали Ст3пс с помощью дуговой сварки неплавящимся электродом в среде аргона карбид кремния разрушается, повышая твердость наплавленного металла за счёт увеличения содержания кремния и углерода в расплаве. Таким образом, карбид кремния можно использовать в составе сварочных материалов для легирования и повышения свойств наплавленного металла.

В [5] автором показан положительный эффект модифицирования наноструктурированными порошками при

дуговой сварке плавящимся электродом на состав, свойства и структуру соединений. Установлено, что происходит модифицирование наплавленного металла, улучшение ударной вязкости и твердости металла шва, измельчение зерна в структуре зоны термического влияния, образование однородной микроструктуры.

Таким образом, введение мелкодисперсного порошка на основе карбида кремния в состав покрытия сварочных электродов позволяет повысить механические и эксплуатационные свойства сварного соединения.

Целью данного исследования является определение условий растворения кремния в сварном шве при различных концентрациях мелкодисперсного карбида кремния в покрытии электрода для ручной дуговой сварки, а также оценка его влияния на механические свойства сварного соединения.

Изготовление электродов с содержанием мелкодисперсного порошка карбида кремния

Для проведения экспериментальной части исследования были изготовлены три партии сварочных электродов, для которых за основу использовались электроды марки МР-3 с добавлением варьируемого количества мелкодисперсного порошка на основе карбида кремния: добавку порошка в состав покрытия сварочных электродов использовали в количестве 3 %, 6 % и 9 % от массы шихты электродов [6].

Были изготовлены три вида шихты для нанесения обмазки на стержень электрода с соответствующим процентным содержанием мелкодисперсного порошка. В качестве добавки в шихту покрытия электрода использовался мелкодисперсный порошок на основе карбида кремния в регенерированной форме, представленный на рис. 1.

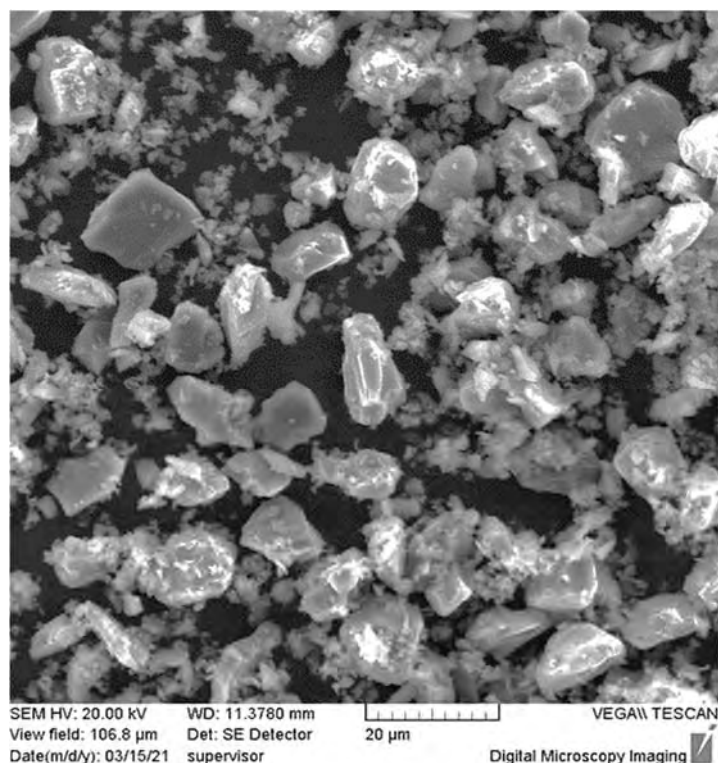


Рис. 1. Мелкодисперсный порошок на основе карбида кремния

Такой порошок получают из отработанной масляной суспензии карбида кремния, которую используют на предприятиях электронной промышленности для резки монокристаллических пластин кремния путем разделения ее в разбавленном углеводородным растворителем состоянии на жидкую и твердую фазы. Разбавление необходимо осуществлять для снижения седиментационной устойчивости системы SiC–масло, уменьшения ее вязкости и облегчения процесса отделения твердой фазы центрифугированием или фильтрацией. Полученный таким способом карбид кремния представляет собой сыпучий порошок серого цвета с темно-зеленоватым оттенком, негигроскопичный, не пылящий, без запаха, с размером зерен до 11 мкм, но уже не столь четкой геометрии по сравнению с исходным состоянием. Кроме того, он содержит заметное количество очень мелкой фракции, скрепляющей кристаллы. Ее происхождение является резуль-

татом абразивного воздействия карбида кремния как на материал обрабатываемого объекта, так и на сам инструмент, в качестве которого используется стальная нить [7].

Для обеспечения равномерного распределения порошка карбида кремния в объеме шихты перемешивание компонентов осуществлялось в течение 1,5 ч в специальном смесителе «пьяная бочка».

В качестве связующего элемента для нанесения обмазки на стержень сварочной проволоки диаметром 3 мм (марка Св08А) использовалось натриевое жидкое стекло ПС-80 (ГОСТ 13079–81) в количестве 30 %...33 % от массы шихты.

Формирование электродов производилось посредством нанесения полученной массы на металлический стержень электрода марки Св08 и последующим прессованием в специально разработанной оснастке.

После прессования электроды подвергались естественной сушке при температуре 18 °С...20 °С в течение 24 ч с последующей прокалкой (непосредственно перед сваркой) и наплавкой при температуре 100 °С в течение 60 мин.

Для получения экспериментальных сварных соединений и образцов наплавленного металла согласно ГОСТ 6996–66 были подготовлены стальные пластины марки СтЗпс толщиной 6 мм и размером 100 × 100 мм с углом разделки кромок 25°.

Кроме того, точно так же был изготовлен образец, сваренный стандартными электродами марки МР-3 (образец 0), с которым сравнивались исследуемые образцы (образцы 3, 6 и 9), чтобы обеспечить точность и достоверность результатов испытаний.

Сварку изготовленными экспериментальными образцами электродов осуществляли с использованием сварочного аппарата Fronius F-4600 Wels при силе сварочного тока 90...110 А. Твердость определяли на твердомере Mikro-size-uRocky-W методом Роквелла по шкале В. Исследование микроструктуры полученных образцов проводилось с помощью детектора вторичных электронов (ETD) в камере двулучевого растрового электронного микроскопа Versa 3D. Для количественного и качественного химического состава образцов металла был использован оптико-эмиссионный спектрометр SPECTROMAX.

Этапы испытаний образцов сварных швов, полученных электродами с добавлением карбида кремния

Известно, что механические свойства сварного соединения в целом являются комплексными, т. к. они зависят от соотношения механических свойств металла шва, металла зоны термического влияния и основного металла. Иными словами, если исходить

из свойств основного металла, то очевидно, что сварное соединение на конструкционных сталях можно считать качественным, если оно обеспечивает величины предела прочности и предела текучести не ниже, чем у основного металла, при достаточном запасе пластичности [8].

Полученные из стальных пластин сварные образцы подвергались оценке свойств сварных соединений. Для этого были выполнены несколько этапов испытаний.

Первым этапом были проведены механические испытания сварных швов на статическое растяжение в соответствии с требованиями ГОСТ 6996–66, позволяющие определить временное сопротивление наиболее слабого участка. Временное сопротивление подсчитывали по ГОСТ 1497–84. При испытании определяли место разрушения образца (по металлу шва, по металлу околошовной зоны, по основному металлу). Испытания на разрыв образцов сварных соединений проводились на разрывной машине [9].

Для каждой партии электродов с различным процентным содержанием добавки карбида кремния были изготовлены и испытаны по три образца. Все испытанные образцы продемонстрировали разрушение по основному металлу на удалении от линии сплавления на 20...60 мм (рис. 2). Результаты испытаний на статическое растяжение представлены в табл. 1.

По результатам исследований установлено, что для всех исследуемых образцов сварных швов предел прочности при растяжении составил 430...470 МПа. Этот диапазон показателей полностью соответствует требованиям ГОСТ 380–2005, который устанавливает нормы для стали марки СтЗ, а именно предельные значения прочности находятся в диапазоне от 370 до 490 МПа. Следовательно, добавление мелкодисперсного порошка на

основе карбида кремния в металл сварного шва не только способствует повышению прочностных характеристик, но

и не нарушает условие равнопрочности сварного соединения и основного металла [10].



Рис. 2. Разрушение образцов при испытании сварных швов на статическое растяжение

Табл. 1. Результаты испытаний на статическое растяжение исследуемых образцов сварных швов

Номер образца	Добавление SiC в шихту электрода, %	Усилие при разрыве, Н	Предел прочности, МПа
0	–	46980	468,5
		45430	463,3
		46360	470,6
3	3	47250	463,2
		44680	465,8
		45160	470,4
6	6	45390	472,4
		46570	443,1
		46780	458,6
9	9	40270	447,4
		38900	432,2
		44340	461,9

Вторым этапом была измерена твердость сварных швов. Было подготовлено четыре серии образцов, которые представляли собой сварные швы со снятием усиления для получения требуемой точности измерений. Измерения проводили по центру сварного шва в трех точках, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Для

каждой точки фиксировали индивидуальные значения и вычисляли среднее.

Исследуемые образцы, обозначенные номерами 3, 6 и 9, сравнивались с эталонным образцом, обозначенным «0». Результаты измерений твердости представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты измерения твердости исследуемых образцов сварных швов

Номер образца	Добавление SiC в шихту электрода, %	Номер прокола			Среднее значение твердости, HRB
		1	2	3	
3	3	92	92	92	92,7
		93	94	93	
6	6	96	95	97	96,0
		96	96	96	
9	9	93	94	93	92,8
		93	92	92	
0	—	80	82	85	84,3
		89	85	85	

Анализ результатов измерения твердости показал, что по сравнению с образцом сварного шва, выполненного при помощи стандартного электрода МР-3 (образец 0), твердость сварных швов, полученных при помощи экспериментальных электродов (образцы 3, 6 и 9), находится в диапазоне 92,7...96,0 HRB. Увеличение твердости произошло на 10 %...14 % по отношению к нулевому образцу, твердость которого составляет 84,3 HRB. Незначительное увеличение твердости связано с тем, что в наплавленном металле, скорее всего, не образовались отдельные химические соединения с кремнием. Предполагаем, что имеющиеся кремний и углерод в используемом мелкодисперсном порошке растворились в феррите, искажив его кристаллическую решетку, и, как следствие, повысив твердость, что и подтверждается химическим составом,

представленным в табл. 3.

Третий этап исследований полученных образцов сварных швов заключался в последующем проведении химического анализа. Для проведения исследования из каждого сварного шва вырезали по два участка и при помощи оптико-эмиссионного спектрометра определили содержание углерода и кремния в исследуемых образцах сварных швов при различном содержании карбида кремния в обмазке сварочных электродов. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Установлено увеличение содержания углерода с 0,09 % до 0,15 %, что составляет 66,7 %. Это связано с повышением содержания порошка в покрытии электрода и, как следствие, в сварочной ванне.

Табл. 3. Зависимость содержания углерода и кремния в образцах сварных швов с разным процентным соотношением мелкодисперсного порошка в обмазке сварочных электродов

Номер образца	Добавление порошка в шихту электрода, %	Содержание элементов в образцах, %			
		C		Si	
		по образцам	среднее значение	по образцам	среднее значение
3	3	0,08	0,09	0,54	0,55
		0,10		0,56	
6	6	0,15	0,12	0,95	0,94
		0,09		0,93	
9	9	0,15	0,13	1,34	1,27
		0,12		1,19	
0	–	0,10	0,10	0,33	0,35
		0,09		0,37	

Анализ показал, что содержание кремния в образцах сварных швов значительно возрастает с 0,55 % до 1,27 % при увеличении доли карбида кремния в обмазке сварочных электродов. Это увеличение составляет около 131 % по сравнению с эталонным нулевым образцом.

На основании проведенного химического анализа можно сделать вывод, что использование карбида кремния в обмазке сварочных электродов приводит к значительному увеличению содержания как углерода, так и кремния в сварных швах вследствие их расплавления и растворения в жидком металле сварочной ванны. Это, в свою очередь, влияет на характеристики прочности и, как следствие, износостойкости сварных соединений.

Результаты исследований подтверждают данные, описанные в [11], о том, что легирование сварных швов кремнием способствует улучшению их механических свойств, в частности устойчивости к износу и коррозии. Установленная зависимость содержания элементов от процентного соотношения мелкодисперсного порошка карбида

кремния в обмазке показывает, что точный контроль химического состава является ключевым для достижения оптимальных характеристик сварных изделий. Однако известно, что при содержании кремния 0,8 %...1,5 % свариваемость ухудшается из-за повышения жидкотекучести.

На четвертом этапе исследования был проведен металлографический анализ образцов. Процесс включает подготовку образцов, шлифовку, полировку, травление и микроскопический анализ. Для данного анализа использовали образцы сварных швов, полученных при сварке электродами с добавлением 3 % и 9 % мелкодисперсного порошка от массы шихты, а также образец сварного шва, сваренный с использованием стандартного электрода МР-3. Микроструктура полученных образцов представлена на рис. 3.

Исследование микроструктуры проводилось в соответствии с ГОСТ 5639–82. Оно состояло в определении средней площади и среднего диаметра зерен с использованием метода подсчета, кото-

рый основан на вычислении их количества на единице поверхности шлифа (1 мм^2). Используя таблицу для определения номера зерна на основе среднего диаметра и площади, были получены следующие результаты: у образца, полученного при сварке стандартным

электродом, номер зерна – 9; у образца шва, сваренного электродом с добавлением 3 % мелкодисперсного порошка в шихту обмазки, номер зерна равен 10; у образца шва, сваренного электродом с добавлением 9 % порошка, номер зерна составляет 11.

а)

б)

в)

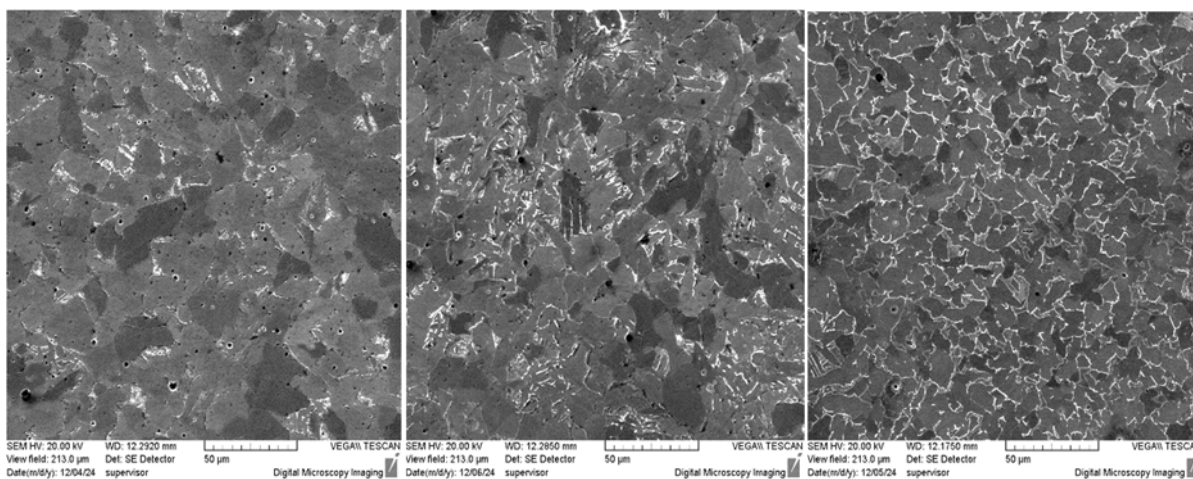


Рис. 3. Микроструктура образцов сварных швов, полученных при сварке электродами с различным содержанием мелкодисперсного порошка карбида кремния: а – при сварке стандартным электродом; б – при сварке электродом с добавлением 3 % порошка; в – при сварке электродом с добавлением 9 % порошка

Установлено, что с увеличением содержания мелкодисперсного карбида кремния в шихте покрытых электродов происходит уменьшение среднего диаметра зерен в сварных швах с 12 до 8 мкм. Результаты расчетов показали, что с увеличением содержания мелкодисперсного порошка в покрытии электродов наблюдается уменьшение среднего диаметра зерен в микроструктуре сварного шва. Это соответствует увеличению номера зерна с 9 до 11. Такое изменение номера зерна указывает на то, что добавление мелкодисперсного порошка в шихту обмазки сварочных электродов приводит к повышению прочности сварного шва вследствие измельчения структуры.

Заключение

Проведенный комплекс исследований показал, что введение мелкодисперсного порошка на основе карбида кремния с размерами частиц до 20 мкм в шихту обмазки сварочных электродов для ручной дуговой сварки оказывает влияние на структурообразование металла сварного шва.

Добавление мелкодисперсного порошка на основе карбида кремния в металл сварного шва не нарушает условие равнопрочности сварного соединения. Предел прочности при растяжении сварных швов находился выше предела прочности основного металла, который составлял 430...470 МПа.

Вместе с тем введение мелкодисперсного порошка в сварочную ванну через обмазку электрода увеличивает содержание кремния с 0,55 % до 1,27 % и углерода с 0,09 % до 0,15 %, что

повышает твердость шва на 10 %...14 % (с 84,3 до 96 HRB), а также способствует уменьшению среднего диаметра зерен металла шва с 12 до 8 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультрадисперсный порошок карбида кремния из производственных отходов / Е. В. Карпинчик, Л. И. Южик, В. Е. Агабеков, В. Ф. Бевза // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2019. – С. 128–129.
2. **Удовицкий, В. И.** Долговечность диффузионно-насыщенных кремнием деталей машин / В. И. Удовицкий. – М. : Машиностроение, 1983. – 240 с.
3. Влияние карбида кремния, вводимого в шихту порошковой проволоки, на структуру наплавленного металла / Н. В. Коберник, А. Л. Галиновский, И. Н. Кравченко [и др.] // *Металлург.* – 2023. – № 2. – С. 70–75.
4. Поведение карбида кремния при введении его в расплав сварочной ванны на основе железа / В. В. Петрова, Н. В. Коберник, А. С. Панкратов [и др.] // *Электротехнология.* – 2021. – № 10. – С. 15–22.
5. **Кузнецов, М. А.** Измельчение микроструктуры наплавленного металла путем введения в зону сварки наноструктурированных элементов-модификаторов / М. А. Кузнецов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2012. – № 4 (57). – С. 115–119.
6. **Якубович, Д. И.** Определение концентрации кремния и углерода в сварных швах и их влияние на твердость наплавленного металла / Д. И. Якубович, А. В. Шабловский // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. – С. 206.
7. Патент ВУ 23175, МПК В01D 21/26 (2006.01). Способ переработки отходов суспензии карбида кремния : № а 20160292 : заявлено 01.08.2016 : опубл. 30.04.2018 / Карпинчик Е. В., Агабеков В. Е., Южик Л. И. ; заявитель : Ин-т химии новых материалов НАН Беларуси. – 6 с.
8. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки : учебник / В. П. Куликов. – Мн. : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. – 463 с.
9. **Шабловский, А. В.** Исследования влияния мелкодисперсного карбида кремния на структурообразование сварных швов при ручной дуговой сварке / А. В. Шабловский, Д. И. Якубович // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2026. – С. 179.
10. **Акулов, А. И.** Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.
11. **Хан, Б. Х.** Раскисление, дегазация, легирование / Б. Х. Хан, Н. Я. Ящук. – М. : Металлургия, 1965. – 255 с.

Статья сдана в редакцию 3 апреля 2026 года

Контакты:

region-av@mail.ru (Шабловский Андрей Викторович);
d.i.yakubovich@mail.ru (Якубович Дмитрий Иванович).

A. V. SHABLOVSKY, D. I. YAKUBOVICH

EFFECT OF FINELY DISPERSED SILICON CARBIDE ON WELD STRUCTURE IN MANUAL ARC WELDING

Abstract

The paper presents the results of studies on determining the conditions for silicon dissolution in the weld pool at various concentrations of finely dispersed silicon carbide in manual arc welding electrode coatings, as well

as the assessment of its effect on the microstructure formation and mechanical properties of the welded joint. The results of static tensile and hardness tests, along with chemical and metallographic analyses of the weld samples obtained during the investigation, are presented and analyzed.

Keywords:

fine-dispersed silicon carbide, welding electrodes, deposited metal structure modification, weld mechanical properties, manual arc welding.

For citation:

Shablovsky, A. V. Effect of finely dispersed silicon carbide on weld structure in manual arc welding / A. V. Shablovsky, D. I. Yakubovich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 2 (91). – P. 54–63.