

М. А. Шекшеев

**ВЛИЯНИЕ ПОРОШКОВ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА И СТРУКТУРУ СВАРНЫХ ШВОВ
НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Магнитогорский государственный технический университет

им. Г. И. Носова

e-mail: shecsheev@yandex.ru

Настоящая статья посвящена исследованиям влияния порошков тугоплавких материалов на структуру и механические свойства наплавленного металла сварных швов низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, а также на характер переноса электродного металла в процессе сварки. Установлено, что добавки порошков WC, VC, TiC в основное покрытие сварочных электродов приводят уменьшению размеров капель электродного металла на 14–17 % на токе 110 А. Показано, что макроструктура сварных швов низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, выполненных экспериментальными электродами, характеризуется наличием крупной кристаллической структуры. Кристаллиты металла сварных швов, выполненных с инокулирующими добавками, приняли более равновесное состояние, а максимальная площадь их сечения уменьшилась в 6–8 раз в сравнении с базовым образцом. Микроструктура металла сварных швов характеризуется наличием мелкодисперсного феррито-бейнита преимущественно игольчатой морфологии. Показано, что добавки тугоплавких материалов в покрытие электродов привели к повышению значений временного сопротивления, предела текучести и твердости по Виккерсу металла сварных швов. При этом наблюдается снижение уровня ударной вязкости в 1,5–3 раза в зависимости от типа порошковой добавки.

Ключевые слова: сварка, наплавка, покрытый электрод, инокулирование, модифицирование, сварочно-технологические свойства, плавление электрода, карбид вольфрама, карбид ванадия, карбид титана, структура металла, механические свойства

M. A. Sheksheev

THE EFFECT OF POWDERS OF REFRACTORY MATERIALS ON THE TRANSFER OF ELECTRODE METAL AND THE STRUCTURE OF WELDS OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS

Nosov Magnitogorsk State Technical University

This article is devoted to studies of the effect of powders of refractory materials on the structure and mechanical properties of the deposited metal of welds of low-carbon low-alloy high-strength steels, as well as on the nature of electrode metal transfer during welding. It was found that the addition of WC, VC, TiC powders to the main coating of welding electrodes reduces the size of droplets of electrode metal by 14–17 % at a current of 110 A. It is shown that the macrostructure of welds of low-carbon low-alloy high-strength steels made using experimental electrodes is characterized by the presence of a large crystalline structure. The metal crystallites of the welds made with inoculating additives assumed a more stable state, and their maximum cross-sectional area decreased by 6–8 times compared to the base sample. The microstructure of the weld metal is characterized by the presence of finely dispersed ferrite-bainite of predominantly needle-like morphology. It is shown that the addition of refractory materials to the electrode coating led to an increase in the values of temporary resistance, yield strength, and Vickers hardness of the weld metal. At the same time, there is a decrease in the level of impact strength by 1,5 – 3 times, depending on the type of powder additive.

Keywords: welding, surfacing, coated electrode, inoculation, modification, welding and technological properties, melting of the electrode, tungsten carbide, vanadium carbide, titanium carbide, metal structure, mechanical properties

Введение

Магистральные нефте- и газопроводы относятся к технологическим комплексам высокой степени надежности. Указанные объекты изготавливают из труб, выполненных из низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей с интерметаллидным армированием, получаемых методом контролируемой прокатки [1, 2].

При осуществлении монтажа и ремонта трубопроводов и трубопроводных систем нефти и газа широкое применение нашла ручная дуговая сварка электродами с основным покрытием [3]. Сварные швы должны обеспечивать требуемый комплекс механических свойств, не ниже уровня основного металла [4].

Для улучшения структуры и механических свойств металла швов применяют послесварочную термическую обработку. Однако это приводит к увеличению затрат времени на работы и удорожанию технологического процесса. В конечном счете указанные факторы приводят к повышению итоговой стоимости объекта капитального строительства.

В связи с этим к покрытым сварочным электродам предъявляют требования по обеспечению эффективной структуры металла шва, которая гарантирует необходимые механические характеристики без применения дополнительной термической обработки. При этом электроды должны обладать хорошими сварочно-технологическими свойствами.

Перспективным методом улучшения структуры и механических свойств металла сварных швов непосредственно в процессе сварки является инокулирование расплава сварочной ванны частицами порошков тугоплавких материа-

лов [5, 6]. Частицы, введенные в расплав через электродное покрытие, выступают в роли искусственных центров кристаллизации и приводят к измельчению первичной и вторичной структуры наплавленного металла [7, 8].

Настоящая статья посвящена сравнительным исследованиям влияния порошков различных тугоплавких материалов на структуру и механические свойства наплавленного металла сварных швов низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, а также на характер переноса электродного металла в процессе сварки.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные электроды диаметром 4,00 мм, обладающие основным покрытием с коэффициентом $D/d \sim 1,6$, изготавливали методом опрессовки с помощью специального лабораторного пресса.

В качестве инокулирующих добавок использовали порошки карбидов тугоплавких металлов (рис. 1): монокарбид вольфрама WC, монокарбид ванадия VC и монокарбид титана TiC. Эти материалы обладают хорошей термической стабильностью, которая необходима для условий дугового промежутка и сварочной ванны. Размер тугоплавких частиц не превышал критического для низкоуглеродистых, низколегированных сталей [9], чтобы повысить эффективность добавок.

Таким образом, было изготовлено четыре партии электродов, содержащих различные инокулирующие добавки. Образец № 1 имел базовый состав покрытия и добавок не содержал, а образцы № 2, 3 и 4 содержали по 1,0 % порошка WC, VC и TiC соответственно.

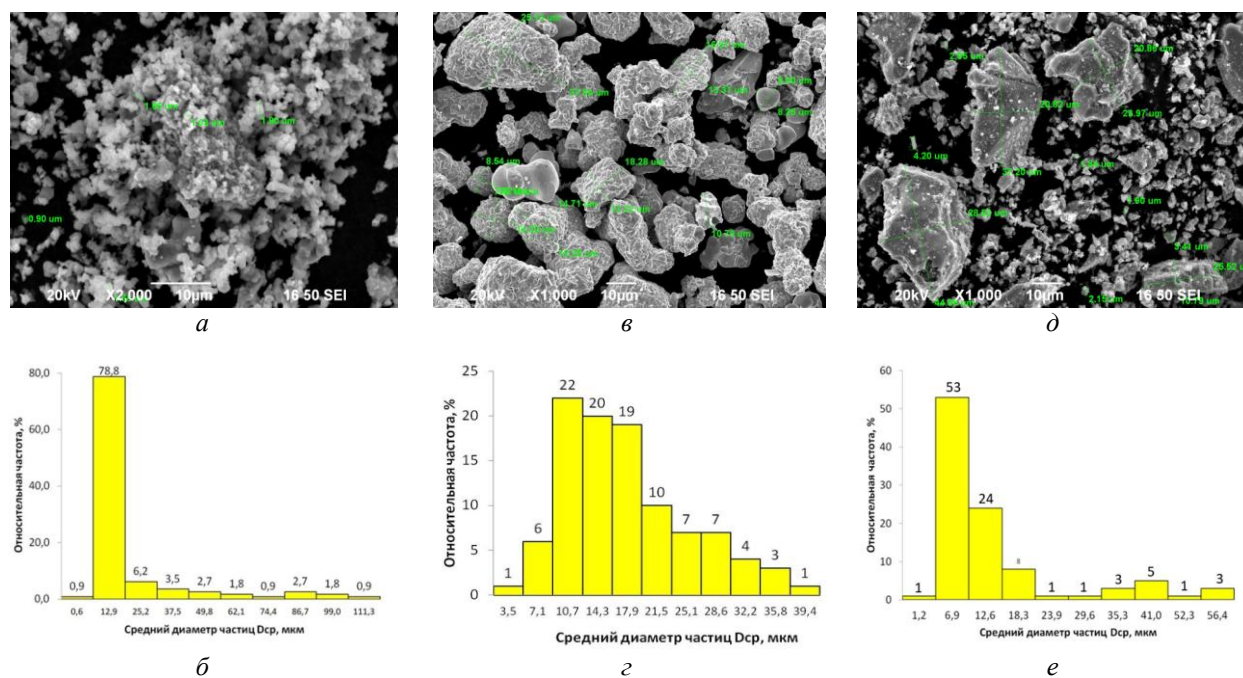


Рис. 1. Внешний вид и относительная частота распределения частиц в объеме порошка:
а, б – TiC; в, г – WC; д, е – VC

Экспериментальные исследования проводили в два этапа. В качестве источника питания постоянного тока во всех опытах применяли сварочный аппарат инверторного типа.

На первом этапе оценивали влияние тугоплавких частиц на сварочно-технологические свойства, в частности на характер каплепереноса в процессе плавления электрода. Исследование вели методом прямой оценки с помощью специального стенда [10].

Капли металла получали путем расплавления электродов на пластину из сплава М1, толщиной 8,0 мм. Образующиеся капли расплавленного металла свободно опадали в емкость с водой. Расплавление электродов каждого состава вели на токе (110, 160, 200 А) обратной полярности. Полученные образцы просушивали, очищали и подвергали обмеру и взвешиванию. В качестве показателей плавления были приняты диаметр D_k и масса M_k электродных капель.

На втором этапе производили сварку фрагментов проката из трубной стали класса прочности К60 размерами 330×200×20 мм с V-образной разделкой на подложке в нижнем положении на токах 100 – 120 А обратной полярности. Из сваренных пластин изготавливали образцы для механических испытаний по ГОСТ 6996 – 66, а также темплеты для металлографических исследований и измерений твердости металла.

Для анализа структуры металла использовался оптический микроскоп Axio Observer

с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO.

Анализ порошков тугоплавких металлов проводили методом растровой электронной микроскопии с применением прибора JSM 6490 LV В, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 450 x-MAX 50 Premium.

Временное сопротивление разрыву и предел текучести металла сварных швов определяли с помощью универсальной испытательной машины AG-AC 300 фирмы Shimadzu, а также ZWICK серии Z2000 фирмы GmbH&Co.

Твердость по Виккерсу HV10 определяли на твердомере Buchler Mikromet методом вдавливания алмазной пирамидки.

Определение ударной вязкости на образцах Шарпи с V-образным надрезом проводили на маятниковом копре при температуре образцов – 40 °С.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ данных измерения диаметров и массы электродных капель показал, что с увеличением сварочного тока $I_{св}$ от 110 до 200 А значения D_k и M_k уменьшаются для всех рассмотренных составов.

Для оценки влияния количества инокулирующих добавок на перенос электродного металла были построены диаграммы рассеяния параметров D_k и M_k при различных значениях

сварочного тока (рис. 2). Области построения диаграмм были разделены на пять зон размерности, в которых локализованы значения. Проводили подсчет количества капель, попадающих в каждую из зон, на основании чего делались выводы о влиянии порошков WC, VC, TiC в покрытии электродов на параметры каплепереноса. Результаты подсчетов приведены в табл. 1.

Анализ распределения капель электродного металла (табл. 1) по зонам размерности на токе 110 А показывает, что при использовании элект-

родов с базовым составом покрытия порядка 71,25 % капель сосредоточено в мелкогазразмерных зонах № 1 и 2, а остальное количество локализуется в крупногазразмерных зонах № 3–5. При добавке 1,0 % порошка WC количество электродных капель в мелкогазразмерных зонах увеличилось до 85,93 %. Добавка 1,0 % порошка VC привела практически к такому же повышению локализации капель в зонах № 1 и 2, до 85,22 %. Порошок TiC привел к увеличению количества капель в зонах № 1 и 2 до 88,81 %.

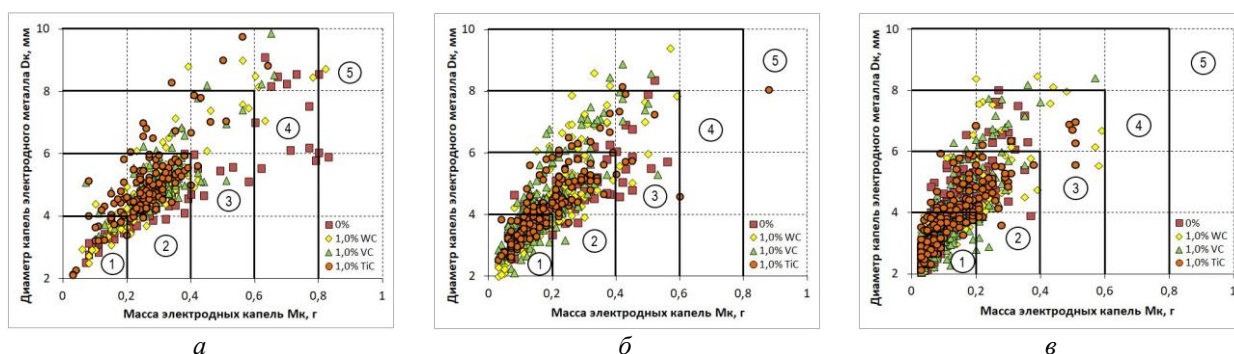


Рис. 2. Зависимость показателей переноса электродного металла от содержания в покрытии порошков тугоплавких материалов при различных значениях силы сварочного тока, А:
а – 110; б – 160; в – 200

При увеличении силы тока влияние порошковых добавок на размер капель снижается. Максимальная разница в сравнении с базовым

составом покрытия по количеству капель в зонах № 1 и 2 составляет 5,21 и 4,49 % при токах 160 и 200 А соответственно.

Таблица 1

Распределение электродных капель по зонам размерности

№ образца	I _{св} = 110 А					I _{св} = 160 А					I _{св} = 200 А				
	№ зоны размерности														
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Распределение электродных капель по зонам размерности, %														
1	21,25	50	8,75	15	5	33	53	13	1	–	59,15	32,77	5,53	2,55	–
2	21,09	64,84	8,6	4,69	0,78	49,23	36,92	12,31	1,54	–	68,39	21,29	7,74	2,58	–
3	4,35	80,87	11,3	3,48	–	45,6	41,45	11,4	1,55	–	60,62	30,05	8,29	1,06	–
4	10,49	78,32	8,39	2,8	–	40,66	50,55	7,69	0,55	0,55	56,41	40,0	3,59	–	–

Макроанализ анализ показал, что металл сварных швов не имеет внутренних дефектов и обладает плотной структурой. Швы состоят из более чем 20 слоев наплавленного металла.

В металле шва образца № 1 (рис. 3, а) наблюдаются крупные столбчатые кристаллы, окруженные сеткой периферийного феррита, выделившегося по границам первичных зерен. Ре-

зультаты количественного анализа показали, что площадь сечения кристаллитов изменяется от 30544 до 267990 мкм².

Образец № 2 (рис. 3, б) характеризуется наличием крупнокристаллической структуры, однако кристаллиты приняли более равновесное состояние, а площадь их сечения уменьшилась и находится в диапазоне от 1486 до 44425 мкм².

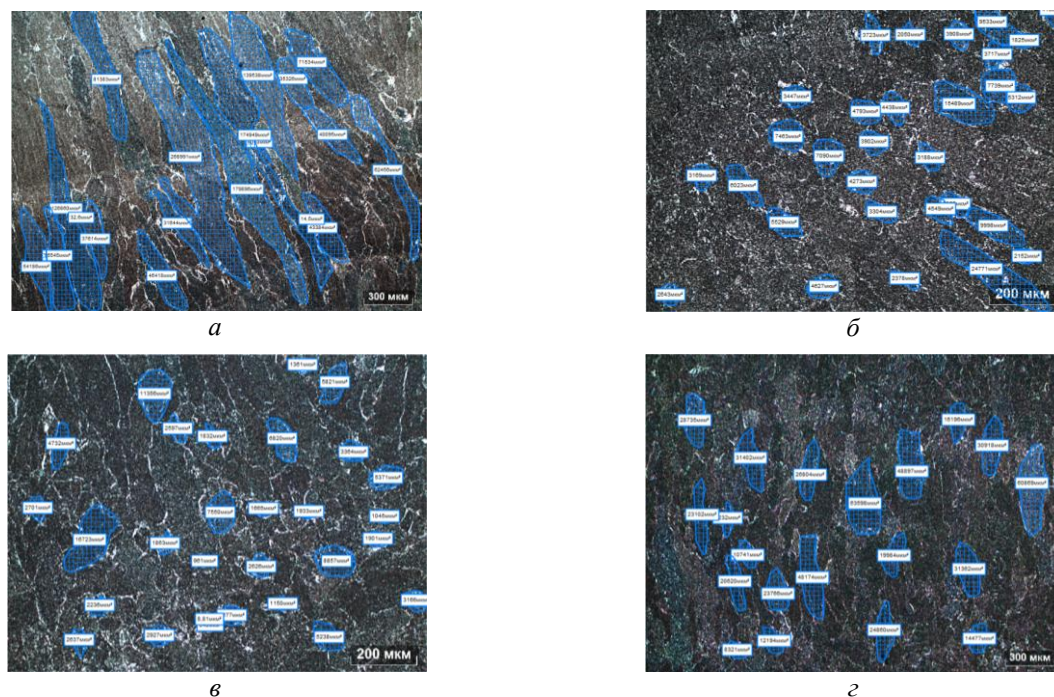


Рис. 3. Макроструктура металла сварных швов выполненных электродами с различными порошковыми добавками:
а – 0 %; б – 1,0 % WC; в – 1,0 % VC; г – 1,0 % TiC

В образцах № 3 (рис. 3, в) и 4 (рис. 3, г) также наблюдается уменьшение площади сечения кристаллитов в сравнении с базовым образцом, она находится в диапазоне от 673 до 30019 мкм² и от 3189 до 63598 мкм² соответственно.

Микроструктура металла сварных швов характеризуется наличием мелкодисперсного феррито-бейнита преимущественно игольчатой морфологии (рис. 4). Также наблюдаются локальные участки видманшеттового феррита с характерными игольчатыми образованиями (рис. 4, а).

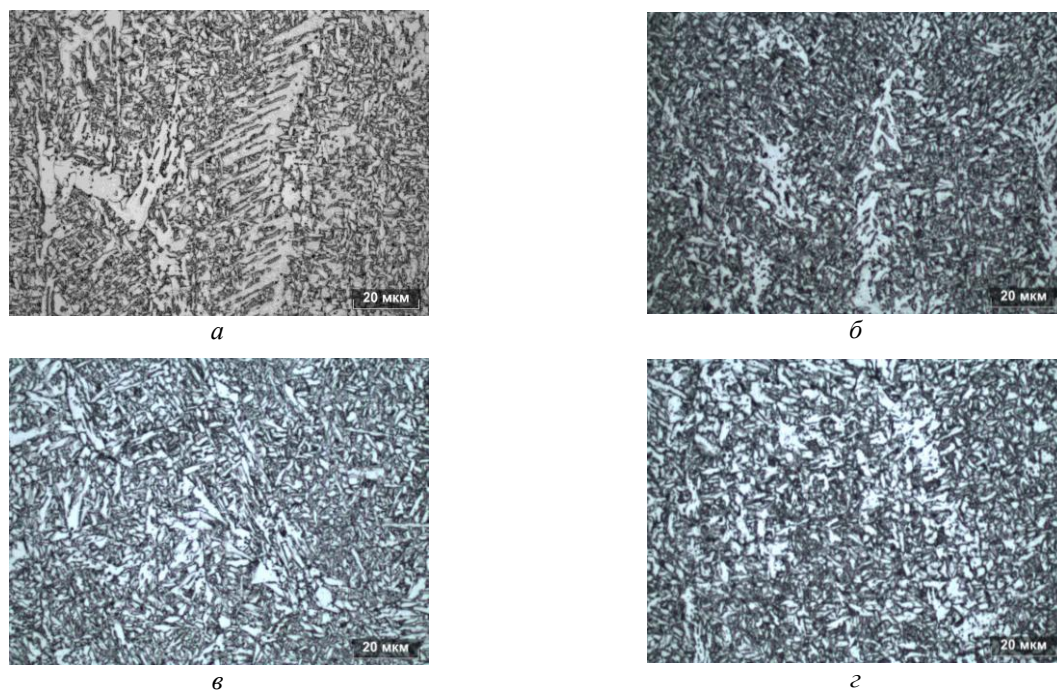


Рис. 4. Микроструктура металла сварных швов, выполненных электродами с различными инокулирующими добавками:
а – 0 %; б – 1,0 % WC; в – 1,0 % VC; г – 1,0 % TiC

Результаты механических испытаний металла сварных швов приведены в табл. 2. Анализ данных показывает, что при добавле-

нии порошков тугоплавких материалов привело к повышению прочностных свойств металла швов.

Таблица 2

Результаты механических испытаний металла сварных швов

№ образца	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Ударная вязкость KCV ⁻⁴⁰ , Дж/см ²	Твердость по Виккерсу HV
1	686–692	575–589	109–115	238–254
2	760–785	680–700	57–77	259–263
3	830–860	730–770	31,5–38	238–263
4	758–773	633–641	39–50	250–277

Временное сопротивление разрыву возросло, в сравнении с базовым образцом, при добавлении 1,0 % WC на 74–93 МПа; при добавлении 1,0 % VC на 144–168 МПа; при добавлении 1,0 % TiC на 72–81 МПа. Предел текучести увеличился при добавлении 1,0 % WC на 105 – 111 МПа; при добавлении 1,0 % VC на 155 – 181 МПа; при добавлении 1,0 % TiC на 52–58 МПа. Твердость по Виккерсу возросла на 9–23 единицы HV, при этом максимальные значения не превышают 300 HV. Наблюдается снижение уровня ударной вязкости. В сравнении с базовым образцом значения KCV⁻⁴⁰ уменьшились в 1,5–2 раза при добавлении порошка 1,0 % WC и в 2,5–3 раза при добавлении 1,0 % порошков VC и TiC.

Выводы

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Каждая из добавок порошков WC, VC, TiC в основное покрытие электродов обеспечила мелкокапельный перенос во время процесса сварки на токе 110А. При добавке 1,0 % порошка WC количество мелкогазовых электродных капель увеличилось на 14,68 %; при добавке 1,0 % порошка VC на 13,97 %; при добавке 1,0 % порошка TiC на 17,56 %.

2. В результате добавок порошков WC, VC, TiC кристаллиты металла сварных швов приняли более равновесное состояние, а максимальная площадь их сечения уменьшилась в 6–8 раз в сравнении с базовым образцом.

3. Добавки тугоплавких материалов в покрытие электродов привели к повышению значений временного сопротивления, предела текучести и твердости по Виккерсу металла сварных швов. При этом наблюдается снижение уровня ударной вязкости в 1,5–3 раза в зависимости от типа порошковой добавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Имитация процессов структурообразования в трубных сталях при контролируемой прокатке с ускоренным охлаждением / М. Ю. Матросов, А. А. Кичкина [и др.] // *Металлург.* – 2007. – № 7. – С. 52–58.
2. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей / Л. А. Ефименко, О. Ю. Елагина [и др.] // *Сварочное производство.* – 2010. – № 5. – С. 5–11.
3. Сварочные электроды для нефтегазового комплекса / И. Н. Зверева, А. Д. Картунов [и др.] // *Сварочное производство.* – 2016. – № 5. – С. 36–38.
4. Особенности структуры и свойства сварных швов трубной стали, выполненных электродами различных марок / И. Н. Зверева, А. Д. Картунов [и др.] // *Сварочное производство.* – 2017. – № 11. – С. 37–40.
5. Инокулирование сварочной ванны низкоуглеродистой стали ультрадисперсными тугоплавкими компонентами / М. А. Шекшеев, М. А. Полякова [и др.] // *Металлург.* – 2022. – № 12. – С. 63–68.
6. Шекшеев, М. А. Формирование структуры наплавленного металла низкоуглеродистой стали при различных технологических воздействиях / М. А. Шекшеев, Е. Н. Ширяева // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова.* – 2021. – Т. 19. – № 1. – С. 42–47.
7. 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.
8. Перспективы применения расщепленного электрода для введения в сварочную ванну модификатора при наплавке сплава на основе Ni₃Al / И. В. Зорин, Ю. Н. Дубцов [и др.] // *Сварка и диагностика.* – 2021. – № 5. – С. 30–34.
9. Шекшеев, М. А. Опыт применения тугоплавких инокулирующих добавок при разработке покрытых электродов для сварки высокопрочных трубных сталей / М. А. Шекшеев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 87–93.
10. Шекшеев, М. А. Исследование влияния тугоплавких инокулирующих добавок на кинетику плавления сварочных покрытых электродов / М. А. Шекшеев // *Сварка и диагностика.* – 2024. – № 2. – С. 24–28.