

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ
WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES**

Обзорная статья

УДК 621.791

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-51-63

**ПРИМЕНЕНИЕ НАНО- И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ
РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ШТУЧНЫМИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ****Щербаков Александр Павлович, Зернин Евгений Александрович,
Петрова Екатерина Дмитриевна, Коняшов Максим Владимирович**

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

* для корреспонденции: shurbakov.aleksandr@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

19 марта 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:ручная дуговая сварка,
штучный электрод,
модификация материала
покрытия, наночастицы,
наноматериалы**Аннотация.**

В современном мире применение нано- и ультрадисперсных материалов в процессах сварки становится все более актуальным. Особый интерес вызывает использование таких материалов при ручной дуговой сварке штучными покрытыми электродами. Эта тема привлекает внимание исследователей и инженеров, поскольку применение новейших технологий может значительно улучшить качество сварочных работ и повысить эффективность процесса. Анализ результатов исследований в области применения нано- и ультрадисперсных материалов при ручной дуговой сварке штучными покрытыми электродами является предметом данной статьи. В рамках работы будут рассмотрены основные методы применения указанных материалов, а также их влияние на характеристики сварного соединения. Представленный обзор поможет лучше понять перспективы использования нано- и ультрадисперсных материалов в сфере ручной дуговой сварки, а также выявить возможности оптимизации процесса для достижения наилучших результатов. В настоящей статье рассматривается введение в применение нано- и ультрадисперсных материалов в сварочном производстве, особенно при ручной дуговой сварке штучными покрытыми электродами. Нано- и ультрадисперсные материалы являются областью инновационных технологий, которые позволяют улучшить качество и эффективность процесса сварки. Их применение в сварочной отрасли имеет большой потенциал для улучшения прочности, устойчивости к коррозии и других характеристик сварных соединений. Исследования показывают, что использование нано- и ультрадисперсных материалов в ручной дуговой сварке может значительно улучшить качество сварных соединений, повысить производительность и снизить количество дефектов. Однако для успешного внедрения этих материалов необходимо учитывать особенности их взаимодействия с покрытыми электродами, а также разрабатывать специальные технологии и методики проведения сварочных работ.

Для цитирования: Щербаков А.П., Зернин Е.А., Петрова Е.Д., Коняшов М.В. Применение нано- и ультрадисперсных материалов при ручной дуговой сварке штучными покрытыми электродами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 51-63. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-51-63, EDN: QDSDYI

Введение. Дуговая сварка используется для получения неразъемного соединения и выполняется вручную плавящими электродами с покрытием. Сварной шов образуется за счет плавления кромок свариваемых деталей и расплавления штучного покрытого электрода. Применение в настоящее время механизированной сварки в промышленных отраслях не умаляет значения ручной дуговой сварки (РДС), так как значительное, если не наибольшее, количество конструкций получают именно этим видом сварки [1].

РДС присуща большая область использования благодаря тому, что часто автоматическая сварка затруднена или невыгодна экономически. Это соединение деталей с большой толщиной, сложные швы по конфигурации, сварка изделий из разных металлических материалов. Сфера применения РДС достаточно широка: строительство, нефтегазовая отрасль, судостроение, котлостроение и др. При выборе способа сварки руководствуются целесообразностью, рядом положений, в том числе технико-экономическими показателями [2].

Преимущества РДС состоят в простоте оборудования и универсальности, недостаток – в низкой производительности из-за малых токов, формировании шва по большей части из металла электрода [3]. При сварке ответственных изделий и несущих конструкций, например, сосудов внутреннего давления, применяют технологию многослойных швов, принудительно охлаждают или подогревают детали и др. Это позволяет улучшить качества и свойства сварного шва за счет уменьшения внутренних напряжений [2].

РДС проводится штучными электродами. При простоте его конструкции покрытый электрод представляет собой достаточно сложную металлургическую и технологическую систему. Соотношение компонентов покрытия должны быть таким, чтобы температура плавления шлака и его вязкость были более низкими, с небольшим интервалом

металлургическими, но имеют особенности – характеризуются кратковременностью, высокой температурой, небольшими объемами реагирующих веществ, высокими темпами взаимодействия между металлом, газом и шлаком. Понятие «штучный электрод» используют, когда противопоставляют плавящийся электрод в виде стержня сварочной проволоке. Покрытый электрод – это электрод плавящийся, с покрытием.

Сварное соединение – это неразъемное соединение, полученное в процессе сварки. Оно включает несколько зон: сварной шов (литой металл шва, где была ванна жидкого металла); зона термического влияния или зона основного металла, которая испытала тепловое воздействие; основной металл, который не испытал действие тепла. Линию раздела шва и зоны термического влияния называют границей сплавления (см. Рис. 1) [3].

Сварной шов – это область сварного соединения, которая образуется после кристаллизации расплавленного металла. Швы, согласно ГОСТ 2.312-72, классифицируют по разным признакам: по конструкции, назначению, длине и положению в пространстве [3]. По структуре зоны сварного соединения отличаются. Структура и свойства сварного шва определяются параметрами процесса сварки и сварочными материалами.

В процессе сварки электрод плавится, его перемещают вдоль и поперек соединения для получения необходимой формы и размера шва. При покрытом электроде плавится стержень и его покрытие. Из покрытия образуются газы и шлак, которые защищают металл от кислорода и азота воздушной среды. Газы препятствуют проникновению воздуха в зону плавления, дополнительно защищая металл. По мере перемещения дуги ванна затвердевает с образованием сварного шва. Жидкий шлак превращается в твердую шлаковую корку [3, 4]. При РДС температура распределена неравномерно. Температура сварочной ванны, передний участок – (2300 – 2500)°С, в хвосте

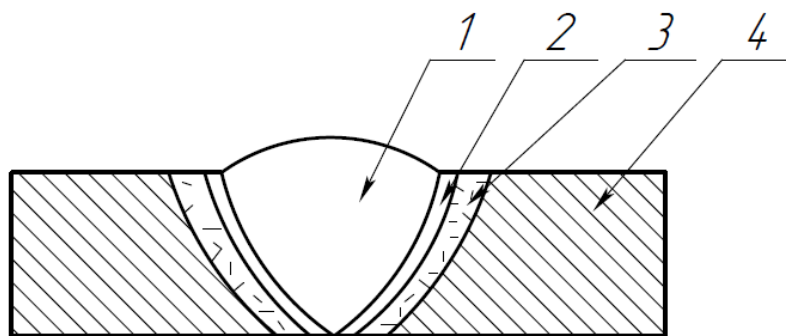


Рис. 1. Зоны сварного соединения:

1 – сварной шов, 2 – граница сплавления, 3 – зона термического влияния, 4 – основной металл

Fig. 1. Areas of the welded joint

1 – weld, 2 – fusion boundary, 3 – thermal influence zone, 4 – base metal

затвердевания. Процессы при сварке являются

сварочной ванны температура близка к

температуре плавления металла. Металл в зоне сварки нагревается от температуры плавления до максимальной, затем идет процесс охлаждения до температуры кристаллизации.

Наплавку используют для повышения антикоррозийных свойств и износостойкости материала деталей, а также для улучшения его прочностных и пластических характеристик. Это один из способов нанесения покрытия с применением технологии сварки. Используют наплавку как при ремонте, так и при изготовлении новых изделий. Способ наплавки и материал для нее определяет качество процесса. В промышленности наиболее часто применяют наплавку (сварку) плавлением. Один из способов – ручная дуговая наплавка [5].

Наплавку используют при ремонте деталей, изношенных при эксплуатации, чтобы восстановить их размеры, а также для увеличения износостойкости поверхностей, испытывающих трение при эксплуатации. Восстановление работоспособности деталей при наплавке достигается нанесением дополнительного слоя металла. Износ деталей может наблюдаться при трении и качении, ударе, абразивном воздействии, коррозии и кавитации. Часто виды износа объединяются. Выбор электродов для наплавки зависит от ряда факторов: вида износа, наплавляемого металла, способа сварки и последующей механической обработки, если она требуется. Возможен предварительный нагрев детали или термообработка, все этапы предусматриваются технологией проведения наплавки.

Марки электродов для наплавки, например, Т-590, Т-620, выбирают в зависимости от твердости металла и назначения. Когда наплавляют поверхность износа изделия, то восстанавливают толщину изношенного слоя и прибавляют (1,0 – 1,5) мм, необходимые для обработки поверхности после проведения наплавки [4].

Наплавку применяют достаточно широко, например, для нанесения специального покрытия на сосуды высокого давления, а также для упрочнения конструкций разного назначения [5].

При наплавке используют стержневые электроды с покрытием. Достоинство наплавки заключается в простоте оборудования и технологии процесса. Недостатки – низкая производительность и нестабильное качество. Проводят наплавку и открытой дугой – без защитной среды, проволокой обычной или порошковой с флюсовой сердцевинкой. Кроме того, порошковая проволока не требует защитного газа и флюса. Наплавка проводится и в среде защитного газа – аргона (плавящимся и неплавящимся электродом) или углекислого газа (плавящийся электрод).

Создание сварочных электродов, качественных и отвечающих современным

требованиям, является достаточно сложным процессом. Это и применяемые материалы, и технология, и культура производства. Качество и надежность электрода определяется качеством обработки компонентов покрытия, однородностью их смеси, ее нанесением на стержень, заключительной стадией обработки готовых электродов. Электроды чувствительны к малейшим нарушениям технологии изготовления и условиям хранения [6].

Классификация покрытых металлических электродов для РДС осуществляется по ГОСТ 9466-75 [34] (по назначению, химсоставу и механическим свойствам наплавленного металла, характеристикам покрытия, параметрам сварки). Изготовление покрытых электродов проводится чаще методом опрессовки, гораздо реже – методом окунания. На поверхность стержня наносят покрытие из смеси компонентов [3, 7].

Покрытие электрода – это смесь разных по функции компонентов [3, 4, 7]: легирующие и связующие, шлакообразующие и газообразующие, раскисляющие, ионизирующие, формовочные. Ионизирующие компоненты обеспечивают устойчивость дуги (вещества с калием, кальцием, натрием, например, мел, гранит, полевой шпат). Газообразующие компоненты – защита дуги и сварочной ванны от воздуха (органика и неорганические вещества, например, крахмал, мука, мрамор, магнезит). Шлакообразующие компоненты нужны для формирования жидкого шлака. Это руды и минералы – гранит, мрамор, полевой шпат, рутил, ильменит, кремнезем. Легирующие компоненты улучшают свойства сварного шва, такие как механические, повышают жаропрочность и коррозионную стойкость, износостойкость: никель, титан, молибден, хром и марганец и др. Раскисляющие компоненты нужны для восстановления удаления оксидов, которые образуются на части расплавленного металла. Связующие компоненты предназначены для связки компонентов в одну массу. Масса должна иметь хорошее сцепление со стержнем электрода и после изготовления быть прочным покрытием. Это часто водные растворы жидкого стекла (натриевого или калиевого). Кроме жидкого стекла (водные растворы силикатов натрия и калия), в качестве связующего применяют желатин, пластмассы [8]. Формовочные компоненты (каолин, слюда и др.) позволяют придать массе пластические свойства.

Покрытие электрода должно быть прочным и выполнять свои функции до тех пор, пока он не использован полностью [3]. Для этого необходимо, чтобы к концу расплавления электрода температура металлического стержня, зависящая от силы тока, была не выше 500°C, а для покрытия с органикой – не более 250°C.

Требования к покрытию электрода [3, 9]:

- хорошая технологичность массы покрытия, которая не создает трудности в процессе изготовления электродов;
- удовлетворяющие санитарным нормам условия производства электродов и их применения в сварке;
- обеспечение стабильности горения дуги;
- равномерное плавление стержня и покрытия;
- легкое отделение шлака от шва после его остывания;
- получение качественного шва при отсутствии дефектов, пор и шлаков;
- получение металла в шве с нужной структурой, химическими и механическими свойствами;
- отсутствие гигроскопичности;
- отсутствие скола при падении электрода;
- сохранение свойств при длительном хранении.

Виды покрытий электродов стандартизованы. В зависимости от типа покрытия они обозначаются буквами [3]. Электроды с кислым покрытием (буква А), с основным покрытием (буква Б), с целлюлозным покрытием (буква Ц), с рутиловым покрытием – буква Р. При наличии в покрытии содержания порошка железа более 20% добавляют букву Ж. Для смешанного покрытия применяют две буквы.

В работе [7] приведены методики расчета для состава электродных покрытий и порошковых проволок.

Ко всем типам электродов предъявляют как общие требования, так и требования в зависимости от назначения. К покрытым электродам дополнительно предъявляют специальные требования, в том числе: проведение сварки в разных положениях в пространстве, шов заданной формы, металл шва должен иметь какие-либо специальные свойства – повышенную твердость или прочность, пластичность или износостойкость, жаростойкость. Чтобы их получить, в состав покрытия и вводят специальные вещества – газообразующие и шлакообразующие, связующие и др. Компоненты покрытия обычно несут несколько функций, поэтому их разделение несколько условно. Состав покрытия подбирают в зависимости от назначения электрода и требуемых характеристик металла сварного шва. Соотношение процентное между компонентами зависит от технологических требований к электроду и определяется экспериментально. Стержни в электродах имеют химический состав, близкий к составу свариваемого материала [7].

Преимущество применения электродов с покрытием (относительно порошковой проволоки, сварке в защитной среде) связано с

более низкой стоимостью оборудования, возможностью работы в труднодоступных местах, при сварке в полевых условиях [10].

К хранению электродов предъявляются требования по герметичности упаковки и температуре хранения, так как при поглощении покрытием влаги из воздуха, отсыревание электроды ухудшают свои свойства, что отражается на качестве сварки [3].

Покрытые электроды для РДС, применяемые при сварке и наплавке разных сталей, стандартизованы.

Классификация осуществляется по многочисленным признакам (назначение, типы, марки, покрытие и его толщина, величина тока, пространственные положения). Электродные покрытия по-разному защищают ванну, у каких-то преобладает газовая защита, у других – шлаковая [8].

Согласно нормативной документации, в настоящее время рассматривают электроды в зависимости от отношения его диаметра с покрытием D (см. Рис. 1) к диаметру стержня d [9]. Это тонкое покрытие, среднее, толстое, особо толстое. Электроды с тонким покрытием дают меньшую защиту сварочной ванны, чем с толстым покрытием, образуется мало газов и шлаков. Последние применяют для ответственных соединений, для создания высоких механических свойств соединения [8]. Использование толстопокрытых электродов позволяет частично решить главную задачу сварки – получение сварного соединения, близкого по прочности к основному металлу, а также обеспечить возможность регулирования состава наплавленного материала [11].

Процесс повышения качества сварного соединения и повышения его эксплуатационных характеристик идет постоянно. При этом существуют два основных направления исследований – изменения технологического процесса и изменение состава материала покрытия электродов путем изменения его рецептуры или введения различных добавок. В рамках данной статьи представлен обзор работ по модифицированию состава материала покрытия электродов наночастицами различных материалов. В качестве объекта исследований рассмотрим покрытие на основе синтетического рутила.

Рутил – природный минерал, состоящий в основном из диоксида титана. Возможно наличие в нем значительного количества примесей – железа, ниобия, тантала. Известны месторождения в Австралии, Канаде, Бразилии, Республике Сьерра-Леоне. Плотность природного рутила составляет $(4,18 \div 4,28)$ г/см³. Концентрат рутила содержит $(90 \div 95)\%$ TiO₂. Учитывая не очень широкую сеть месторождений рутила, технологии его получения, производство рутилового концентрата осуществляется только в странах с месторождениями данного минерала.

Наибольшее распространение получили технологии синтеза рутила, связанные с переработкой другого титаносодержащего минерала – ильменита или титаната железа FeOTiO_2 . Плотность ильменита лежит в пределах от 4,56 до 5,21 г/см³. В ильменитовых концентратах содержится (52÷65)% TiO_2 .

При получении диоксида титана из ильменита используются процесс Бехера, а также хлоридный и сульфатный процессы, причем последние два имеют промышленное применение. Основная задача этих процессов состоит в удалении оксида железа из породы [12].

Основная часть. При сварке плавлением кристаллическое строение металла сварного шва является наиболее важным фактором для качества и механических свойств сварного соединения [13]. Кристаллическое строение определяется условиями во время перехода материала сварочной ванны из расплава в твердое состояние. Кроме центров кристаллизации расплавленного металла, существуют и центры не самопроизвольной кристаллизации (зародыши кристаллизации, зерна нового металла на границе сплавления) [13, 14]. Это используют для проведения модифицирования – измельчения кристаллов при затвердевании.

Модифицирование является активным регулированием кристаллизации. Его проводят разными способами. Можно использовать введение в сварочную ванну нанопорошков металлических и неметаллических соединений [13]. Модификаторы могут вводиться или синтезироваться в расплаве из его компонентов [14].

Введение нанопорошков в сварочную ванну при проведении дуговой сварки с плавящимся электродом позволяет модифицировать наплавленный металл, измельчая его структуру,

более равномерно распределить примеси, улучшить механические свойства шва [6]. В данном случае возможен контроль за количеством порошка, его концентрацией, значит, и за количеством центров кристаллизации [11, 14]. Размер частиц для центров кристаллизации должен быть в интервале (10÷500) нм. Наиболее используемые соединения, нанопорошки – это оксиды, карбиды и нитриды [14].

Модифицирование металла шва наночастицами, которые выступают в расплавленном металле центрами кристаллизации, достижимо, что подтверждается большим количеством работ [14, 15 и др.], где отмечается измельчение структуры, увеличение ударной вязкости и пластичности. Количество наночастиц минимально, это сотые доли процента от всей массы расплава [14].

Наиболее важная задача – это введение наночастиц в расплав сварочной ванны [14]. Их вводят в состав электродов, в состав порошковых проволок, делают прессовочные брикеты и закладывают в разделку перед сваркой, подают совместно с защитным газом при дуговой сварке плавящимся электродом. Большинство исследователей склонны вводить наночастицы через электроды, хотя многие указывают на возможность химического взаимодействия частиц в ванне и изменение морфологического состава. Но эффект модифицирования отмечают все.

Введение нанопорошка для улучшения механических свойств сварного соединения осуществляется следующими способами [14, 15]:

- через порошковую проволоку;
- через электродное покрытие;
- с использованием стержней;
- подача (дозированно, через

Таблица 1. Механические характеристики металла шва [19]

Table 1. Mechanical characteristics of the weld metal

Металл шва	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость KCV, кДж/м ²
Без нанопорошка	542	357	21	61	4,6
С нанопорошком TiO_2	647	514	18	54	9,3

Таблица 2. Теплофизические характеристики металла сварного шва [19]

Table 2. Thermophysical characteristics of the weld metal

Материал	Температура плавления, °C	Температура кристаллизации, °C	Интервал кристаллизации, °C
Сталь (без добавки)	1543,4	1499,5	43,9
Добавка 0,5 % Al_2O_3	1541,9	1518,6	23,3
Добавка 0,5 % TiO_2	1535,8	1524,0	11,8

специальное устройство) через защитный газ;

- нанесение на поверхность сварки.

Так, например, статья [15] посвящена исследованию сварных швов и наплавленных слоев металла, имеющих в составе нанопорошки. В ходе исследования проводилась дуговая ВИГ-сварка, сварка вольфрамовым электродом (неплавящимся) в защитной среде аргона. Работали с алюминиевым сплавом AMg6 и сталью S236JR (углеродистая конструкционная). Сваривали, используя стандартную добавочную проволоку (диаметром 1,6 мм) и модифицированную. Модифицирование проволоки проводилось нанопорошком TiCN для алюминиевого сплава и TiN для стали. Было получено измельчение микроструктуры сварного шва алюминиевого сплава на 51%. Для наплавленного слоя стали тоже отмечено измельчение. Ввод нанопорошков позволил увеличить микротвердость HV: для сварного шва на алюминиевом сплаве – на 22%, для наплавленного слоя из стали – на 41%.

Показана возможность применения нанопорошков для модифицирования металла шва и при сварке под флюсом, и автоматической, для повышения ударной вязкости [14]. Сварка проводилась с использованием порошковых проволок. Рассматривались порошки нитрида титана, карбида вольфрама и оксида алюминия. Автор [14] на основании проведенного (теоретического и экспериментального) исследования считает перспективным использование порошковых проволок для внесения наночастиц в хвостовую часть ванны. Для качественного шва необходимо обеспечить количество порошковой присадочной проволоки, подаваемой в хвостовую часть, в наплавленном металле не больше 50%. Применение указанных порошков в составе электродной порошковой проволоки при сварке под флюсом нецелесообразно. Происходит значительный перегрев наночастиц, который приводит к их полной диссоциации или окислению, падает ударная вязкость шва. При использовании нитрида титана и оксида алюминия при введении через порошковую проволоку в хвостовую часть происходило образование пор (частичная или полная диссоциация с образованием газа). Но эффект модифицирования структуры присутствовал при частичном сохранении наночастиц. Наночастицы чувствительны к температуре. Если они в электроде, то они перегреваются. Автор работы [14, 45] считает, что перспективно вводить их в качестве присадочной проволоки, в составе которой (в шихте) есть нанопорошок. Тогда их можно подавать в хвостовую часть, в более низкую температуру. Важно установить механизм действия наночастиц не только на

структуру, но и на последующие эксплуатационные свойства сварного соединения [14].

В статьях [6, 39, 40] делается положительный вывод о применении нанопорошков для измельчения структуры наплавленного слоя при РДС. Предпочтительным является использование их в тонком слое покрытия штучных электродов, что повышает эффективность РДС. Автор анализирует ряд работ. В частности, он упоминает работу, в которой модифицирование структуры наплавленного слоя проводили наноструктурированным карбидом вольфрама. Для переноса частиц служил никель. Получая никелекарбидные гранулы, смешивали их с жидким стеклом (калий-натриевым) и покрывали тонким слоем защитное покрытие электрода. Использовали электроды основного и рутилового типа. В результате при использовании электродов рутиловых снизилось количество неметаллических включений на 20%, и они распределились более равномерно. Анализируя структуру, полученную рутиловыми электродами, сделали вывод, что она позволит повысить пластические свойства, надежность работы при низких температурах и противостоять нагружению изделия.

В статье [6] также упоминается другая работа, посвященная повышению износостойкости наплавленного слоя, которая добивалась введением в покрытие электрода из стального стержня нанопорошка карбонитрида титана. В результате реализовано повышение пластичности обмазки. Твердость наплавленного слоя возросла до HRC 66, повысилась длительная износостойкость отремонтированных деталей. Коэффициент износостойкости значительно выше (на 57%) при работе электродами с нанопорошком в покрытии. Не было обнаружено в полученных слоях ни трещин, ни каких-либо расслоений. В [6] указывается, что в ряде исследований представлена технология введения нанопорошка оксида титана.

Следует добиваться эффективности при сварке и наплавке, используя разные нанопорошки тугоплавких соединений [11].

Представлены способы введения наночастиц в сварочную ванну в работах [13, 16]. Это:

- использование порошковой проволоки, в составе которой никелекарбидные гранулы;
- использование электрода с покрытием, в котором никелекарбидные гранулы смешаны с жидким стеклом (калий-натриевым);
- использование стержней из проволоки, на которые наносят покрытие с никелекарбидными гранулами.

Во всех случаях отмечается модифицирование металла, но наиболее

эффективен случай электрода с тонким покрытием.

Интересна работа по использованию бария как модификатора, вводимого в покрытие электродов при сварке нефтегазопроводов, что позволяет повысить трещиностойкость сварного соединения при эксплуатации, даже в коррозионно-агрессивной среде. Зафиксировано снижение скорости коррозии сварного соединения [17, 41, 42, 43].

Возможна и дозированная подача нанопорошков в ванну с использованием защитного газа (аргона). Для этого авторами [13, 44] была разработана конструкция специального устройства.

Проводилось исследование микроструктуры и коррозионной стойкости сварного соединения с разными образцами: 1) наплавка стали 12Х18Р10Т проволокой 12Х18Р9Т в воздухе, 2) наплавка проволокой в среде защитного газа, 3) с введением нанопорошка молибдена и вольфрама, в разной концентрации, в защитный газ, и нановолокон оксигидроксида алюминия. В ходе проведенного исследования установили, что концентрация нанопорошков влияет на структуру наплавленного металла, более равновесная структура – при концентрации порошка 20 мг/метр шва. Коррозионная стойкость зависит от вида нанопорошка, наилучшая – при использовании порошков молибдена и вольфрама [18].

При модифицировании нанооксидами их вводили в сварочную ванну как лигатуру после прессования и спекания в смеси порошка железа (размер 40 мкм) и нанопорошка (27÷41) нм в определенном соотношении. Был взят

Большая доля сварочных работ выполняется РДС, и во многом ее качество зависит от квалификации сварщика. Кроме ее повышения, можно улучшить качество процесса и другим путем – применяя современные инверторные источники питания, которые рассмотрены в статьях [21, 37, 38].

Большое внимание вопросам использования наноматериалов в процессах сварки уделяется в зарубежной научно-технической литературе.

Так, для изготовления ответственных сварных соединений, выполняемых в условиях низких температур, в статьях [22, 26, 27] предлагается использовать ультрадисперсный порошок сложного состава (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Ni), который вводится в состав покрытия электрода, используемого для ручной дуговой

сварки нанопорошок алюминия и титана. Сварка проводилась проволокой в смеси аргона и углекислого газа, лигатура выполняла роль расходного электрода, размещенного между кромками стыка деталей перед сваркой. Анализировались включения шва. При вводе порошков изменились размеры включений, состав и их распределение. Сделан вывод о том, что улучшение структуры и свойств зависит от введения лишь небольшого количества нанопорошка – не более 0, 5%. При введении нанопорошка оксида алюминия 0,5% получали мелкозернистую структуру, с микротвердостью по Виккерсу в интервале (264÷304). При введении нанопорошка оксида титана 0,5% получали структуру с более меньшим количеством хрупких структурных составляющих, с микротвердостью по Виккерсу в интервале (230÷250). Шов с такой структурой имеет высокую прочность и пластичность. В Таблице 1 приведены механические характеристики металла сварного шва проволокой 09Г2С стали 18ГСХНФ без применения нанопорошка и с ним [19].

Материалы с наноструктурой имеют более низкую температуру плавления. В ходе исследования было замечено это снижение. Величина снижения зависела от количества введенного нанопорошка (рассматривали введение 0,5% и 1%). Величину снижения можно оценить по Таблице 2. Кроме того, отмечено повышение температуры кристаллизации, уменьшение температурного интервала кристаллизации (см. Таблицу 2).

сварки металлов. Введение этого порошка улучшает стабильность процесса плавления и переноса капель электрода в сварочную ванну и повышает эксплуатационные характеристики свариваемого металла – на 10% повышается предел прочности, на 43% относительное удлинение и на 20% ударная вязкость.

В статьях [23, 28, 29] описан новый электрод для ручной дуговой сварки металлов с использованием нанокомпозитного покрытия на стержневой проволоке перед нанесением флюса. Поскольку скорость дымообразования (FFR) и концентрация шестивалентного хрома Cr (VI) в сварочном дыме находятся в зависимости друг от друга, была предпринята попытка использовать параллельный метод для снижения того и другого. В качестве стабилизаторов дуги

Таблица 3. Механические свойства металла сварного шва
Table 3. Mechanical properties of the weld metal

Электроды	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость (20°C), Дж/см ²
Серийные	460	25	159
Экспериментальные	487	27	192

для снижения скорости образования дыма были использованы нанопокрyтия Al_2O_3 и TiO_2 , а в качестве третичного материала был нанесен химически активный оксид ZnO для снижения концентрации шестивалентного хрома в сварочном дыме. Совместное использование всех трех материалов позволило эффективно снизить как скорость образования дыма, так и концентрацию Cr (VI) в сварочном дыме.

В статьях [24, 30, 31, 32] исследована структура металла сварного шва после сварки порошковой проволокой с добавлением 0,3% чешуйчатых наночастиц диоксида циркония. Сварной шов состоит из игольчатого феррита. Это может свидетельствовать о том, что диссоциация диоксида циркония в электрической дуге не является препятствием для модифицирующего эффекта, который проявляется как во взаимодействии циркония с кислородом, так и в поверхностной активности циркония в затвердевающем расплаве на основе железа. Избыток кислорода может привести к образованию в металле шва отдельных пор диаметром менее 1 мкм, которые в незначительной степени влияют на механические свойства сварного соединения. Сварное соединение с 0,3% наночастиц диоксида циркония обладает высокими механическими свойствами благодаря образованию игольчатого феррита в металле шва при электродуговой сварке. С использованием наночастиц диоксида циркония были сформированы сварные соединения из стали марки 09G2S, имеющие предел прочности при растяжении 750 МПа при относительном удлинении 19%.

Целью исследования, изложенных в статьях [25, 33, 35, 36] было изучение влияния нанодисперсных частиц тугоплавких металлов в расплавленном металле сварочной ванны на кинетику кристаллизации аустенита в металлических соединениях высокопрочной низколегированной стали 14ХНДЦ. В исследованиях были использованы нанопорошковые частицы различных тугоплавких соединений – оксидов, нитридов и карбидов (TiC , TiN , SiC , VC , NbC , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2). Исследования показали эффективность наноксидов титана TiO_2 и циркония ZrO_2 , которые обеспечивают высокие значения механических свойств сварного металла за счет формирования сложных игольчатых бейнитных структур. Карбиды TiC , SiC и нитриды TiN , NbN , снижающие температуру начала бейнитной трансформации, приводят к образованию бейнитно-мартенситных структур, которые обладают пониженными вязкими и пластическими свойствами. Соединения VN , VC и ZrC легко растворяются в расплавленном металле сварочной ванны и поэтому малоэффективны в качестве

модификаторов структуры металла сварных швов.

Заключение. Представленные сведения показывают эффективность использования наночастиц различных материалов при проведении ручной дуговой сварки. В связи с этим дальнейшие исследования необходимо направить на решение следующих задач:

1. Разработать научно-обоснованные технологические решения применения синтетического рутила для изготовления покрытых штучных электродов для дуговой сварки и наплавки.

2. Определить влияние концентрации нанопорошков на реологические свойства покрытия электродов.

3. Определить влияние состава покрытия штучных электродов, содержащих нанопорошки, на стабильность процесса сварки и наплавки.

Исследовать макро- и микроструктуру сварных соединений и наплавленных слоев, полученных с применением штучных электродов с покрытием на основе синтетического рутила и содержащих нанопорошки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. И., Ильященко Д. П., Павлов Н. В. Введение в основы сварки. Томск : ТПУ, 2011. 317 с.
2. Руководящий Документ РД 34,15.132-96. Сварка и контроль качества сварных соединений металлоконструкций зданий при сооружении промышленных объектов. М.: НПО ОБТ, 2001. 118 с.
3. Овчинников В. В. Технология ручной дуговой и плазменной сварки и резки металлов // 5-е изд., стер. М. : Академия, 2016. 240 с.
4. Вашуков Ю. А. Ручная дуговая сварка штучными электродами. Самара : Издательство Самарского университета, 2019. 54 с.
5. Крампит Н. Ю., Габитов Э. К. Развития способов дуговой наплавки // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи. В 2-х томах. Том 1. Томск : ТПУ, 2016. С. 83–84.
6. Зернин Е. А., Александрова Ю. С., Зубков М. С. Применение наноматериалов при ручной дуговой сварке покрытыми электродами // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи. В 2-х томах. Том 1. Томск : ТПУ, 2016. С. 116–118.
7. Табатчиков А. С., Коробов Ю. С. Разработка технологии изготовления электродов и порошковых проволок для сварки и родственных процессов / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю. С. Коробова. Екатеринбург : УрГУ, 2023. 112 с.

8. Каховский Н. И., Фартушный В. Г., Ющенко К. А. Электродуговая сварка сталей: справочник. Киев : Наукова Думка, 1975. 480 с.
9. Федоров А. Л. Электроды для сварки плавлением. Тольятти : ТГУ, 2019. 92 с.
10. Макаров С. В., Сапожков С. Б. Ремонт горно-шахтного оборудования электродами, изготовленными с применением нанопорошка сложного состава (Zr, Si, Ni, Ti, Cr) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск №7. С. 287–292.
11. Тархов Н. А. Изготовление электродов для дуговой электросварки. М. : Машгиз, 1944. 123 с.
12. Лебедев В. А., Рогожников Д. А. Металлургия титана. Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2015. 194 с.
13. Зернин Е. А., Кузнецов М. А. Способы модифицирования наплавленного металла наноструктурированными порошками для увеличения механических свойств сварных соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14858> (дата обращения: 20.11.2024).
14. Линник А. А. Разработка технологических приемов модифицирования металла шва наноразмерными частицами с применением порошковых проволок при сварке под флюсом: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. : 2017. 18 с.
15. Ташев П., Алексиев Н., Манолов В., Черепанов А. Наномодифицирование в процессах сварки и наплавки // Космические аппараты и технологии. 2017. №1 (19). С. 16–21.
16. Соколов Г. Н., Лысак И. В., Трошков А. С., Зорин И. В. [и др.]. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами // Физика и химия обработки материалов. 2009. №6. С. 41–47.
17. Дерябин А. А., Цепелев В. С., Конашков В. В., Берестов Е. Ю., Могильный В. В. Кинетическая вязкость рельсовой стали, модифицированной сплавами Fe-Si-Ca и Fe-Si-Ca-Ba // Известие высших учебных заведений. Черная металлургия. 2008. №4. С. 3–6.
18. Кузнецов М. А., Карцев Д. С., Журавков С. П., Баранникова С. А. Структурообразование и коррозионная стойкость сварных соединений из стали аустенитного класса // Технологии и материалы. 2015. №1. С. 18–24.
19. Кузнецов В. Д., Степанов Д. В. Структура и свойства металла сварного шва, модифицированного наноксидами // Автоматическая сварка. 2015. № 11 (747). С. 19–24.
20. Карцев Д. С., Зернин Е. А. Применение порошковых проволок с добавлением наноразмерных частиц тугоплавких соединений при сварке и наплавке // Инновационные технологии в машиностроении. Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. Томск : ТПУ, 2016. С. 53–59.
21. Сас А. В., Островский М. А., Капустин О. Е. Контроль и управление параметрами режима ручной дуговой сварки // Территория нефтегаз. 2014. №8. С. 83–85.
22. Il'yaschenko D. P., Chinakhov D. A., Makarov S. V. [et al.] Effect of ultra-disperse powder in electrode coating on properties of welds in MMA welding // Engineering Solid Mechanics. 2020. №8. Pp. 41–48.
23. R V. B., Paramashivan S. S., Kanta S. K., Albert S. K., Chakraborty G. Cr6+ reduction in welding fumes by nano composite coatings on stainless steel manual metal arc welding electrodes // Process Safety and Environment Protection. 2018. DOI: 10.1016/j.psep.2018.01.003.
24. Finkel'shtein A. B., Kartashev V. V., Fominykh M. V., Denisova E. I., Berezovskii A. V. Modifying Effect of Zirconia Nanoparticles during Electric Arc Welding // Russian Metallurgy (Metally). 2018. № 8. Pp. 783–786. DOI: 10.1134/S0036029518080050.
25. Kostin V. A., Grigorenko G. I., Zukov V. V. Modification the weld metal structure of hsla steels by refractory nanoparticles. 2016. № 89 (2). Pp. 93–98.
26. Bansal R. K., Kumar A. Advances in Nano-Materials and Their Applications in Welding. Journal of Manufacturing Processes. 2022. № 76. Pp. 1503–1521.
27. Kovalchuk S. N., Leontyev V. A. Performance Characteristics of Ultra-Dispersed Coatings in Electric Arc Welding // Welding Journal. 2021. № 100(2). Pp. 45–52.
28. Campbell J. (2019). Advanced Welding Processes. London : Springer, 2019.
29. Alavi A., Fathi K. (2020). Role of Nano-Coatings in the Improvement of Arc Welding Performance // Materials Research Express. 2020. № 7(6). 065906.
30. Kurbanov M. K., Talipov A. A. Materials Science Innovations in Welding Technology. International Journal of Welding and Joining. 2023. № 54(1). Pp. 1–10.
31. Алешин Н. П., Васильев Э. Г., Яковлев А. П. Контроль качества сварки : учеб. пособие для вузов. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 368 с.
32. Беспалов В. И. [и др.]. Сварочные материалы : справ. Пособие. Москва : Машиностроение, 1993. 256 с.
33. Гладковский В. А. Сварка и свариваемые материалы. Справочник. В 3-х томах. Т. 1. Материалы. Москва : Металлургия, 1991. 528 с.
34. ГОСТ 9466-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация. Москва : Стандартинформ, 2007. 11 с.
35. Ерофеев В. Т., Тихонов А. В.

Материаловедение : учебник. Москва : ИНФРА-М, 2018. 368 с.

36. Кашенко А. Д., Белоус В. И. Технология и оборудование сварки плавлением : учеб. Пособие. Москва : Академия, 2010. 256 с.

37. Лысак В. И., Пашкевич Т. В. Технология дуговой сварки и резки : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 4-е изд., стер. Москва : Академия, 2018. 272 с.

38. Маслов Б. Г., Васильев Д. Г. Применение ультрадисперсных порошков в сварочном производстве // Сварочное производство. 2005. № 1. С. 32–35.

39. Николаев Г. А. Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. Москва : Машиностроение, 1978. Т. 1. 502 с.

40. Патон Б. Е. Перспективы развития

сварочного производства // Автоматическая сварка. 2003. № 1. С. 3–7.

41. Потапов Н. Н. Сварка в защитных газах : учеб. пособие для нач. проф. образования. 6-е изд., стер. Москва : Академия, 2016. 256 с.

42. Сварка и свариваемые материалы : справочник : в 3 т. / под ред. К. В. Любавского. Москва : Машиностроение, 1991.

43. Степин П. А. Сопротивление материалов : учебник для вузов. Москва : Интеграл-Пресс, 2002. 320 с.

44. Чернышов Г. Г. Сварочные работы. Электрогазовая сварка : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 12-е изд., стер. Москва : Академия, 2017. 240 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Щербаков Александр Павлович, заведующий лабораторией, старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-7751>, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru

Зернин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9176-0720>, e-mail: yuti_sp@bk.ru

Петрова Екатерина Дмитриевна, ассистент кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2302-8359>, e-mail: petrowa.ket@yandex.ru

Коняшов Максим Владимирович, лаборант кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский гос-ударственный морской технический университет (190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3365-079X>, e-mail: conachmasim@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Щербаков Александр Павлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, написание текста.

Зернин Евгений Александрович – научный менеджмент, концептуализация исследования.

Петрова Екатерина Дмитриевна – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы.

Коняшов Максим Владимирович – сбор и анализ данных, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Review article

THE USE OF NANO- AND ULTRAFINE MATERIALS IN MANUAL ARC WELDING WITH PIECE-COATED ELECTRODES

Alexander P. Scherbakov, Evgenii A. Zernin,
Ekaterina D. Petrova, Maksim V. Konyashov

Saint-Petersburg State Marine Technical University

* for correspondence: shurbakov.aleksandr@yandex.ru

**Article info**

Received:

19 March 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: manual arc welding,
piece electrode, modification of
coating material, nanoparticles.

Abstract.

In the modern world, the use of nano- and ultrafine materials in welding processes is becoming more and more relevant. Of particular interest is the use of such materials in manual arc welding with single coated electrodes. This topic attracts the attention of researchers and engineers, since the use of the latest technologies can significantly improve the quality of welding and increase the efficiency of the process. Analysis of research results in the field of application of nano- and ultrafine materials in manual arc welding with single coated electrodes is the subject of this article. Within the framework of the work, the main methods of using these materials will be considered, as well as their impact on the characteristics of the welded joint. The presented review will help to better understand the prospects for the use of nano- and ul-traditionally dispersed materials in the field of manual arc welding, as well as to identify opportunities for optimizing the process for the best results. This article discusses the introduction to the use of nano- and ultrafine materials in production, especially in manual arc welding with single coated electrodes. Nano- and ultra-dispersed materials are an area of innovative technologies that improve the quality and efficiency of the welding process. Their application in the welding industry has great potential for improving the strength, corrosion resistance and other characteristics of welded joints. Studies show that the use of nano- and ultrafine materials in manual arc welding can significantly improve the quality of welded joints, increase productivity and reduce the number of defects. However, for successful implementation of these materials, it is necessary to take into account the peculiarities of their interaction with coated electrodes, as well as to develop special technologies and methods for welding.

For citation: Scherbakov A.P., Zernin E.A., Petrova E.D., Konyashov M.V. The use of nano- and ultrafine materials in manual arc welding with piece-coated electrodes. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):51-63. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-51-63, EDN: QDSDYI

REFERENCES

1. Vasil'ev V.I., Il'yashchenko D.P., Pavlov N.V. Vvedenie v osnovy svarki [Tekst] Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta; 2011. 317 s.
2. Rukovodyashchij Dokument RD 34,15.132-96. Svarka i kontrol' kachestva svarnyh soedinenij metallokonstrukcij zdaniy pri sooruzhenii promyshlennyh ob'ektov. M.: NPO OBT, 2001. 118 s.
3. Ovchinnikov V.V. Tekhnologiya ruchnoj dugovoj i plazmennoj svarki i rezki metallov. 5-e izd., ster. M.: Akademiya; 2016. 240 s.
4. Vashukov Yu.A. Ruchnaya dugovaya svarka shtuchnymi elektrodami. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo universiteta; 2019. 54 s.
5. Krampit N.Yu., Gabitov E.K. Razvitiya sposobov dugovoj naplavki. *Progressivnye tekhnologii i ekonomika v mashinostroenii. Sbornik trudov VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii dlya studentov i uchashchejsya molodezhi*. V 2-h tomah. Tom 1. Tomsk: TPU; 2016. S. 83–84.
6. Zernin E.A., Aleksandrova Yu.S., Zubkov M.S. Primenenie nanomaterialov pri ruchnoj dugovoj svarke pokrytymi elektrodami. *Progressivnye tekhnologii i ekonomika v mashinostroenii. Sbornik trudov VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii dlya studentov i uchashchejsya molodezhi*. V 2-h tomah. Tom 1. Tomsk: TPU; 2016. S. 116–118.
7. Tabatchikov A.S., Korobov Yu.S. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya elektrodov i poroshkovyh provolok dlya svarki i rodstvennyh processov / Pod obshch. red. d-ra tekhn. nauk, prof. Yu. S. Korobova. Ekaterinburg: UrGU; 2023. 112 s.

8. Kahovskij N.I., Fartushnyj V.G., Yushchenko K.A. Elektrodogovaya svarka stalej: spravochnik. Kiev: Naukova Dumka; 1975. 480 s.
9. Fedorov A.L. Elektrody dlya svarki plavlennymi. Tolyatti: TGU; 2019. 92 s.
10. Makarov S.V., Sapozhkov S.B. Remont gornoshahtnogo oborudovaniya elektrodami, izgotovlennymi s primeneniem nanoporoshka slozhnogo sostava (Zr, Si, Ni, Ti, Cr). *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2012; 7:287–292.
11. Tarhov N.A. Izgotovlenie elektrodov dlya dugovoj elektrosvarki. M.: Mashgiz; 1944. 123 s.
12. Lebedev V.A., Rogozhnikov D.A. Metallurgiya titana. Ekaterinburg: UMC UPI; 2015. 194 s.
13. Zernin E.A., Kuznecov M.A. Sposoby modifizirovaniya naplavlennogo metalla nanostrukturirovannymi poroshkami dlya uvelicheniya mehanicheskikh svojstv svarnyh soedinenij. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14858> (data obrasheniya: 20.11.2024).
14. Linnik A.A. Razrabotka tehnologicheskikh priemov modifizirovaniya metalla shva nanorazmernymi chastitsami s primeneniem poroshkovykh provolok pri svarke pod flyusom: Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskikh nauk. M., 2017. 18 s.
15. Tashev P., Aleksiev N., Manolov V., Cherepanov A. Nanomodifizirovanie v processah svarki i naplavki. *Kosmicheskie apparaty i tehnologii*. 2017; 1(19):16–21.
16. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V. [i dr.]. Modifizirovanie struktury naplavlennogo metalla nanodispersnymi karbidami. *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2009; 6:41–47.
17. Deryabin A.A., Cepelev V.S., Konashkov V.V., Berestov E.Yu., Mogilnyj V.V. Kineticheskaya vyazkost relsovoj stali, modifizirovannoj splavami Fe-Si-Ca i Fe-Si-Ca-Ba. *Izvestie vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2008; 4:3–6.
18. Kuznecov M.A., Karcev D.S., Zhuravkov S.P., Barannikova S.A. Strukturoobrazovanie i korrozionnaya stojkost svarnyh soedinenij iz stali austenitnogo klassa. *Tehnologii i materialy*. 2015; 1:18–24.
19. Kuznecov V.D., Stepanov D.V. Struktura i svojstva metalla svarnogo shva, modifizirovannogo nanooksidami. *Avtomaticheskaya svarka*. 2015; 11(747):19–24.
20. Karcev D.S., Zernin E.A. Primenenie poroshkovykh provolok s dobavleniem nanorazmernykh chastic tugoplavkikh soedinenij pri svarke i naplavke. *Innovacionnye tehnologii v mashinostroenii. Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Tomsk: TPU; 2016. S. 53–59.
21. Sas A.V., Ostrovskij M.A., Kapustin O.E. Kontrol i upravlenie parametrami rezhima ruchnoj dugovoj svarki. *Territoriya neftegaz*. 2014; 8:83–85.
22. Il'jaschenko D.P., Chinakhov D.A., Makarov S.V. [et al.] Effect of ultra-disperse powder in electrode coating on properties of welds in MMA welding. *Engineering Solid Mechanics*. 2020; 8:41–48.
23. R. V.B., Paramashivan S.S., Kanta S.K., Albert S.K., Chakraborty G. Cr6+ reduction in welding fumes by nano composite coatings on stainless steel manual metal arc welding electrodes. *Process Safety and Environment Protection*. 2018. DOI: 10.1016/j.psep.2018.01.003.
24. Finkel'shtein A.B., Kartashev V.V., Fominykh M.V., Denisova E.I., Berezovskii A.V. Modifying Effect of Zirconia Nanoparticles during Electric Arc Welding. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018; 8:783–786. DOI: 10.1134/S0036029518080050.
25. Kostin V.A., Grigorenko G.I., Zukov V.V. Modification the weld metal structure of hsla steels by refractory nanoparticles. 2016; 8(2):93–98.
26. Bansal R.K., Kumar A. Advances in Nano-Materials and Their Applications in Welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022; 76:1503–1521.
27. Kovalchuk S.N., Leontyev V.A. Performance Characteristics of Ultra-Dispersed Coatings in Electric Arc Welding. *Welding Journal*. 2021; 100(2):45–52.
28. Campbell, J. *Advanced Welding Processes*. London: Springer; 2019.
29. Alavi A., Fathi K. Role of Nano-Coatings in the Improvement of Arc Welding Performance. *Materials Research Express*. 2020; 7(6):065906.
30. Kurbanov M.K., Talipov A.A. Materials Science Innovations in Welding Technology. *International Journal of Welding and Joining*. 2023; 54(1):1–10.
31. Aleshin N.P., Vasiliev E.G., Yakovlev A.P. Welding quality control: study. allowance for universities. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2005. 368 p.
32. Bespalov V.I. [et al.]. Welding materials: ref. allowance. Moscow: Mechanical Engineering, 1993. - 256 s.
33. Gladkovsky V.A. Welding and welded materials. Handbook. In 3 volumes. Vol. 1. Materials. Moscow: Metallurgy; 1991. 528 p.
34. GOST 9466-75. Coated metal electrodes for manual arc welding of steels and surfacing. Classification. Moscow: Standartinform; 2007. 11 s.
35. Erofeev V.T., Tikhonov A.V. Materials science: textbook. Moscow: INFRA-M; 2018. 368 p.
36. Kashchenko A.D., Belous V.I. Fusion welding technology and equipment: tutorial. Manual. Moscow: Academy; 2010. 256 s.
37. Lysak V.I., Pashkevich T.V. Arc welding and cutting technology: a textbook for students. institutions of environments. Prof. education. 4th ed., Erased. Moscow: Academy; 2018. 272 p.
38. Maslov B.G., Vasiliev D.G. The use of ultrafine powders in welding production. *Welding production*. 2005; 1:32–35.
39. Nikolaev G.A. Welding in mechanical engineering: a reference book of 4 tons. Moscow: Mechanical Engineering; 1978. 502 s.

40. Paton B.E. Prospects for the development of welding production. *Automatic welding*. 2003; 1:3–7.
41. Potapov N.N. Welding in protective gases: study. manual for the beginning. Prof. education. 6th ed., Erased Moscow: Academy; 2016. 256 s.
42. Welding and welded materials: reference: in 3 tonsed. K.V. Lyubavsky. Moscow: Mechanical Engineering; 1991.

43. Stepin P.A. Resistance of materials: a textbook for universities. Moscow: Integral Press; 2002. 320 s.
44. Chernyshov G.G. Welding. Electric gas welding: a textbook for student institutions of media. Prof. education. 12th ed., Erased Moscow: Academy; 2017. 240 s.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexander P. Scherbakov, Head of the Laboratory, Senior Lecturer at the Department of Welding Ship Structures, Saint-Petersburg State Marine Technical University (190121, Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya St., 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-7751>, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru

Evgenii A. Zernin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Welding Ship Structures, Saint-Petersburg State Marine Technical University (190121, Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya St., 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9176-0720>, e-mail: yuti_sp@bk.ru

Ekaterina D. Petrova, Assistant Professor at the Department of Welding Ship Structures, Saint-Petersburg State Marine Technical University (3 Lotsmanskaya St., Saint Petersburg, 190121, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2302-8359>, e-mail: petrowa.ket@yandex.ru

Maksim V. Konyashov, laboratory assistant at the Department of Welding Ship Structures, Saint-Petersburg State Marine Technical University (3 Lotsmanskaya St., Saint Petersburg, 190121, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3365-079X>, e-mail: conachmasim@gmail.com

Contribution of the authors:

Alexander P. Scherbakov – setting a research task, scientific management, reviewing relevant literature, writing a text.

Evgenii A. Zernin – scientific management, conceptualization of research.

Ekaterina D. Petrova – data collection and analysis, review of relevant literature.

Maksim V. Konyashov – data collection and analysis, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

