



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov











Оценка сварочно-технологических свойств электродных покрытий основного типа различных производителей электродов для сварки трубных деталей и сборочных единиц поверхностей теплообмена котлоагрегатов



Юлия Карлина^{1, а, *}, Роман Кононенко^{2, б}, Максим Попов^{2, в}, Федор Дерюгин^{2, д}, Владислав Бянкин^{2, е}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>,  jul.karlina@gmail.com; ^б  <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>,  istu_politeh@mail.ru;

^в  <https://orcid.org/0000-0003-2387-9620>,  popovma.kvantum@gmail.com; ^д  <https://orcid.org/0009-0004-4677-3970>,  deryugin040301@yandex.ru;

^е  <https://orcid.org/0009-0007-0488-2724>,  borck3420@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791

История статьи:

Поступила: 11 марта 2024

Рецензирование: 03 апреля 2024

Принята к печати: 29 апреля 2024

Доступно онлайн: 15 июня 2024

Ключевые слова:

Сварка

Трубы

Трубные детали

Сварочные электроды

Водород

Прочность

Трещины

АННОТАЦИЯ

Введение. В энергетической промышленности внедряются новые марки высокопрочных сталей, процессы обработки и ремонта. В то же время ручная дуговая сварка остается основным технологическим процессом при ремонте оборудования в условиях тепловых электростанций. Сварочные материалы, используемые при ремонте оборудования, должны обеспечивать сопоставимые с основным металлом механические свойства сварного шва. Сварочная промышленность уже давно сталкивается с проблемой высокой чувствительности электродов с основным типом покрытия к впитыванию влаги. Высокая склонность к холодному растрескиванию, вызванная диффузионным водородом, и водородное охрупчивание представляют собой основные препятствия на пути более широкого использования электродов с основным типом покрытия для сварки высокопрочных сталей. Поступление водорода при дуговой сварке является результатом присутствия водорода в атмосфере дуги, загрязненного водородом присадочного материала или локальных остатков водорода на исходном материале. Во время сварки молекулярный водород диссоциирует под действием энергии дуги и затем легко поглощается расплавленным материалом. В настоящее время на рынке сварочных материалов присутствуют электроды с основным покрытием известных и проверенных марок, выпускаемые различными отечественными и иностранными производителями. Однако на практике встречаются случаи образования холодных трещин в сварном шве после сварки. **Цель работы.** Провести оценку сварочно-технологических свойств электродных покрытий основного типа различных производителей. В работе исследованы образцы, наплавленные электродами ТМУ-21У и ЦУ-5 разных производителей, и определено содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле. **Методами исследования** являются механические испытания на статистическое растяжение, анализ химического состава и металлографические исследования. Определение содержания водорода, вызванного сваркой, может осуществляться с помощью различных методов количественного элементного анализа. Все методы испытаний включают сварку в определенных условиях с последующей как можно более быстрой глубокой заморозкой испытуемых образцов. Таким образом подавляются нежелательные процессы диффузии и сохраняется водород, введенный в металл сварного шва. Впоследствии диффундирующий водород десорбируется из испытуемых образцов контролируемым образом. **Результаты и обсуждение.** Оценка сварочно-технологических свойств электродов выявила неустойчивое горение дуги. Механические свойства наплавленного металла исследуемых электродов находятся на минимально допустимом уровне согласно требованиям нормативных документов. Концентрация водорода, присутствующего в металле дугового сварного шва, многофакторно зависит от процедуры сварки (процесса и параметров, используемых расходных материалов, а также условий окружающей среды, например влажности). Для качественной оценки содержания водорода более 15 см³/100 г считается высоким, а содержание водорода менее 5 см³/100 г считается очень низким. **Представленные результаты.** Проведенная оценка сварочно-технологических свойств электродов с основным покрытием показала удовлетворительные результаты. Механические свойства наплавленного металла по показателю «ударная вязкость» находятся на нижнем допустимом пределе, а относительное удлинение не соответствует требованиям нормативных документов. Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле выше, чем заявляемые производителями электродов показатели.

Для цитирования: Оценка сварочно-технологических свойств электродных покрытий основного типа различных производителей электродов для сварки трубных деталей и сборочных единиц поверхностей теплообмена котлоагрегатов / Ю.И. Карлина, Р.В. Кононенко, М.А. Попов, Ф.Ф. Дерюгин, В.Е. Бянкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 71–94. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26-2-71-94.

*Адрес для переписки

Карлина Юлия Игоревна, к.т.н., научный сотрудник
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26,
129337, г. Москва, Россия
Тел.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

Введение

Новая энергетическая политика в значительной степени способствовала быстрому увеличению доли возобновляемой чистой энергии, такой как энергия ветра, воды и солнечная энергия. В то же время тепловые электростанции пока остаются важным элементом в получении электричества и тепла. Из года в год растут нормативные требования к характеристикам сталей, к процедурам сварки и ремонта различных деталей машин и механизмов тепловых электростанций. Традиционно основным процессом сварки и ремонта на тепловых электростанциях является ручная дуговая сварка (РДС) покрытыми электродами, а также механизированная сварка в защитных газах. Основными расходными материалами в соответствии с руководящими документами (РД) [1] при ручной дуговой сварке служат электроды основного типа: УОНИ-13/45, УОНИ-13/55, УОНИ-13/55С, ЛЭЗУОНИ-13/55, ТМУ-21У и др. Контроль содержания влаги в электродном покрытии имеет решающее значение для получения бездефектных высококачественных сварных швов при дуговой сварке сталей в защитной среде [2].

Сварочная промышленность уже давно сталкивается с проблемой высокой чувствительности электродов с основным типом к впитыванию влаги [3, 4]. Влага является основным источником водорода, поступающего в сварочную ванну. Присутствие водорода в зоне плавления при сварке сталей может быть опасным, поскольку вызывает образование холодных трещин как в зоне термического влияния, так и в зоне плавления, которые являются причиной катастрофического разрушения сварной стальной конструкции. Холодные трещины, вызванные водородом, представляют собой серьезную проблему свариваемости низколегированных высокопрочных сталей [2–7]. Холодные трещины возникают при одновременном существовании трех факторов: остаточных напряжений после сварки, хрупких структур в зоне термического влияния (ЗТВ) и высокого содержания диффузионного водорода в наплавленном металле [2]. Во время сварки водород, поглощенный в зоне сварного шва, имеет высокую склонность к диффундированию в ЗТВ. Параметрами, влияющими на диффузию водорода из зоны сварного шва в сварное изде-

лие, являются температура, микроструктура металла, растворимость, остаточные напряжения и эффект скопления в дефектах металла.

Установлено, что основным источником водорода в металле шва при РДС выступают продукты разложения электродного покрытия [5, 8]. Перед растворением атомов водорода в жидкой сварочной ванне происходит диссоциация H_2O и H_2 . Растворение молекулярного водорода в сварочной ванне увеличивается с ростом парциального давления компонентов газовой смеси по закону Сивертса. Одним из механизмов диффузионного восстановления водорода является снижение парциального давления водорода в атмосфере сварочной дуги – например, за счет диссоциации карбонатов и фторидов, а именно Na_2CO_3 , NaF , CaCO_3 , CaF_2 , MgCO_3 и MgF_2 . Карбонаты диссоциируют с образованием CO_2 и CO , что снижает парциальное давление водорода над сварочной ванной [5–11]. Разложение электродного покрытия основного типа, содержащего в качестве основного компонента (45–50 %) CaCO_3 , приводит к образованию газовой защиты с низким содержанием водорода. Вторым важным компонентом электродного покрытия основного типа является плавиковый шпат CaF_2 . Введение фтористых соединений в состав сварочных материалов представляет собой один из эффективных способов снижения поглощения водорода жидким металлом [5, 8, 9]. Атомы фтора, соединяясь с электронами, превращаются в ионы с малой подвижностью [10, 11]. Это ведет к снижению проводимости дугового промежутка и ухудшению стабильности дуги. Однако атомы фтора способны связывать водород в молекулы HF , не растворяющиеся в металле ванны, уменьшая насыщение металла шва водородом [5]. Поэтому использование основного покрытия электродов является ключевым подходом к снижению риска образования холодных трещин при сварке высокопрочных сталей [12–14]. Хотя основное покрытие электрода представляет собой сварочный материал с низким содержанием водорода, оно подвержено впитыванию влаги при воздействии атмосферы [5, 8, 14].

В Европе измерение диффузионного водорода в металле, сваренном дуговой сваркой, регламентируется стандартом ISO 3690 [15]. Этот стандарт аналогичен американскому стандарту AWS A4.3–93 [16] и японскому JIS Z 3113

[17]. Есть различия в деталях, но по отношению к описанным методам стандарты по большей части эквивалентны. Сварочные электроды классифицируются различными национальными и международными стандартами по группам в зависимости от содержания диффузионного водорода, который они могут ввести в металл сварного шва. Международный институт сварки (IIW) использует приращение линейной шкалы для измерения уровня водорода в единицах 5 (5–10–15 мл на 100 г), а также логарифмическую шкалу (4–8–16 мл на 100 г), используемую AWS, на основе корреляции более низкого критического напряжения и более низкой температуры предварительного нагрева с уровнями диффундирующего водорода, чтобы избежать водородного растрескивания. Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле зависит не только от состава (вида) покрытия, но и от температуры прокали электродов [18]. Согласно российским нормативным документам [18] в группу с индексом H5 входят электроды, обеспечивающие содержание водорода в наплавленном металле до $5 \text{ см}^3/100\text{г}$, в H10 – от 5 до $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, в H15 – от 10 до $15 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, и самая критичная группа – свыше $15 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Все поставщики электродов должны придерживаться новой маркировки сварочных материалов с обязательным указанием показателя содержания водорода в наплавленном металле [18]. На изготовителя возлагается большая ответственность за внедрение соответствующих мер защиты от водородного растрескивания в процедурах сварки. Помимо предписания правильно обработанных сварочных расходных материалов основного типа с низким содержанием водорода, производители полагаются на предварительный нагрев, контроль температуры между проходами, строгий контроль подвода тепла и термообработку после сварки, чтобы снизить риск образования трещин во время сварки. Эти традиционные меры контроля над водородом являются дорогостоящими и отнимают много времени.

В соответствии со стандартом ISO 3690 [15] для определения и измерения содержания водорода могут использоваться различные методы:

- 1) ртутный метод и два метода на основе газа-носителя;
- 2) газовая хроматография (ГХ);
- 3) горячая экстракция (ГЭ).

Ртутный метод широко обсуждается критически [8, 14, 19–23], поскольку использование ртути связано с риском для здоровья, а также небезопасно с точки зрения защиты окружающей среды. Следовательно, его все больше и больше заменяют другими, более безопасными методами [8, 14]. Методом ГХ водород собирается из образца сварного шва в закрытой камере в течение определенного времени выдержки при повышенных температурах. По этой причине время сбора можно сократить до нескольких часов [14]. После этого камера продувается газом-носителем, и газовая смесь передается в блок ГХ. Обычно газовый хроматограф состоит из нагреваемой колонки для разделения отдельных газов. Разделение достигается разным временем удерживания газа-носителя и водорода за счет взаимодействия со стенкой колонки. Метод ГЭ (независимо от использования вакуума или газа-носителя) основан на термической активации атомов водорода в твердом образце и последующей термодесорбции. Последние дискуссии [13, 14, 19–23] по стандартизации определения водорода в сварных швах согласно ISO 3690 [16] показали, что обсуждение экспериментальных эффектов необходимо для используемого метода горячей экстракции газа-носителя (CGHE) с точки зрения устройства для сбора и извлечения водорода. В частности, важными факторами, влияющими на результаты экстракции и сбора водорода, являются температура образца, время экстракции и их взаимозависимости. Стоит отметить, что могут иметь влияние дополнительные граничные условия – например, размер и поверхность образца. У всех представленных методов есть плюсы и минусы. Помимо прочего это и вопрос имеющегося бюджета, количества образцов, которые необходимо проанализировать (и времени на один образец), а также того, какое оборудование используется для определения водорода в сварных швах.

В России принят стандарт по определению водорода в сварных соединениях [24], который не всегда можно использовать на промышленных площадках для оперативного контроля сварочных материалов. С целью оперативного контроля в цеховых условиях используется метод «карандашной пробы» [25], преимущество которого состоит в использовании простого недорогого оборудования, наглядности и возможности

оценки влияния на кинетику выделения водорода при отрицательных температурах.

Таким образом, растущий спрос на высокопрочные стали в энергетике привел к увеличению потребности в технологиях сварки с низким содержанием водорода для снижения риска холодного растрескивания. Поэтому контроль влажности основного покрытия электродов является залогом получения качественных сварных швов за счет соблюдения условий обращения и методов хранения для предотвращения впитывания влаги, а также прокаливанию электродов при температуре в диапазоне 340...400 °С [8].

На качество сварного шва влияет качество металла, на которое, в свою очередь, влияют различные факторы его производства [26–36].

В то же время фактором, влияющим на качество сварного соединения, при использовании электродов с основным покрытием является сам производитель сварочных электродов. В настоящее время на рынке предлагаются электроды с основным покрытием от различных производителей, российского и иностранного производства, под известными брендами УОНИ, ТМУ и др. Эти покрытия не всегда соответствуют требованиям нормативных документов по сварочно-технологическим параметрам [37–39], что представляет серьезную опасность в случае их применения в условиях тепловых энергетических станций. Замена рецептуры основных компонентов покрытия, невыдерживание рецептуры, нарушения технологии производства электродов – все эти факторы могут оказать важное влияние на качество сварного шва [40, 41]. Мы как потребители выбираем уже готовый продукт, который по внешним признакам соответствует нормативным документам, но соответствие его заявляемым свойствам мы можем определить только после покупки и операции сварки.

Цель работы: определить содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле, выполненном электродами с основным покрытием от различных производителей.

Основной задачей исследования была оценка сварочно-технологических свойств электродных покрытий основного типа различных производителей электродов для сварки трубных деталей из низколегированных сталей и сборочных единиц поверхностей теплообмена котлоагрегатов.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе производилось сравнение двух марок электродов, изготавливаемых на разных заводах, а именно на Судиславском заводе сварочных материалов, импортных электродов, изготавливаемых компанией ESAB, и электродов, производимых ЗАО «Электродный завод», расположенном в Санкт-Петербурге. Сваривание образцов выполнялось на постоянном токе обратной полярности 90 А электродами ЦУ-5 и ТМУ-21У трех производителей: ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург; ООО «Судиславский завод сварочных материалов» Костромская обл., Судиславский р-н, д. Текотово; завода ЭСАБ-СВЭЛ, г. Санкт-Петербург. Стабильность горения дуги определяли при помощи регистратора сварочных параметров ИРСР-11 с последующей компьютерной обработкой результатов. Испытания сварочно-технологических свойств проводили в соответствии с методикой, описанной в РД 03-613-03, ГОСТ 9466 и ГОСТ 25616. Содержание химических элементов в наплавленном металле определялось по ГОСТ 18895–75, ГОСТ 28033–89 или с использованием специальных методов, обеспечивающих требуемую точность и воспроизводимость. Испытания механических свойств наплавленного металла выполнялись согласно требованиям РД 03-613-03, ГОСТ Р ИСО 2560 и ГОСТ Р ИСО 15792-1. Определение диффузионного водорода в наплавленном металле с учетом специфики энергетического предприятия «Ново-Иркутская ТЭЦ» определяли прямо в цехе ремонта методом карандашной пробы [25]. Специфика ремонтной сварки в условиях станции включает сварку как при положительных, так и при отрицательных температурах, а это сильно влияет на процесс десорбции водорода из сварного шва [2, 4, 8,]. Производилось несколько серий экспериментов для определения диффузионно-подвижного водорода по методу карандашной пробы:

– первая серия выполнялась с непрокаленными электродами при комнатной температуре, примерно 18...20 °С;

– вторая серия – с электродами после прокалики при температуре 300...400 °С в течение двух часов – выполнялась при комнатной температуре, примерно 18...20 °С;

– третья серия – наплавка образцов при отрицательной температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ с применением прокалики;

– четвертая серия – наплавка образцов при отрицательной температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ без прокалики.

Для сварки использовали сварочный аппарат фирмы EWM, модель PICOTIG-180. Перед сваркой электроды находились в печи для просушки и прокалики электродов ПСПЭ10/400. От образующегося шлака образцы очищались с помощью шлакоотбойного молотка, металлической щетки и УШМ («болгарки») Dexter 800AG2-125.5. Для проведения исследования сваривали встык две пластины размером 350×110 мм, толщиной 13 мм из стали 09Г2С электродами ЦУ-5 и ТМУ-21У после проведения прокалики согласно рекомендациям производителей на упаковке электродов (табл. 1). Была произведена сварка трех образцов, по одному образцу для каждого электрода каждого производителя. Пластины изготавливались с разделкой кромок. Подготовка кромок производилась с применением фрезерования. Подготовленные к сборке кромки должны быть без заусенцев, резких переходов и острых углов. Непосредственно перед сборкой изготовленные под сварку кромки и прилегающие к ним участки поверхностей деталей должны быть зачищены до металлического блеска и обезжирены. Ширина зачищенных участков, считая от кромок разделки, должна быть не менее 20 мм с наружной и не менее 10 мм с внутренней стороны образца (рис. 1). Поскольку толщина пластины составляет 13 мм, а диаметр электродов 3 мм, то сварку производили в несколько слоев сварного шва. Каждый последующий слой обрабатывался абразивным инструментом с помощью УШМ во избежание шлаковых включений.

Электроды ТМУ-21У. Сварка образца электродами производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов». Перед началом сварки образцов для испытания электроды прокаливали при температуре $350 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение часа, данный режим прокалики рекомендован производителем на упаковке электродов. На упаковке нет индекса по содержанию водорода в наплавленном металле согласно требованиям [18]. После прокалики электроды были подвергнуты испытанию покрытия [1]: с высоты одного метра электрод в свободном падении уронили на гладкую стальную плиту.

Сварка образца электродами производства ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург. Перед началом сварки образцов для испытания электроды прокаливали при температуре $400 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение часа, данный режим прокалики рекомендован производителем на упаковке электродов. На упаковке нет индекса по содержанию углерода согласно требованиям [18]. Заметим, что режим прокалики отличается от режима для электродов производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов». После прокалики электроды были подвергнуты испытанию покрытия: с высоты одного метра электрод в свободном падении уронили на гладкую стальную плиту.

Сварка образца электродами производства ЭСАБ-СВЭЛ, г. Санкт-Петербург. Перед началом сварки образцов для испытания электроды прокаливали при температуре $359 \dots 400 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов, данный режим прокалики рекомендован производителем на упаковке электродов (см. рис. 6), там же указан индекс водорода в диапазоне от 5 до $10\text{ см}^3/100\text{ г}$. Заметим, что режим прокалики отличается от электродов

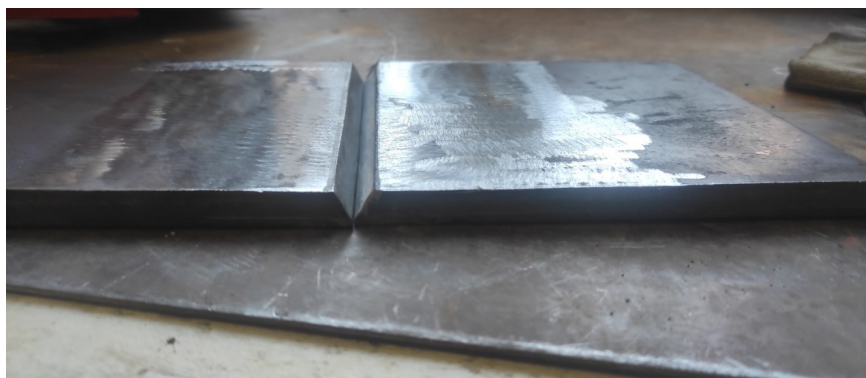


Рис. 1. Пластины под сварку

Fig. 1. Plates to be welded

производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов» и ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург.

Результаты исследований

Электроды ТМУ-21У. Сварка образца электродами производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов»

Результаты испытаний качества покрытия электродов осмотрели под увеличительным стеклом. Откалывание покрытия было в норме, частичные откалывания общей протяженностью менее 5 % длины покрытой части электрода составляли не более 20 мм.

Перед началом сварки была произведена проверка на «козырек» [1]. Из испытуемой упаковки случайно выбрали три электрода для проверки и произвели их расплавление в вертикальном положении с углом наклона электрода к шву 50...60°. Размер «козырька» измеряется от торца стержня электрода до наиболее удаленной части оплавленного покрытия (рис. 2). Образование «козырька» из покрытия размером более 3 мм и отваливание кусков не расплавленного покрытия от стержня считаются браковочными признаками. Проверка на «козырек» показала наличие у всех электродов не расплавленного покрытия более 3 мм, что уже является браковочным признаком.



Рис. 2. Формирование «козырька» после сварки на электродах ТМУ-21У производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов»

Fig. 2. Formation of the fingernail after welding after welding with TMU-21U electrodes produced by "Sudislavsky Welding Materials Plant", LLC

Во время сварки образцов дуга горела нестабильно во всех трех слоях: корневом, заполняющем и облицовочном. После сварки корневого шва электроды были повторно прокалены, но это не дало положительных результатов для стабильного горения дуги. Сборка образца производилась на ровной поверхности. С помощью УШС-3 был выставлен зазор 2 мм. Корневой шов был сварен без отрыва сварочным током обратной полярности 90 А (рис. 3, а, б). Следующий слой сварочного шва является заполняющим. Сварка производилась сварочным током обратной полярности 90 А, как и при сварке корневого шва. На заполнение ушло два электрода, это позволяет сделать вывод о том, что сварка велась с отрывом (рис. 3, в). Как видно из фотографии корневого шва (рис. 3, а), на образце отсутствует разбрызгивание металла, шлак удаляется с трудом только после остывания с помощью УШМ (рис. 3, б). При сварке заполняющего слоя видно чрезмерное разбрызгивание расплавленного металла. Удаление брызг с помощью молотка сварщика затруднено. Брызги и шлак после сварки удаляются только механическим путем. Перед сваркой облицовочного шва образец был полностью очищен от брызг. При выполнении облицовочного шва дуга, так же как и при корневом и заполняющем, горела нестабильно. На облицовочный шов ушло три электрода (рис. 3, г). Как и в случае с заполняющим слоем шва, сварка велась с отрывом между заменами электродов. Параметры тока были соблюдены такие же, как и в случае сварки корневого и заполняющего слоя шва. На облицовочном шве, так же как и на заполняющем, видно довольно большое количество разбрызгивания, что тоже является браковочным признаком. Разбрызгивание удалялось при подготовке к дальнейшему испытанию на механические свойства наплавленного металла шва только с помощью УШМ. Шлак на облицовочном шве удалялся с затруднением с помощью молотка сварщика, так как воздействие УШМ на облицовочный слой сварочного шва запрещено.

Сварка образца электродами производства ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург

Результаты испытаний качества покрытия электродов осмотрели под увеличительным стеклом. Откалывание покрытия было также

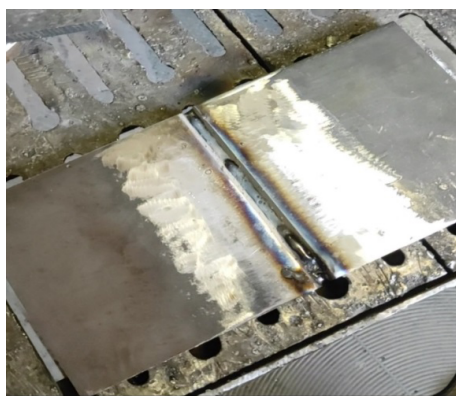
*a**б**в**г*

Рис. 3. Внешний вид сварного шва после заполнения электродами ТМУ-21У:

a – корень шва; *б* – корень шва после зачистки УШМ; *в* – заполняющий шов; *г* – облицовочный шов

Fig. 3. Appearance of the welded seam after filling with TMU-21U electrodes:

a – the root of the seam; *б* – the root of the seam after stripping with a machine; *в* – the filling seam; *г* – the facing seam

в норме, частичные откалывания общей протяженностью менее 5 % длины покрытой части электрода составляли не более 20 мм.

Перед началом сварки была произведена проверка на «козырек» [1], так же как и с электродами производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов»: аналогичным образом из испытуемой упаковки рандомно выбрали три электрода для проверки и произвели их расплавление в вертикальном положении с углом наклона электрода к шву 50...60°. Размер «козырька» измерялся от торца стержня электрода до наиболее удаленной части оплавленного покрытия. Образование «козырька» из покрытия размером более 3 мм и отваливание кусков не расплавленного покрытия от стержня считаются браковочными признаками. Проверка на «козырек» показала наличие у одного электрода части не расплавленного покрытия размером более 3 мм, что уже является браковочным признаком,

у двух остальных размер «козырька» находился в допуске и составлял менее 2,5 мм (рис. 4).

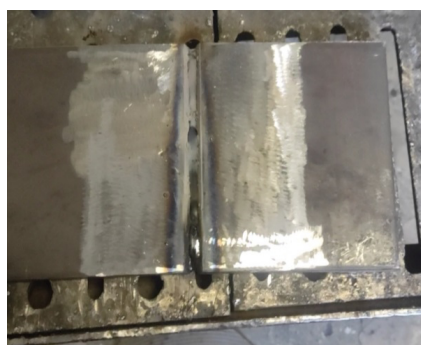
После выявления «козырька» приступили к сварке образцов. Во время сварки образцов дуга горела нестабильно во всех трех слоях – корневом, заполняющем и облицовочном. После сварки корневого шва электроды были повторно прокалены, но это не дало положительных результатов для стабильного горения дуги. Сборка образца производилась на ровной поверхности. С помощью УШС-3 был выставлен зазор 2 мм. Корневой шов был сварен без отрыва сварочным током обратной полярности 90 А (рис. 5, а).

Как видно из фотографии корневого шва (рис. 5, *a*), на образце отсутствует разбрызгивание металла, шлак удаляется с трудом только после остывания с помощью УШМ. Следующий слой сварочного шва является заполняющим. Сварка производилась с такими же параметрами тока, как и при сварке корневого шва. На запол-



Рис. 4. Формирование «козырька» после сварки на электродах ТМУ-21У ЗАО «Электродный завод»
г. Санкт-Петербург

Fig. 4. Formation of the fingernail after welding after welding with TMU-21U electrodes CJSC “Elektroodnyi zavod”
St. Petersburg



a



б



в

Рис. 5. Внешний вид сварного шва после заполнения электродами ТМУ-21У ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург:

a – корень шва; *б* – заполняющий шов; *в* – облицовочный шов

Fig. 5. Appearance of the welded seam after filling with TMU-21U electrodes CJSC “Elektroodnyi zavod”, St. Petersburg:

a – the root of the seam; *б* – the filling seam; *в* – the facing seam

нение ушло два электрода, это позволяет сделать вывод о том, что сварка велась с отрывом (рис. 5, *б*). При сварке заполняющего слоя видно чрезмерное разбрызгивание расплавленного металла. Брызги имеют больший размер, чем при сварке электродом производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов». Удаление брызг с помощью молотка сварщика затруднено. Брызги и шлак после сварки удаляются только механическим путем. Перед сваркой облицовочного шва образец был полностью очищен от брызг. При выполнении облицовочного шва дуга, так же как и при корневом и заполняющем, горела нестабильно. На облицовочный шов ушло три электрода (рис. 5, *в*). Как и в случае с заполняющим слоем шва, сварка велась с отрывом между заменами электродов. Параметры тока были соблюдены такие же, как

и в случае сварки корневого и заполняющего слоя шва. На облицовочном шве, так же как и на заполняющем, видно довольно большое количество разбрызгивания, что уже является браковочным признаком. Однако разбрызгивание было меньше, чем в случае электродов производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов». Разбрызгивание удалялось при подготовке к дальнейшему испытанию на механические свойства наплавленного металла шва только с помощью УШМ. Шлак на облицовочном шве удалялся с затруднением с помощью молотка сварщика, так как воздействие УШМ на облицовочный слой сварочного шва запрещено. Тем не менее шлак удалялся намного легче, чем в случае применения электродов производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов».

Сварка образца электродами производства ЭСАБ-СВЭЛ, г. Санкт-Петербург

На упаковке изделий указан индекс водорода в диапазоне от 5 до 10 см³ / 100 г (рис. 6). Заметим, что режим проковки отличается от рекомендованных для электродов производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов» и ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург.

Результаты испытаний качества покрытия осмотрели под увеличительным стеклом. Откалывания покрытия не было обнаружено, хотя допускаются частичные откалывания общей протяженностью менее 5 % длины покрытой части электрода не более 20 мм.

Проверка на «козырек» (рис. 7) была произведена так же, как и с электродами предыдущих производителей: аналогичным образом из испытуемой упаковки рандомно выбрали три электрода для проверки и произвели их расплавление в вертикальном положении с углом наклона электрода к шву 50...60°. Размер «козырька» измеряется от торца стержня электрода до наиболее удаленной части оплавленного покрытия. Образование «козырька» из покрытия размером

более 3 мм и отваливание кусков не расплавленного покрытия от стержня являются браковочными признаками. Размер «козырька» находился в допуске и составлял менее 2 мм. После выявления «козырька» приступили к сварке образцов. Во время сварки дуга горела стабильно на корневом и на заполняющем слое сварочного шва; на облицовочном шве наблюдалось нестабильное горение, что вызвало неравномерное формирование чешуйчатости.

Сборка образца производилась на ровной поверхности. С помощью УШС-3 был выставлен зазор 2 мм. Корневой шов был сварен без отрыва сварочным током обратной полярности 90 А (рис. 8, а). Как видно из фотографии корневого шва (рис. 8, а), на образце отсутствует разбрызгивание металла, шлак удаляется с трудом только после остывания с помощью УШМ. Следующий слой сварочного шва – заполняющий. Сварка производилась с такими же параметрами тока, как и при сварке корневого шва. На заполнение ушло два электрода, это позволяет сделать вывод о том, что сварка велась с отрывом (рис. 8, б). При сварке заполняющего слоя видно

Рис. 6. Данные, приведенные изготовителем на упаковке

Fig. 6. Information provided by the manufacturer on the package

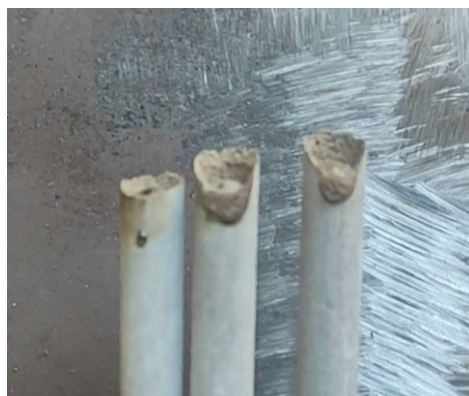


Рис. 7. Формирование «козырька» после сварки на электродах TMU-21Y ЭСАБ-СВЭЛ, г. Санкт-Петербург

Fig. 7. Formation of the fingernail after welding after welding with TMU-21U electrodes ESAB-SVEL, St. Petersburg

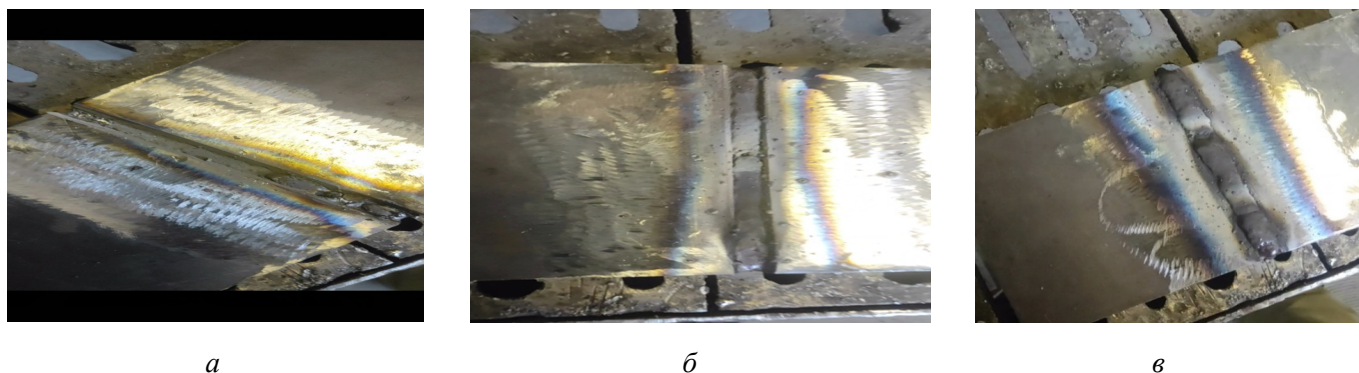


Рис. 8. Внешний вид сварного шва после заполнения электродами ТМУ-21У ЭСАБ-СВЭЛ, г. Санкт-Петербург:
а – корень шва; б – заполняющий шов; в – облицовочный шов

Fig. 8. Appearance of the welded seam after filling with TMU-21U electrodes ESAB-SVEL, St. Petersburg:
a – the root of the seam; б – the filling seam; в – the facing seam

минимальное количество разбрызгивания расплавленного металла. Удаление брызг с помощью молотка сварщика выполняется легко. Шлак после сварки удаляется только механическим путем. Перед сваркой облицовочного шва образец был полностью очищен от брызг. При выполнении облицовочного шва дуга горела нестабильно. На облицовочный шов ушло три электрода (рис. 8, в). Как и в случае с заполняющим слоем шва, сварка велась с отрывом между заменами электродов. Параметры тока были соблюдены такие же, как и в случае сварки корневого и заполняющего слоя шва. На облицовочном шве так же, как и на заполняющем, видно довольно большое количество разбрызгивания, что уже является браковочным признаком. В то же время разбрызгивание с образца удалялось с помощью молотка сварщика и металлической щетки. Шлак на облицовочном шве легко удалялся с помощью молотка сварщика. Разбрызгивание удалялось при подготовке к дальнейшему испытанию на механические свойства наплавленного металла шва только с помощью УШМ.

Для электродов ЦУ-5 были проведены аналогичные работы. Результаты по определению «козырька» оказались отрицательными для образца с электродами производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов». Сварочно-технологические свойства исследованных электродов представлены в табл. 1. Оценка проведена по пятибалльной шкале [1]. Результаты определения химического состава и механических свойств наплавленного металла приведены в табл. 2–7.

Результаты экспериментов по определению диффузионно-подвижного водорода в напла-

вленном металле представлены на рис. 9, 10 для положительной температуры без прокалки и с прокалкой электродов соответственно. Сравнительный анализ диаграмм показывает, что электроды с применением прокалки дают намного меньше диффузионного водорода в наплавленном металле, что является показателем качественного сварного шва. Результаты по оценке влияния отрицательных температур на десорбцию водорода из наплавленного металла представлены на рис. 11–14. Общее содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле без прокалки электродов при выдержке условия $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение трех суток с последующим перемещением эвдиометров в теплое помещение и выдержкой трое суток показано на рис. 11–14.

Обсуждение результатов

Известно, что состав покрытия существенно влияет на химический состав металла сварного шва, облегчая перенос элементов в сварные швы и тем самым добавляя легирующие элементы в зону сварного шва. На поведение сварочных покрытий влияют некоторые физико-химические и теплофизические характеристики компонентов электродного покрытия [6–8]. Представленные выше результаты показывают, что, несмотря на нормирование компонентов, сварочно-технологические свойства электродных покрытий известных марок ТМУ-21У и ЦУ-5 в зависимости от производителя существенно отличаются, покрытие плавится неравномерно, что показывают опыты по определению «козырька» (рис. 2, 4, 7).

Таблица 1

Table 1

Сварочно-технологические свойства электродов

Welding engineering properties of electrodes

Марка электрода, производитель / Electrode brand, manufacturer	Возбуждение дуги / Arc excitation	Разбрызгивание / Sputtering	Отделимость шлаковой корки / Removability of slag	Формирование валика / Bead forming	Устойчивое горение дуги / Sustained arc burning	«Козырек» / Fingernail	Наличие дефектов на поверхности / Presence of defects on the surface
ТМУ-21У Судиславские / TMU-21U Sudislavskiy plant of welding consumables	4	Сильное / strong	3	4	3	Вне допуска / Out of tolerance	Нет / –
ТМУ-21У Санкт-Петербург / TMU-21U St. Petersburg	4	Незначительное / slight	3	4	3	В допуске / Within tolerance	Нет / –
ТМУ-21У ЭСАБ / TMU-21U ESAB	4,5	Умеренное / moderate	4	4	4	В допуске / Within tolerance	Нет / –
ЦУ-5 Судиславские / CU-5 Sudislavskiy plant of welding consumables	3	Незначительное / slight	3	4	4	Вне допуска / Out of tolerance	Нет / –
ЦУ-5 Санкт-Петербург / CU-5 St. Petersburg	4	Незначительное / slight	3	3	4	Вне допуска / Out of tolerance	Нет / –
ЦУ-5 ЭСАБ / CU-5 ESAB	4	Незначительное / slight	5	4	5	В допуске / Within tolerance	Нет / –

Таблица 2

Table 2

Химический состав наплавленного металла электродами ТМУ-21У, Санкт-Петербург

Chemical composition of weld overlaid metal by TMU-21U electrodes, St. Petersburg

Наименование показателя / Indicator name	Значение по НД / ND value	Фактическое значение / Actual value	Погрешность / Accuracy	НД на методики испытаний / ND for test methods
Массовая доля углерода, % / Carbon, wt. %	0,08	0,12	0,016	ГОСТ 22536.1–89 / GOST 22536.1–89
Массовая доля кремния % / Silicon, wt. %	0,28	0,26	0,03	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89
Массовая доля марганца % / Manganese, wt. %	0,82	0,68	0,04	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89
Массовая доля фосфора % / Phosphors, wt. %	0,023	0,019	0,003	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89
Массовая доля серы % / Sulfur, wt. %	0,009	0,01	0,004	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89

Таблица 3

Table 3

Механические свойства наплавленного металла электродами ТМУ-21У, Санкт-Петербург
Mechanical properties of weld overlaid metal with TMU-21U electrodes, St. Petersburg

№ п/п	Наименование показателя / Indicator name	Значение по ГОСТ 380–2005 / The value according to GOST 380–2005	Фактическое значение / Actual value	НД на методы испытаний / ND for test methods
1	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² / Yield strength $\sigma_{0,2}$, N/mm ²	≥ 235	205, 265, 249	ГОСТ 1497–84 / GOST 1497–84
2	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² / Ultimate tensile strength σ_u , N/mm ²	360...460	346, 378, 440	
3	Относительное удлинение δ , % / Ultimate elongation δ , %	≥ 27	24, 24, 28	
4	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² / Impact toughness KCU, J/cm ²	≥ 49	49, 51, 50	ГОСТ 9454–78 / GOST 9454–78

Таблица 4

Table 4

Химический состав наплавленного металла электродами ТМУ-21У, ESAB
Chemical composition of weld overlaid metal with TMU-21U electrodes, ESAB

Наименование показателя / Indicator name	Значение по НД / ND value	Фактическое значение / Actual value	Погрешность / Accuracy	НД на методики испытаний / ND for test methods
Массовая доля углерода, % / Carbon, wt. %	0,09	0,09	0,016	ГОСТ 22536.1–89 / GOST 22536.1–89
Массовая доля кремния % / Silicon, wt. %	0,30	0,29	0,03	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89
Массовая доля марганца % / Manganese, wt. %	0,85	0,80	0,04	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89
Массовая доля фосфора % / Phosphors, wt. %	max 0,030	0,022	0,003	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89
Массовая доля серы % / Sulfur, wt. %	0,009	0,012	0,004	ГОСТ 28033–89 / GOST 28033–89

Исследуемые покрытия относятся к основному типу. В ходе экспериментов отмечено, что основное нарушение в стабильном горении дуги связано с процессом образования капли и ее переносом. Из-за короткой длины дуги происходят шунтирования дуги каплями и ее погасания. Визуально этот процесс быстротекающий, его трудно зафиксировать. Использование регистратора сварочных процессов позволило установить этот эффект шунтирования дугового промежутка для всех исследуемых электродов. В связи с этим в табл. 1 в графе «Устойчивое горение дуги» выставлены оценки в диапазоне от

3 до 5 баллов. Хорошую устойчивость горения дуги продемонстрировали электроды ЦУ-5 производства ЭСАБ.

Важным физическим параметром является отделение шлака от металла шва. Для обеспечения высокой производительности сварки необходима хорошая отделимость шлака, чтобы не требовалось дополнительного времени для механического удаления шлака, прилипшего к металлу сварного шва. Кроме того, при многопроходной сварке легко отделяемый шлак имеет решающее значение для предотвращения любого загрязнения последующих сварочных проходов

Таблица 5

Table 5

Механические свойства наплавленного металла электродами TMU-21U, ESAB**Mechanical properties of weld overlaid metal with TMU-21U electrodes, ESAB**

№ п/п	Наименование показателя / Indicator name	Значение по ГОСТ 380–2005 / The value according to GOST 380–2005	Фактическое значение / Actual value	НД на методы испытаний / ND for test methods
1	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² / Yield strength $\sigma_{0,2}$, N/mm ²	≥ 235	205, 265, 249	ГОСТ 1497–84
2	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² / Ultimate tensile strength σ_u , N/mm ²	360...460	346, 378, 440	
3	Относительное удлинение δ , % / Ultimate elongation δ , %	≥ 27	24, 24, 28	
4	Ударная вязкость KCU, Дж/см ² / Impact toughness KCU, J/cm ²	≥ 49	49, 51, 50	ГОСТ 9454–78

Таблица 6

Table 6

Химический состав наплавленного металла электродами TMU-21U, Судиславские
Chemical composition of weld overlaid metal with electrodes TMU-21U, Sudislavskiy plant
of welding consumables

Наименование показателя / Indicator name	Значение по НД / ND value	Фактическое значение / Actual value	Погрешность / Accuracy	НД на методики испытаний / ND for test methods
Массовая доля углерода, % / Carbon, wt. %	0,08	0,12	0,016	ГОСТ 22536.1–89
Массовая доля кремния % / Silicon, wt. %	0,28	0,54	0,03	ГОСТ 28033–89
Массовая доля марганца % / Manganese, wt. %	0,82	1,37	0,04	ГОСТ 28033–89
Массовая доля фосфора % / Phosphors, wt. %	0,023	0,013	0,003	ГОСТ 28033–89
Массовая доля серы % / Sulfur, wt. %	0,009	0,011	0,004	ГОСТ 28033–89

из-за остатков шлака, добавляемого в сварочную ванну [4, 5, 8]. Основные причины хорошего отделения шлака могут быть следующими: обеспечение большой разницы в тепловом расширении между твердым шлаком и металлом сварного шва; предотвращение образования избыточного количества тугоплавких фаз, таких как шпинель ($MgO \cdot Al_2O_3$), Cr_2O_3 или перовскит ($CaTiO_3$); предотвращение образования химической связи за счет образования прослоек между шлаком и металлом шва; обеспечение образования низкопрочного шлака из расплавленного флюса.

Покрывание электрода основного типа при плавлении приводит к выделению газов, которые защищают расплавленную сварочную ванну от примесей из окружающей среды и способствуют поддержанию стабильности дуги. CaO добавляется для повышения основности флюса и снижения содержания водорода в металле сварного шва. Он также снижает вязкость и улучшает стабильность дуги, что приводит к улучшению качества сварного шва и механических свойств. Основным источником CaF_2 является плавиковый шпат, который снижает плотность и темпе-

Механические свойства наплавленного металла электродами ТМУ-21У, Судиславские
Mechanical properties of weld overlaid metal with electrodes TMU-21U, Sudislavskiy plant
of welding consumables

№ п/п	Наименование показателя / Indicator name	Значение по ГОСТ 380–2005 / The value according to GOST 380–2005	Фактическое значение / Actual value	НД на методы испытаний / ND for test methods
1	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² / Yield strength $\sigma_{0,2}$, N/mm ²	≥ 235	225, 285, 260	ГОСТ 1497–84
2	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² / Ultimate tensile strength σ_u , N/mm ²	$\geq 360...460$	315, 395, 390	
3	Относительное удлинение δ , % / Ultimate elongation δ , %	≥ 27	21, 21, 25	
4	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² / Impact toughness КСЧ, J/cm ²	≥ 49	45, 42, 50	ГОСТ 9454–78

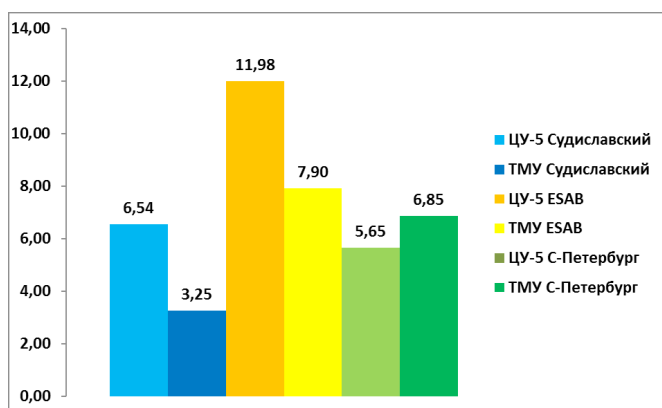
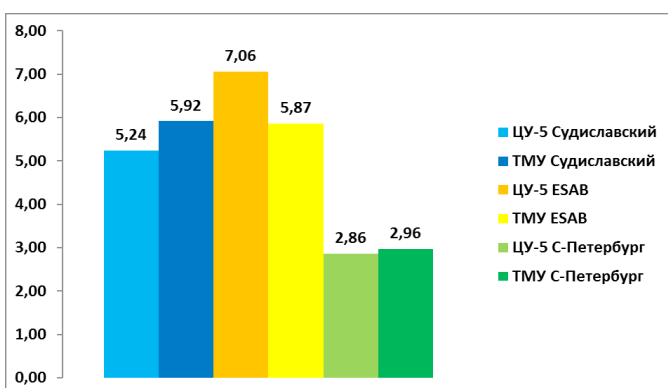


Рис. 9. Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле при температуре окружающей среды 20 °С, сварка электродами из новой пачки без прокатки

Fig. 9. The content of diffusible hydrogen in the weld overlaid metal at ambient temperature 20 °C, welding with electrodes from a new bundle without hardening

Рис. 10. Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле при температуре окружающей среды 20 °С, сварка электродами с прокаткой по рекомендации производителя на упаковке

Fig. 10. The content of diffusible hydrogen in the weld overlaid metal at ambient temperature 20 °C, welding with tempered electrodes according to the manufacturer's recommendation on the package



ратуру плавления флюсовых смесей. Он также увеличивает текучесть расплавленного металла и удаляет водород из расплавленной ванны, образуя фториды водорода.

Одной из проблем, которая проявилась при испытании электродов, оказалась плохая отделимость шлака от наплавленного металла, что се-

резно влияет на производительность. Внешний вид наплавленных валиков до и после удаления покрытых шлаков показан на рис. 3, 5, 8. В ходе экспериментов было видно, что цвет покрытых шлаков менялся от темно-синего до темно-коричневого, а затем светло-коричневого, поверхность сварного шва изменилась с мелкой ряби

Рис. 11. Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле без прокалики при выдержке в условиях -25°C в течение трех суток

Fig. 11. The content of diffusible hydrogen in the weld overlaid metal without hardening at -25°C for 3 days

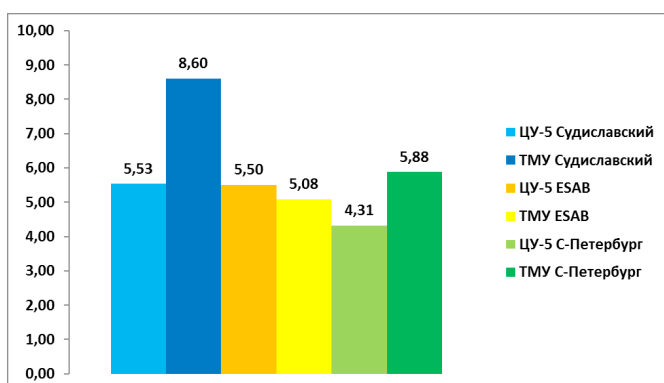


Рис. 13. Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле с прокаликой электродов при выдержке в условиях -25°C в течение трех суток

Fig. 13. The content of diffusible hydrogen in the weld overlaid metal with electrode hardening when aged at -25°C for 3 days

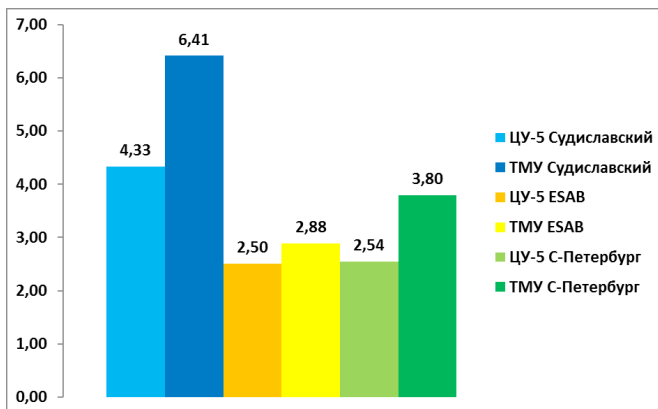
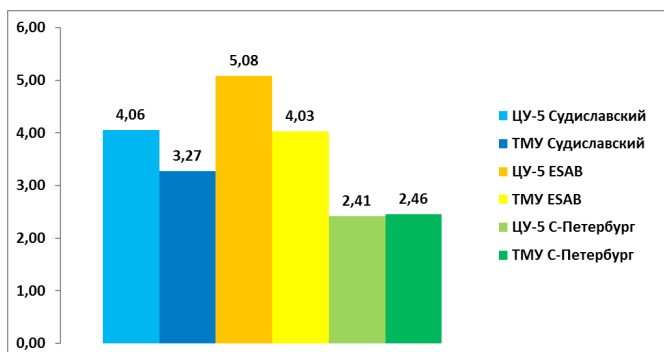


Рис. 12. Общее содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле без прокалики электродов при выдержке в условиях -25°C в течение трех суток с последующим перемещением эвдиометров в теплое помещение и выдержкой трое суток

Fig. 12. The total content of diffusible hydrogen in the weld overlaid metal without hardening of electrodes at holding in conditions -25°C for 3 days with subsequent moving of eudiometers to a warm room and holding for 3 days

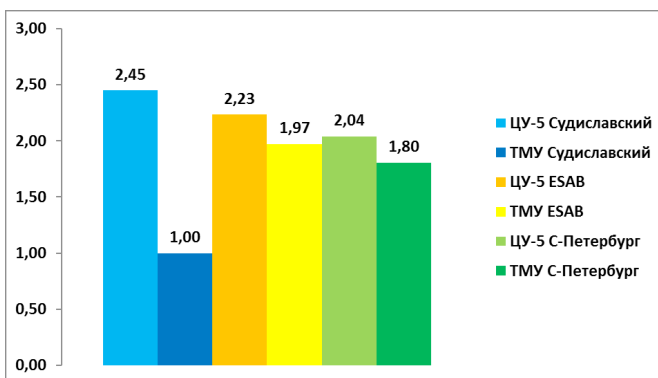


Рис. 14. Общее содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле с прокаликой электродов при выдержке в условиях -25°C в течение трех суток с последующим перемещением эвдиометров в теплое помещение и выдержкой трое суток

Fig. 14. The total content of diffusible hydrogen in the weld overlaid metal with electrode hardening during holding at -25°C conditions for 3 days with subsequent moving of eudiometers to a warm room and holding for 3 days

на крупную и отделяемость шлака стала хуже. Следует также отметить, что шлак темно-синего цвета имел тенденцию отслаиваться большими кусками от металла шва, а коричневые шлаки разбивались на мелкие кусочки при выбивании сварного валика и оставляли некоторое количество шлака, прилипшего к поверхности металла шва.

По внешнему виду при наблюдении за разрушенными шлаками зафиксировано, что шлак электродов ЦУ-5 производства ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург, был очень плотным и при визуальном осмотре не было замечено видимых пор. Однако шлаки электродов ЦУ-5 других производителей имели визуально наблюдаемую пористость. Эти наблюдения показали, что отделяемость шлака ухудшается по мере увеличения его пористости.

Известно [4, 5, 8], что отделяемость шлака находится в очень тесной связи как с физическими, так и с химическими свойствами сварочного флюса после расплавления электродного покрытия [4–8]. Одним из механизмов прилипания шлака к металлу шва является химическая связь за счет образования тонкого слоя оксидов элементов металлической фазы на поверхности металла шва [6]. Эту химическую связь можно ослабить или устранить, если использовать шлаковую систему с минимальной окислительной способностью (например, основную флюсовую систему) [4–6]. На отделяемость шлака влияют различия между коэффициентами термического расширения шлака и металла шва, а также фазовые превращения в шлаке при охлаждении [8].

Возникает вопрос, почему при нормированном отношении компонентов в стандартных марках электродов, но от разных производителей, зафиксирована различная отделяемость шлака. Постулируем, что отделяемость шлака зависит от границы раздела «металл шва – шлак» и разницы теплофизических свойств металла и шлака. Как правило [4–12], четкая граница раздела «металл – шлак» соответствует хорошей отделяемости шлака, в противном случае размытая граница раздела, несомненно, соответствует плохой отделяемости шлака. По мере увеличения основности шлака окислительная способность шлака снижалась. CaCO_3 , CaF_2 и SiO_2 составляют основу электродного покрытия основного типа, но первые два компонента

являются типичными щелочными соединениями [5], а SiO_2 – сильный кислотный оксид, и соотношения $(\text{CaO}+\text{CaF}_2)/\text{SiO}_2$ прямо указывают на показатель основности [5, 8]. Поэтому с увеличением отношения $(\text{CaO}+\text{CaF}_2)/\text{SiO}_2$ окислительная способность шлака снижается, т. е. снижается склонность к образованию химической связи (повышается отделяемость шлака). Очевидно, что в случае исследуемых электродов окислительная способность не снижается, что отражается на отделяемости шлака и указывает на нарушение компонентных отношений $(\text{CaO}+\text{CaF}_2)/\text{SiO}_2$ при изготовлении электродных покрытий ТМУ-21У и ЦУ-5.

В ходе проведенных исследований установлено различие в химическом составе наплавленного металла и механических свойствах электродов ТМУ-21У от разных производителей, что не позволяет на практике гарантировать высокие показатели качества сварного шва. При детальном анализе вопроса гарантированных свойств выявлено несоответствие между нормативными требованиями к характеристикам электродов, размещенными на сайтах производителей, и реальными химическими и механическими свойствами наплавленного металла. Производители сварочных электродов указывают на сайте и упаковке изделий химические и механические свойства, взятые из нормативных документов. Твердость наплавленного металла не является основным показателем электродов, но даже для одной марки от разных производителей она сильно отличается. Так, например, для ТМУ-21У производства ООО «Судиславский завод сварочных материалов» твердость составляет НВ 224–238 ед., для электродов ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург, – НВ 168–179 ед., для электродов завода ЭСАБ – НВ 202–210 ед.

Непопадание в нормативные показатели по относительному удлинению всех исследуемых электродов и минимально допустимые значения ударной вязкости не обеспечивают необходимые высокие механические свойства и хорошую вязкость разрушения при низких температурах для деталей энергетического оборудования согласно требованиям [1].

Оценка диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле показала, что производители электродов ТМУ-21У и ЦУ-5 ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург,

и ООО «Судиславский завод сварочных материалов» не информирует согласно требованиям [18] реального потребителя о содержании водорода в наплавленном металле.

Режимы проковки электродов одной марки у разных производителей отличаются в сторону увеличения температуры проковки. В настоящем исследовании уровень диффундирующего водорода сильно варьируется во всех рассмотренных случаях. На рис. 9, 10 показано содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле при температуре окружающей среды 20 °С. Существенного различия в содержании водорода не зафиксировано, все они попадают в группу от 5 до 10 см³/100 г. Минимальный уровень диффузионного водорода измерен для электродов ТМУ-21У и ЦУ-5 ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург (табл. 4–5).

Во время наплавки валика водород, поглощенный наплавленным металлом (зона сварного шва), имеет высокую тенденцию диффундировать в ЗТВ. Параметры, влияющие на диффузию водорода в наплавленном металле, зависят от температуры, остаточного напряжения, растворимости, микроструктуры металла и эффекта улавливания.

Важно понимать, что между различными марками трубопроводной стали существуют значительные различия в прочности и микроструктуре, поэтому поведение водорода при проникновении в их сварные швы совершенно различно. Например, сварной шов для низколегированных сталей класса прочности Х52 для труб содержит полигональный феррит и некоторое количество перлита, тогда как сварной шов для сталей класса прочности Х52 состоит из полигонального феррита, некоторых карбидных частиц и игольчатых частиц феррита. Хаотически распределенные частицы карбида уменьшают диффузию водорода, в результате чего сварные швы как низко-, так и высокопрочных сталей имеют более низкую диффузию водорода, чем базовые стали [4, 5].

Как указывалось ранее, атомы водорода из нескольких источников могут попасть в расплавленную сварочную ванну и остаться в зоне сварного шва [8]. Микроструктура сварных швов в основном содержит ферриты, такие как игольчатый феррит и полигональный феррит. Феррит обычно образует кристаллическую плоскость

(1 0 0), где энергетический барьер поглощения водорода составляет 0,38 эВ, что значительно ниже энергетического барьера 1,02 эВ на (1 1 0) кристаллическом месте бейнита, содержащегося в высокопрочных базовых сталях [4–8]. Более того, неметаллические включения, такие как Si/Al-O, содержащиеся в сварных швах, являются необратимыми ловушками водорода и эффективно улавливают подвижный водород в кристаллической решетке [4, 5]. Более высокая твердость включений, чем у базовой стали, вызывает искажение решетки, когда концентрация напряжений или деформаций еще больше способствует улавливанию водорода. Накопление водорода приводит к образованию молекул газобразного водорода, что приводит к повышению местного давления (напряжения). Тогда водород может уменьшить силу сцепления между атомами железа. Все они способствуют зарождению микротрещин, их распространению и замедленному хрупкому разрушению в сварных швах.

Представляют интерес значения диффузионно-подвижного водорода после вылеживания при отрицательных температурах (рис. 11–14). Принято считать, что границы зерен и границы раздела фаз могут служить эффективными ловушками водорода, собирающими и аккумулирующими атомы водорода. Однако было обнаружено, что коэффициент диффузии водорода вдоль сплошных границ зерен на шесть порядков выше, чем внутри зерен [5, 8]. Из проведенных нами экспериментов видно, что отрицательные температуры замедляют диффузию водорода и способствуют его локализации, повышению местного давления (напряжения), что увеличивает вероятность растрескивания сварного шва. По сравнению с другими мерами контроль содержания диффундирующего водорода более эффективен для снижения склонности к накоплению водорода. Одними из основных источников водорода, попадающего при сварке, являются влага воздуха и водородсодержащие сварочные электроды. Обязательная проковка электродов позволяет эффективно снизить попадание водорода в сварные швы. Применение влагостойких покрытий и оптимизация параметров дуговой сварки позволяют контролировать содержание водорода. Однако сварочные электроды обычно склонны к впитыванию влаги. Снижение скорости охлаждения сварной детали за счет увеличе-

ния подвода тепла может дать водороду больше времени для диффузии из сварных швов, уменьшая содержание водорода.

Заключение

В настоящей работе основной задачей исследования было провести сравнение сварочно-технологических свойств двух марок электродов, ТМУ-21У и ЦУ-5, изготавливаемых на разных заводах – ООО «Судиславский завод сварочных материалов», компанией ESAB – ООО «ЭСАБ-СВЕЛ», г. Санкт-Петербург, и электродов, производимых на ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург.

Установлено, что сварочно-технологические свойства электродов ТМУ-21У (изготовитель ООО «Судиславский завод сварочных материалов») и ЦУ-5 (изготовитель ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург) по такому параметру, как образование «козырька», находятся вне допуска.

Установлено, что химический состав наплавленного металла нестабилен у всех марок исследуемых электродов и зависит от производителя.

Установлено, что механические свойства наплавленного металла нестабильны по таким показателям, как значения предела прочности, предела текучести, а по относительному сужению не проходят по нормативным требованиям. Значения ударной вязкости находятся на минимально допустимой границе значений по нормативным документам.

Установлено, что при прокалке электродов содержание диффузионного водорода в наплавленном металле снижается почти в 2,5 раза, что также рекомендуется делать согласно РД 153-34.1-003-01(РТМ-1С) пункт 3.10 [1].

При сравнении содержания диффузионного водорода в электродах, изготовленных на разных заводах, наименьшее содержание водорода имеет металл, наплавленный электродами, изготавливаемыми на заводе ЗАО «Электродный завод», расположенном в Санкт-Петербурге. Наибольшее содержание водорода наблюдается при наплавке электродами компании ESAB – ООО «ЭСАБ-СВЕЛ», г. Санкт-Петербург. Меньшее процентное содержание водорода ведет к улучшению сварных характеристик и уменьшению риска образования сварных дефектов шва.

Список литературы

1. РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования (РТМ-1с): утв. приказом Минэнерго России от 02.07.01 № 197: введ. 01.01.2002 / ЗАО «Прочность МК». – М., 2002.
2. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.
3. Гежа В.В., Могильников В.А., Мельников П.В. Экспресс-методика определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 4 (112). – С. 17–22. – DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-17-22.
4. Совершенствование технологий производства сварочных электродов / А.В. Баранов, Ю.Д. Брусницын, Д.А. Кащенко, А.А. Боков // Автоматическая сварка. – 2005. – № 12. – С. 43–44.
5. Металлургия дуговой сварки: взаимодействие металла с газами / И.К. Походня, И.Р. Явдошин, А.П. Пальцевич, В.И. Швачко, А.С. Котельчук. – Киев: Наукова думка, 2004. – 445 с.
6. Изучение взаимодействия компонентов сварочных материалов с жидким стеклом / В.Т. Калинин, А.И. Николаев, В.В. Рыбин, Ю.Д. Брусницын, В.А. Малышевский, В.Б. Петров // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 3 (55). – С. 31–40.
7. Марченко А.Е., Скорина Н.В. Влияние технологических факторов изготовления низководородных электродов на содержание водорода в наплавленном металле // Автоматическая сварка. – 2013. – № 8 – С. 14–25.
8. Петров Г.Л. Сварочные материалы. – Л.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
9. Верхотуров А.Д., Бабенко Э.Г., Макиенко В.М. Методология создания сварочных материалов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – 128 с.
10. Взаимодействие компонентов электродных покрытий с жидким стеклом при нагревании / А.И. Николаев, С.И. Печенюк, Ю.П. Семушина, В.В. Семушин, Л.Ф. Кузьмич, Д.Л. Рогачев, Н.Л. Михайлова, Ю.Д. Брусницын, В.В. Рыбин // Сварочное производство. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
11. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник / под ред. Б.А. Колачева, Ю.В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
12. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, M.G. Shtayger, S.K. Kargapol'tsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin // IOP Conference Series: Materials Science and



Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012185. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.

13. Индуцированные водородом холодные трещины в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей (обзор) / И.К. Походня, А.В. Игнатенко, А.П. Пальцевич, В.С. Синюк // Автоматическая сварка. – 2013. – № 5. – С. 3–14.

14. Панченко О.В. К вопросу о методах определения диффузионного водорода // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 9. – С. 57–61.

15. ISO 3690:2000. Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in ferritic steel arc weld metal. – 36 p.

16. Standard methods for the determination of diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic, and ferritic steel weld metal produced by arc welding / American Welding Society, Committee on Filler Metal. – AWS, 1986.

17. JIS Z 3113. Method for measurement of hydrogen evolved from deposited metal / Japanese Standards Association. – JSA, 1975. – 3 p.

18. ГОСТ Р ИСО 2560–2023. Материалы сварочные. Электроды покрытые для ручной дуговой сварки нелегированных и мелкозернистых сталей. Классификация. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. – 36 с.

19. Jenkins N., Hart P.H.M.H., Parker D.H. An evaluation of rapid methods for diffusible weld hydrogen // Welding Journal. – 1997. – Vol. 76 (1). – P. 1–10.

20. Hydrogen determination in welded specimens by carrier gas hot extraction – a review on the main parameters and their effects on hydrogen measurement / M. Rhode, T. Schaupp, C. Muenster, T. Mente, T. Boellinghaus, T. Kannengiesser // Welding in the World. – 2019. – Vol. 63. – P. 511–526. – DOI: 10.1007/s40194-018-0664-9.

21. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – Т. 21 (6). – С. 85–95. – DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95.

22. Кархин В.А., Алдаие Я., Левченко А.М. Коэффициент диффузии водорода в свариваемых сталях // Сварка и диагностика. – 2021. – № 6. – С. 20–27.

23. Алдаие Я., Кархин В.А., Левченко А.М. Растворимость водорода в свариваемых сталях // Сварка и диагностика. – 2022. – № 3. – С. 25–31.

24. ГОСТ 34061-2017. Сварка и родственные процессы. Определение содержания водорода в наплавленном металле и металле шва дуговой сварки. – М.: Стандартинформ, 2020. – 31 с.

25. СТО 02494680-0056-2007. Слоистое разрушение сварных соединений строительных сварных

конструкций. Требования при проектировании, изготовлении и монтаже. Приложение Г (справочное): Определение начального содержания диффузионного водорода в металле шва методом «карандашной» спиртовой (глицериновой) пробы (краткое описание). – М.: ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 2007. – С. 32–33.

26. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126 (1). – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

27. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.

28. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

29. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194 (2). – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

30. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeebe, P.Yu. Skeebe, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87 (8). – P. 082061. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

31. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

32. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионностойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

33. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

34. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) / A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, A.I. Karlina // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 22. – P. 66–71. – DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.12.
35. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill / R.R. Adigamov, K.A. Baraboshkin, P.A. Mishnev, A.I. Karlina // CIS Iron and Steel Review. – 2022. – Vol. 24. – P. 60–66. – DOI: 10.17580/cisirs.2022.02.09.
36. Determination of rail steel structural elements via the method of atomic force microscopy / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, V.V. Kondratyev, A.I. Karlina // CIS Iron and Steel Review. – 2022. – Vol. 23. – P. 86–91. – DOI: 10.17580/cisirs.2022.01.16.
37. *Padhy G.K., Komizo Y.* Diffusible hydrogen in steel weldments: A status review // Transactions of JWRI. – 2013. – Vol. 42 (1). – P. 39–62.
38. *Mente T., Boellinghaus T., Schmitz-Niederau M.* Heat treatment effects on the reduction of hydrogen in multi-layer high-strength weld joints // Welding in the World. – 2012. – Vol. 56. – P. 26–36. – DOI: 10.1007/BF03321362.
39. *Schaupp T., Rhode M., Kannengiesser T.* Influence of welding parameters on diffusible hydrogen content in high-strength steel welds using modified spray arc process // Welding in the World. – 2018. – Vol. 62. – P. 9–18. – DOI: 10.1007/s40194-017-0535-9.
40. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
41. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off / M.G. Shtayger, A.E. Balanovskiy, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012190. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov











Assessment of welding engineering properties of basic type electrode coatings of different electrode manufacturers for welding of pipe parts and assemblies of heat exchange surfaces of boiler units



Yulia Karlina^{1, a, *}, Roman Kononenko^{2, b}, Maksim Popov^{2, c}, Fedor Derjugin^{2, d}, Vladislav Byankin^{2, e}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>,  jul.karlina@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>,  istu_politeh@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-2387-9620>,  popovma.kvantum@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0009-0004-4677-3970>,  deryugin040301@yandex.ru;

^e  <https://orcid.org/0009-0007-0488-2724>,  borck3420@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 March 2024

Revised: 03 April 2024

Accepted: 29 April 2024

Available online: 15 June 2024

Keywords:

Welding

Pipes

Pipe parts

Welding electrodes

Hydrogen

Strength

Cracks

ABSTRACT

Introduction. New grades of high-strength steels, machining and repair processes are being introduced in the power industry. At the same time manual arc welding remains the main technological process for equipment repair in conditions of thermal power plants. Welding materials used in equipment repair should provide comparable to the base metal mechanical properties of the weld. The welding industry has long faced the problem of high sensitivity of basic type electrodes to moisture absorption. High susceptibility to cold cracking caused by diffusible hydrogen and hydrogen embrittlement are major obstacles to the wider use of basic-type electrodes for high-strength steels. Hydrogen production during arc welding is the result of the presence of hydrogen in the arc atmosphere, hydrogen-contaminated filler material, or local hydrogen residues on the source material. During welding, molecular hydrogen is dislocated by the arc energy and then easily absorbed by the molten material. Currently, the welding materials market produces electrodes with basic coating of well-known and proven brands, various national and foreign manufacturers. However, in practice there are cases of cold cracks in the weld seam after welding. **Purpose of work** is to assess the welding and technological properties of basic type electrode coatings of different manufacturers. The work investigates specimens weld overlaid with electrodes *TMU-21U*, *TSU-5* of different manufacturers and the content of diffusion-mobile hydrogen in the weld overlaid metal is determined. The methods of research are mechanical static tensile tests, chemical composition analysis and metallographic studies. Determination of welding-induced hydrogen content can be accomplished by various quantitative elemental analysis methods. All test methods involve welding under defined conditions followed by deep freezing of the test specimens as quickly as possible. In this way, unintended diffusion processes are inhibited and the hydrogen introduced into the weld metal is retained. Subsequently, the diffusing hydrogen is desorbed from the test specimens in a controlled manner. **Results and Discussion.** An assessment of welding engineering properties of the electrodes revealed unstable arc burning. Mechanical properties of the welded metal of the investigated electrodes are at the minimum permissible level from the requirements of normative documents. The concentration of hydrogen present in the arc weld metal is multifactorially dependent on the welding procedure (process and parameters, consumables used, as well as environmental conditions (e.g. humidity). For qualitative assessment, hydrogen content of more than 15 cm³/100 g is considered high and hydrogen content less than 5 cm³ ml/100 g is considered very low. **Presented results.** The conducted evaluation of welding engineering properties of electrodes with basic coating showed satisfactory results. Mechanical properties of the welded metal in terms of impact toughness are at the lower permissible limit, relative elongation does not meet the requirements of normative documents. The content of diffusion-mobile hydrogen in the welded metal is higher than the declared indicators by the electrode manufacturers.

For citation: Karlina Y.I., Kononenko R.V., Popov M.A., Deryugin F.F., Byankin V.E. Assessment of welding engineering properties of basic type electrode coatings of different electrode manufacturers for welding of pipe parts and assemblies of heat exchange surfaces of boiler units. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 71–94. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-71-94. (In Russian).

* Corresponding author

Karlina Yulia I., Ph.D. (Engineering), Research Associate
 National Research Moscow State Construction University,
 Yaroslavskoe shosse, 26,
 129337, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 914 879-85-05, **e-mail:** jul.karlina@gmail.com

References

1. RD 153-34.1-003-01. *Svarka, termoobrabotka i kontrol' trubnykh sistem kotlov i truboprovodov pri montazhe i remonte energeticheskogo oborudovaniya (RTM-Is)* [Regulating document 153-34.1-003-01. Welding, heat treatment and control of pipe systems of boilers and pipelines during installation and repair of power equipment (RTM-Is)]. Moscow, 2002.
2. Makarov E.L. *Kholodnye treshchiny pri svarke legirovannykh stalei* [Cold cracks in welding of alloy steels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 248 p.
3. Gezha V.V., Mogilnikov V.A., Melnikov P.V. Ekspress-metodika opredeleniya soderzhaniya diffuzionnogo vodoroda v naplavlennom metalle [Express method for determining the content of diffusive hydrogen in deposited metal]. *Voprosy materialovedeniya*, 2022, no. 4 (112), pp. 17–22. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-17-22. (In Russian).
4. Baranov A.V., Brusnitsyn Yu.D., Kashchenko D.A., Bokov A.A. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva svarochnykh elektrodov [Improvement of welding electrodes production technologies]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2005, no. 12, pp. 43–44.
5. Pokhodnya I.K., Yavdoshechin I.R., Paltsevich A.P., Shvachko V.I., Kotelchuk A.S. *Metallurgiya dugovoi svarki: vzaimodeistvie metalla s gazami* [Metallurgy of arc welding: interaction of metal with gases]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2004. 445 p.
6. Kalinnikov V.T., Nikolaev A.I., Rybin V.V., Brusnitsin Yu.D., Malyshevsky V.A., Petrov V.B. Izuchenie vzaimodeistviya komponentov svarochnykh materialov s zhidkim steklom [Study of interaction between welding consumables and liquid glass]. *Voprosy materialovedeniya*, 2008, no. 3 (55), pp. 31–40.
7. Marchenko A.E., Skorina N.V. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov izgotovleniya nizkovodorodnykh elektrodov na soderzhanie vodoroda v naplavlennom metalle [Influence of technological factors of low-hydrogen electrodes manufacturing on hydrogen content in the welded metal]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2013, no. 8, pp. 14–25.
8. Petrov G.L. *Svarochnye materialy* [Welding materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 280 p.
9. Verkhotur A.D., Babenko E.G., Makienko V.M. *Metodologiya sozdaniya svarochnykh materialov* [Methodology of welding materials creation]. Khabarovsk, DVGUPSS Publ., 2009. 128 p.
10. Nikolaev A.I., Pechenyuk S.I., Semushina Yu.P., Semushin V.V., Kuzmich L.F., Rogachev D.L., Mikhailova N.L., Brusnitsyn V.V., Rybin Yu.D. Vzaimodeistvie komponentov elektrodnykh pokrytii s zhidkim steklom pri nagrevanii [Interaction of components of electrode coatings with liquid glass during heating]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2009, no. 11, pp. 13–17. (In Russian).
11. Levinskii Yu.V., Kolachev B.A., eds. *Konstanty vzaimodeistviya metallov s gazami* [Constants of interaction of metals with gases]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 368 p.
12. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapol'tsev S.K., Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Sivtsov A.V., Nebogin S.A. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012185. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.
13. Pokhodnya I.K., Ignatenko A.V., Paltsevich A.P., Sinyuk V.S. Indutsirovannye vodorodom kholodnye treshchiny v svarnykh soedineniyakh vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stalei (obzor) [Hydrogen-induced cold cracks in welded joints of high-strength low-alloyed steels (review)]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2013, no. 5, pp. 3–14. (In Russian).
14. Panchenko O.V. K voprosu o metodakh opredeleniya diffuzionnogo vodoroda [On the problem of methods for determining diffusible hydrogen]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 9, pp. 57–61.
15. ISO 3690:2000. *Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in ferritic steel arc weld metal*. 36 p.
16. American Welding Society, Committee on Filler Metal. *Standard methods for the determination of diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic, and ferritic steel weld metal produced by arc welding*. AWS, 1986.
17. JIS Z 3113. *Method for measurement of hydrogen evolved from deposited metal*. Japanese Standards Association, 1975. 3 p.
18. GOST R ISO 2560–2023. *Materialy svarochnye. Elektrody pokrytye dlya ruchnoi dugovoi svarki nelegirovannykh i melkozernistykh stalei. Klassifikatsiya* [State standard R ISO 2560–2023. Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of non-alloy and fine grain steels. Classification]. Moscow, Russian Institute of Standardization Publ., 2023. 36 p.

19. Jenkins N., Hart P.H.M.H., Parker D.H. An evaluation of rapid methods for diffusible weld hydrogen. *Welding Journal*, 1997, vol. 76 (1), pp. 1–10.
20. Rhode M., Schaupp T., Muenster C., Mente T., Boellinghaus T., Kannengiesser T. Hydrogen determination in welded specimens by carrier gas hot extraction – a review on the main parameters and their effects on hydrogen measurement. *Welding in the World*, 2019, vol. 63, pp. 511–526. DOI: 10.1007/s40194-018-0664-9.
21. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruksionnykh staley [Diffusion of hydrogen in welded joints of structural steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21 (6), pp. 85–95. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95.
22. Karkhin V.A., Aldaie Ya., Levchenko A.M. Koeffitsient diffuzii vodoroda v svarivaemykh stalyakh [Hydrogen diffusion coefficient in welded steels]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2021, no. 6, pp. 20–27.
23. Aldaie Ya., Karkhin V.A., Levchenko A.M. Rastvorimost' vodoroda v svarivaemykh stalyakh [Hydrogen solubility in welded steels]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2022, no. 3, pp. 25–31.
24. GOST 34061–2017. *Svarka i rodstvennye protsessy. Opredelenie soderzhaniya vodoroda v naplavlennom metalle i metalle shva dugovoi svarki* [State standard 34061–2017. Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in deposited metal and arc weld metal]. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 31 p.
25. STO 02494680-0056-2007. *Sloistoe razrushenie svarnykh soedinenii stroitel'nykh svarnykh konstruksii. Trebovaniya pri proektirovanii, izgotovlenii i montazhe. Prilozhenie G (spravochnoe): Opredelenie nachal'nogo soderzhaniya diffuzionnogo vodoroda v metalle shva metodom «karandashnoi» spirtovoi (glitserinovoi) proby (kratkoe opisanie)* [Layered destruction of welded joints of building welded structures. Requirements for design, manufacturing and installation. Appendix G (for reference): Determination of the initial content of diffusion hydrogen in the weld metal using the “pencil” alcohol (glycerin) test (brief description)]. Moscow, TsNIIPSK im. N.P. Melnikova Publ., 2007, pp. 32–33.
26. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyskin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126 (1), p. 012016. DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.
27. Efremkov E.A., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (1), p. 5. DOI: 10.3390/app12010005.
28. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
29. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194 (2), p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.
30. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Skeebe P.Yu., Khlebova I.V. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87 (8), p. 082061. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.
31. Skeebe V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metallobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
32. Borisov M., Lobanov D., Yanyushkin A., Skeebe V. Issledovanie protsessa avtomaticheskogo upravleniya smenoi polyarnosti toka v usloviyakh gibridnoi tekhnologii elektrokhimicheskoi obrabotki korrozionnostoikikh staley [Investigation of the process of automatic control of current polarity reversal in the conditions of hybrid technology of electrochemical processing of corrosion-resistant steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.
33. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.
34. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina A.I. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 66–71. DOI: 10.17580/cisr.2021.02.12.

35. Adigamov R.R., Baraboshkin K.A., Mishnev A., Karlina A.I. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill. *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 24, pp. 60–66. DOI: 10.17580/cisir.2022.02.09.
36. Balanovskiy A.E., Shtayger M.G., Kondratyev V.V., Karlina A.I. Determination of rail steel structural elements via the method of atomic force microscopy. *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 23, pp. 86–91. DOI: 10.17580/cisir.2022.01.16.
37. Padhy G.K., Komizo Y. Diffusible hydrogen in steel weldments: A status review. *Transactions of JWRI*, 2013, vol. 42 (1), pp. 39–62.
38. Mente T., Boellinghaus T., Schmitz-niederau M. Heat treatment effects on the reduction of hydrogen in multi-layer high-strength weld joints. *Welding in the World*, 2012, vol. 56, pp. 26–36. DOI: 10.1007/BF03321362.
39. Schaupp T., Rhode M., Kannengiesser T. Influence of welding parameters on diffusible hydrogen content in high-strength steel welds using modified spray arc process. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, pp. 9–18. DOI: 10.1007/s40194-017-0535-9.
40. Balanovskiy A.E., Shtayger M.G., Karlina A.I., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
41. Shtayger M.G., Balanovskiy A.E., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina A.I., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012190. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).