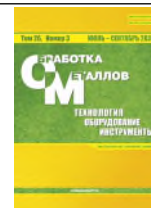




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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

Оценка возможности контактно-стыковой сварки оплавлением труб из теплоустойчивой стали 15X5M

*Юлия Карлина^{1, а, *}, Владимир Конюхов^{2, б}, Татьяна Опарина^{2, с}*¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия² 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/0000-0001-9137-9404>, konyukhov_vyu@mail.ru;^с <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>, martusina2@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 622.691

История статьи:

Поступила: 09 июня 2024

Рецензирование: 17 июня 2024

Принята к печати: 28 июня 2024

Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Послесварочная термообработка

Отжиг для снятия напряжений

Отпуск, нормализация, термообработка

Сварное соединение

Неоднородная микроструктура

Твердость

Свойства

Контактно-стыковая сварка

АННОТАЦИЯ

Введение. Cr-Mo-стали используются при высоких температурах и давлениях, в том числе в критических компонентах современных сверхкритических и ultrasверхкритических тепловых электростанций. Благодаря уникальной способности выдерживать высокие температуры и давления эти стали также используются в критически важных компонентах ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Неоднородность микроструктуры и механических свойств по всему сварному соединению является решающим фактором, приводящим к снижению его работоспособности и преждевременному выходу из строя. Послесварочная термообработка является основным методом улучшения механических свойств. Однако механизм эволюции механических свойств, связанных с неоднородной микроструктурой, после термообработки остается неясным, что затрудняет проектирование процесса термообработки и комплексную оценку его эффекта. **Цель работы:** провести оценку возможности контактно-стыкового способа сварки труб из стали 15X5M, подобрать технологические параметры при контактно-стыковой сварке труб с получением высоких показателей механических свойств. **Методы исследования.** Эксперименты выполнялись на контактно-стыковой машине МСО-201Н. Были проведены механические испытания на статистическое растяжение, анализ химического состава и металлографические исследования. **Результаты и обсуждение.** Технологические параметры контактно-стыковой сварки оплавлением труб, изменяемые в ходе наших исследований, показывают, что давление осадки и припуск на искрение влияют на конечные прочностные свойства сварного стыка. По результатам металлографических исследований можно отметить особенности эволюции микроструктуры. Заметное снижение содержания первичного огрубевшего феррита наблюдается в структуре сварного шва после отпускной термообработки. Применение послесварочной термообработки позволило уменьшить твердость в сварном стыке до уровня нормативных требований. **Представленные результаты.** Влияние термообработки на механические свойства анализируется на основе сравнения режимов термообработки отпуска для снятия напряжений и нормализации с отпуском с точки зрения повышения механических свойств при испытаниях на растяжение. Результаты показывают, что после отпускной термообработки эволюция механических свойств в каждой подзоне сварного соединения является последовательной, т. е. твердость и прочность на разрыв уменьшаются, а ударная вязкость увеличивается. Примечательно, что наиболее существенное повышение вязкости наблюдается в зоне сварного шва, прежде всего за счет значительного уменьшения присутствия доэвтектоидного феррита.

Для цитирования: Карлина Ю.И., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Оценка возможности контактно-стыковой сварки оплавлением труб из теплоустойчивой стали 15X5M // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 79–93. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-79-93.

Введение

Для эксплуатации электростанции при повышенной температуре и давлении существенно возрастает потребность в материале с высокой

длительной прочностью, высокой теплопроводностью и высокой коррозионной стойкостью [1–8]. Многочисленные важные компоненты теплоэлектростанций, например паропроводы, котлы, теплообменники и другие, работают при повышенных температурах и высоких давлениях. Следовательно, эти компоненты должны быть устойчивы к ползучести и коррозии на протяжении всего срока службы 30–40 лет. За последние полвека рабочая температура пара

*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

в котле выросла с 450 до 568 °С, а давление – примерно в шесть раз, до 25 МПа, что увеличивает мощность котла. Оборудование, используемое для изготовления котла, состоит из коллектора и труб различной конструкции. Для таких компонентов, как сосуды под давлением, требуется низкая температура воды и пара. Сосуды под давлением в основном подвергаются воздействию пара и воды от котла, а также дымовых газов от экономайзеров, стенок печи, подогревателей и пароперегревателей. Компоненты в основном изготавливаются из стальных труб небольшого диаметра.

Повышение теплового КПД электростанций за счет увеличения рабочей температуры и давления пара, поступающего в турбину, привело к разработке новейшей категории жаропрочных сталей. Наиболее часто используемыми материалами на электростанциях, работающих при высоких температурах и высоком давлении, являются ферритная/мартенситная сталь с повышенной стойкостью к ползучести, суперсплавы на основе никеля и аустенитная нержавеющая сталь [1–5]. Потенциальными материалами-кандидатами для ультрасверхкритических электростанций являются сплавы на основе Ni, такие как сплав инокель 617, сплав 625 и сплав 740 [3, 4]. Эти сплавы на основе Ni обладают превосходной коррозионной стойкостью, хорошей стойкостью к окислению и высоким пределом ползучести при температуре 650 °С. Однако поскольку Ni, Cr и Mo являются ключевыми легирующими элементами в этих сплавах, то сплавы на основе Ni дорогостоящие [5–9]. Кроме того, они технически сложны в изготовлении.

В середине 1960-х годов стали с содержанием 12 % CrMoV были разработаны для изготовления тонкостенных и толстостенных компонентов электростанций. Рабочая температура таких компонентов составляла 565 °С. Предел ползучести сталей с содержанием 12 % CrMoV был получен путем упрочнения твердого раствора и дисперсионного упрочнения. В современных котлах используются хромомолибденовые стали 5Cr-1Mo, 9Cr-1Mo, модифицированные стали 9Cr-1Mo с Nb, V, W или 12Cr, обладающие лучшими термическими и механическими свойствами по сравнению с аустенитными нержавеющими сталями серии 300.

Отечественные аналоги – сталь 15X5M и ее модификации 15X5МФ и 12X8ВФ [10, 11]. Хром (Cr), вольфрам (W) и молибден (Mo) являются основными легирующими элементами, присутствующими в стали и обеспечивающими лучшее сопротивление ползучести при повышенных температуре и давлении. Прочность хромомолибденовых сталей обусловлена высокой плотностью дислокаций. Материалы размягчаются по мере уменьшения плотности дислокаций – например, когда дислокации движутся, встречаются и аннигилируют друг друга. Стали с содержанием Cr от 2–13 % сохраняют плотность дислокаций при высоких температурах и, следовательно, прочность, поскольку микроструктура замедляет движение дислокаций. Дислокациям трудно пересечь границы зерен, а карбиды и выделения по границам зерен относительно неподвижны и вызывают закрепление дислокаций, как показано в работах [2–5].

Ползучесть – это термически активируемый процесс. Его определяют как медленную нестационарную деформацию материала под действием постоянной нагрузки. Требования к высокой рабочей температуре и давлению, предъявляемые к современному энергоблоку, приводят к разработке ферритных и мартенситных сталей с повышенной стойкостью к высокотемпературной ползучести (CSEF). Для атомных и тепловых электростанций ферритные стали с повышенной прочностью ползучести (CSEF) считаются лучшим материалом по сравнению с аустенитной нержавеющей сталью из-за ее низкого коэффициента теплового расширения, хорошей теплопроводности и высокой прочности при ползучести. Ползучесть возникает вследствие длительного воздействия на материал постоянного приложенного напряжения ниже предела текучести материала. Необходимо знать механические свойства стали, включая снижение модуля Юнга, предел текучести и снижение предела прочности при различных уровнях напряжения и повышенных температурах. Чтобы выявить механические свойства при повышенных температурах, необходимо установить взаимосвязи «напряжение – деформация». В настоящее время для изменения механических свойств при высоких температурах используются испытания как в установившемся состоянии, так и в переходном. При этом зависящие от температу-

ры физические механизмы, такие как объемная диффузия, дислокации скольжения и переползания, являются реакцией на явления ползучести в кристаллическом материале.

Сварка плавлением (ручная дуговая, в защитных газах, под слоем флюса) – это обычно используемый процесс сварки стали 15X5М и ее модификаций 15X5МФ и 12X8ВФ, который включает в себя интенсивное тепловложение и его рассеивание за счет теплопроводности в основной металл [6–9]. Предварительный нагрев при сварке теплоустойчивых сталей, склонных к закалке, помогает обеспечить качество сварного шва и снижает вероятность образования трещин. Перед сваркой труб или пластин из стали толщиной до 20 мм и более в цехах или на местах, как правило, используется предварительный нагрев до 300...450 °С [11–18]. За процессом сварки обычно следует индукционная термообработка с целью замены грубой микроструктуры, связанной с подводом большого количества тепла во время операции соединения, более мелкими зернами предварительного аустенита и мелкими ферритными фазами.

Это связано с тем, что микроструктура, прилегающая к зоне сплавления, при быстром охлаждении трансформируется в такие твердые фазы, как мартенсит и бейнит. Эти твердые фазы приводят к низкой ударной вязкости и высоким показателям твердости материала из-за содержания значительного количества остаточных напряжений. Таким образом, для сварных швов труб необходим дополнительный цикл послесварочной термообработки, чтобы восстановить механические свойства и снизить вероятность хрупкого разрушения в зоне соединения. Наиболее широко используемым режимом послесварочной обработки является цикл нормализации. Нормализующая обработка позволяет значительно улучшить характеристики выравнивания сварного шва, однако параметры процесса включают в себя максимальную температуру нагрева, скорость нагрева, время выдержки и начальную температуру водяного охлаждения. Помимо нормализующей обработки для повышения ударной вязкости трубопровода проводят вторичную нормализацию, закалку и отпуск, закалку и другие термомеханические обработки [4, 12–19].

Хотя сварка сталей с высоким содержанием хрома стала хорошо известным методом, кото-

рый широко используется в традиционной энергетике, характеристики сварных швов сталей с высоким содержанием Cr и Cr-Mo по-прежнему часто считаются фактором, ограничивающим срок службы при высоких температурах. Фактически высокий процент отказов в энергетике, как сообщается, связан со сваркой [4–9]. Более того, несмотря на обширный опыт сварки сталей с высоким содержанием хрома, многие сертифицированные процедуры сварки были разработаны для конкретных применений, а условия окружающей среды новых применений могут сильно повлиять на сварной шов.

В работе [19] проведен анализ на основе мирового опыта отказов по причине неправильного способа термообработки теплоустойчивых сталей после сварки. Делается вывод, что повреждение ползучести и наблюдаемые механизмы растрескивания возникли в результате высокой степени механического напряжения, испытываемого разрушенной трубой в зоне термического влияния (ЗТВ), непосредственно прилегающей к сварному шву трубы [20].

Одним из решений этой проблемы является разработка нового материала, микроструктура в ЗТВ которого аналогична микроструктуре основного металла. Это было достигнуто, например, за счет добавления бора [5–7]. Для достижения хорошего качества сварных соединений используются несколько эффектов: оптимизация процедуры и параметров сварки, разработка подходящего присадочного металла и применение послесварочной термообработки. В настоящее время проводятся исследования по разработке новых процессов сварки (лазерной, электронно-лучевой, сварки трением) для улучшения характеристик стали 15X5М и ее модификаций 15X5МФ и 12X8ВФ; это является перспективным направлением [6–9, 12–33].

Например [22], стыковая сварка магнитно-импульсной дугой (МИАВ) – метод соединения, который заменяет традиционные методы сварки, такие как контактная сварка, сварка трением, оплавление и стыковая сварка. Это твердотельный процесс, при котором вращающаяся дуга нагревает торцы трубок, после чего следует процессковки, завершающий соединение заготовок. Плотность магнитного потока и ток взаимодействуют, создавая силу Лоренца, которая заставляет дугу двигаться вдоль прилегающих

поверхностей. Установлено, что этот процесс обеспечивает высокую прочность на разрыв и бездефектные сварные швы в черных материалах, и по этой причине он преимущественно используется в автомобильной промышленности для соединения металлических труб. Кроме того, эту процедуру соединения можно применять при изготовлении котлов, теплообменников, печных трубопроводов в нефтехимической промышленности и при производстве других критически важных для безопасности деталей машин высокого давления. Применяя сварку (МІАВ), можно за 10...15 с выполнять соединения труб наружным диаметром от 75 до 450 мм и толщиной стенки до 10...35 мм [22].

Однако, как считают многие исследователи [1, 5, 8, 9, 15], работники электростанций могут медлить с внедрением новых материалов и новых методов сварки по ряду причин, включая разработку новых отраслевых норм и стандартов [11], а также уверенность в долговременной работе уже смонтированных сварных узлов в машинах и механизмах.

В то же время хорошо известный способ – контактно-стыковая сварка труб оплавлением – широко применяется в котлостроении, трубопроводном строительстве и производстве нефтяного оборудования. В зависимости от сечения и материала трубы выбирается непрерывная или оплавляющая сварка с предварительным подогревом.

В данной статье представлены результаты исследований по контактно-стыковой сварке оплавлением труб из стали 15Х5М. **Цель работы:** провести оценку возможности контактно-стыкового способа сварки труб из стали 15Х5М и подобрать технологические параметры контактно-стыковой сварки труб с получением высоких показателей механических свойств.

Материалы и методы исследований

Базовым материалом, использованным в данном исследовании, была бесшовная труба наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Материалом труб служила сталь 15Х5М (табл. 1), поставляемая в нормализованном и отпущенном состоянии в соответствии с ГОСТ 550–75. При анализе химического состава материалов труб использовались следующие средства измерений и испытательное оборудование: спектрометр рентгеновский СРМ-25 и экспресс-анализатор на углерод АН-7529. Механические свойства в состоянии поставки представлены в табл. 2. Для определения механических свойств стали из образца труб было отобрано три пробы в соответствии с отраслевыми нормативами [11].

Для сварки использовали машину контактной стыковой сварки МСО-201Н, сила сварочного тока составляла 7400...8000 А. Процесс контактной сварки труб показан на рис. 1.

В ходе проведения исследований рассматривали образцы после сварки и после дополнительной термообработки. Режимы термообработки образцов сваренных труб: температура нормализации 950...1000 °С, отпуска – 780...800 °С. Термообработка проводилась на индукционной установке МГЗ-102 с частотой тока 2500 Гц в кольцевом разъемном одновитковом индукторе с внутренним диаметром 40 мм и шириной 30 мм. Режимы отпуска (температура 500...600 °С) подбирались экспериментальным путем за счет изменения силы тока в диапазоне 25...30 А и регулировки напряжения возбуждения генератора 180...200 В, при этом мощность составляла 5...6 кВт. В режиме проведения нормализации (850...1000 °С) сила тока была в диапазоне 50...60 А, напряжение возбуждения генератора 350...370 В, мощность составляла

Таблица 1

Table 1

Химический состав труб для сварки
Chemical composition of pipes for welding

Марка стали / Steel grade	Содержание элементов, % / Elemental content, %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
15Х5М по ГОСТ 20072–74 / 0.15C-5Cr-Mo According to GOST 20072-74	< 0,15	< 0,5	< 0,5	4,5...6,0	0,45...0,60	<< 0,6	< 0,025	< 0,030
По факту / In fact	0,1	0,35	0,22	5,51	0,52	0,35	0,012	0,012

Механические свойства трубы из стали 15X5M**Mechanical properties of 0.15C-5Cr-Mo steel pipe**

Сортамент / Assortment	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа, не менее / Yield strength, $\sigma_{0,2}$, МПа, min	Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа, не менее / Ulti- mate strength, σ_B , МПа, min	Относительное удлинение при разрыве, δ_5 , %, не менее / Percentage elongation, δ_5 , %, min	Относительное сужение, ψ , %, не менее / Percentage reduction of area, ψ , %, min	Твер- дость, НВ, не более / Hardness, HB, max
Труба по ГОСТ 550–75 / Pipe according to GOST 550-75	216	421	22	50	170
По факту / In fact	220	450	25	54	128



Рис. 1. Сварка труб на установке МСО-201Н

Fig. 1. Pipe welding on the MCO-201H machine

17,5...22,2 кВт. Влияние параметров сварки на термические циклы сварного шва, микроструктуру и механические свойства соединений исследовали путем изменения давления осадки, припуска осадки и времени тока осадки при условии постоянства основных параметров. Эффективность и характер разрушения различных сварных труб оценивались путем проведения испытаний на механическое растяжение на электромеханической испытательной машине Instron грузоподъемностью 1000 кН. Твердость согласно требованиям ГОСТ на теплоустойчивые стали определяли на твердомере Бринелля ИТБ-3000-III-АЖП. Сварные образцы подвергались испытанию на сплющивание и загиб, которое являлось испытанием контроля качества для оценки пластичности и целостности сты-

кового сварного соединения. Микроструктуры определяли с помощью оптического микроскопа MET-2 и растрового электронного микроскопа JEOL JIB-4501, оснащенного спектрометром энергодисперсионной спектроскопии (EDS) модели Bruker X / Flash 6/60 и X-спектрометром, а также оснащенного детектором дифракции обратного рассеяния электронов (EBSD). Полученные данные были проанализированы с помощью программного обеспечения HKL Channel 5.

Результаты исследований

Основной металл (рис. 2) по структуре содержит феррит и равномерно по всей площади шлифа – зернистые карбиды в виде включений до 1 мкм. Известно, что часть молибдена находится в феррите, в карбидах находятся хром и углерод, именно этот факт обеспечивает теплоустойчивость стали [1–5]. Было замечено, что основной материал состоит в основном из зерен α -феррита с распределенным вокруг него некоторым количеством Fe_3C . Зона термического влияния представляла собой область, в которой повышенная температура была достаточно высокой (но ниже температуры плавления), чтобы изменить микроструктуру. Во время сварки основной материал из-за повышенной температуры трансформировался в более мелкие равноосные зерна в зоне ЗТВ. Новые зерна зарождались и росли на границах зерен. Однако кратковременность процесса сварки ограничивала рост зерна.

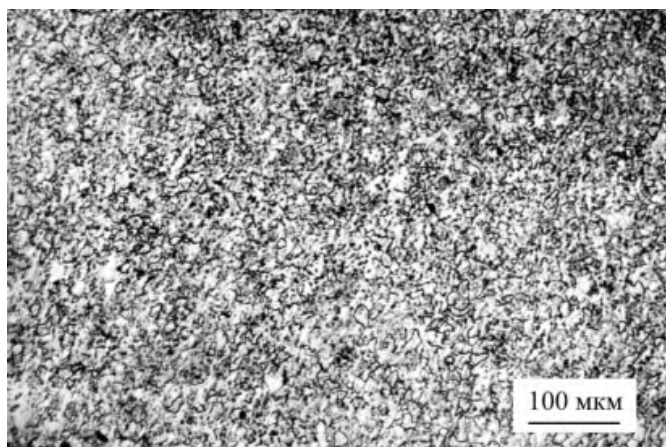


Рис. 2. Микроструктура основного металла

Fig. 2. Base metal microstructure

В сварных трубах без термообработки в зоне сварного стыка на расстоянии по 7 мм в обе стороны основная структура – сорбит, имеются также отдельные области игольчатого бейнита (рис. 3). Как и ожидалось, размер зерен вблизи линии сплавления был значительно больше, чем в удаленной зоне. Особенностью бейнитного феррита было то, что феррит рос от границы зерен предшествующего аустенита к внутреннему зерну и образовывал параллельные рейки. Бейнитный феррит возник в результате смеси сдвиговых и диффузионных превращений при высокой скорости охлаждения. Твердость металла составляет 295...321 НВ.

В переходной зоне к основному металлу на расстоянии 10...12 мм находится структура сорбита и феррита (рис. 4). Микроструктура представляет собой равноосную мелкозернистую

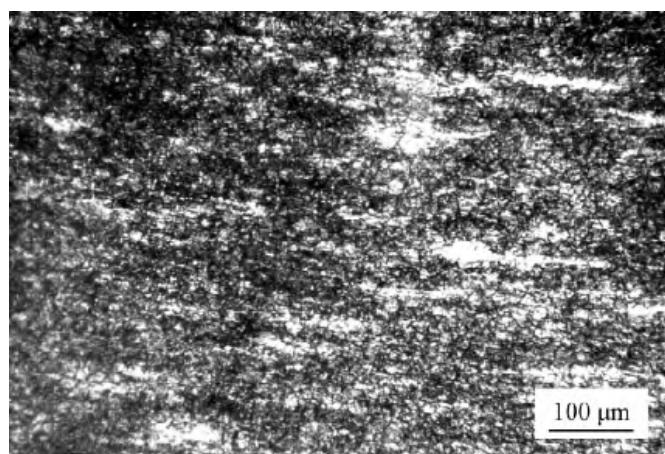


Рис. 4. Микроструктура металла в переходной зоне к основному металлу

Fig. 4. Microstructure of metal in the transition zone to the base one

микроструктуру вследствие динамической рекристаллизации. При этом размер ферритного зерна по сравнению с основным металлом уменьшился с 25 мкм примерно до 4 мкм, а твердость снизилась до 180...235 НВ. По мере продвижения (при исследовании на оптическом микроскопе) по ЗТВ к основному металлу структура сорбита и феррита плавно переходит в структуру основного металла «феррит + зернистые карбиды» (рис. 2).

После местной термообработки сварного стыка в режиме отпуска по линии сплавления формируется структура «феррит + сорбит» (рис. 5). Протяженность этой зоны 0,5 мм. Твердость в этой зоне 134...150 НВ.

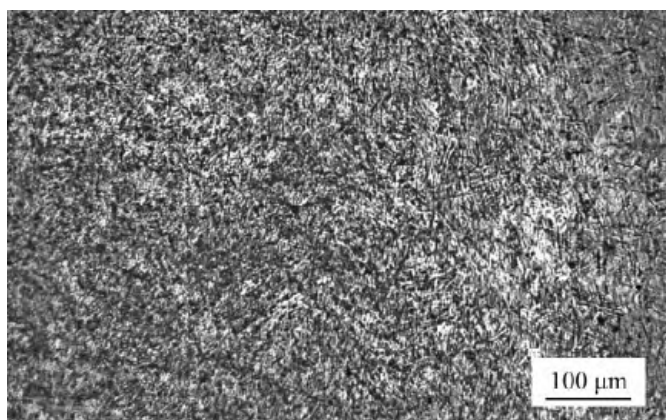


Рис. 3. Микроструктура металла сварных труб в зоне стыка на расстоянии по 7 мм

Fig. 3. Microstructure of welded pipe metal in the joint zone at a distance of 7 mm each

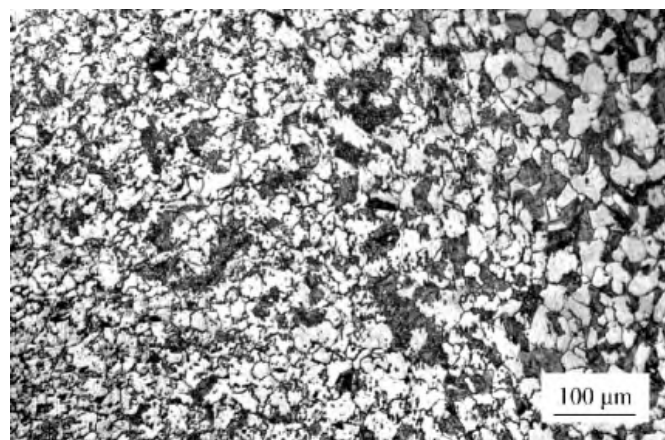


Рис. 5. Микроструктура металла в районе стыка после отпуска

Fig. 5. Microstructure of metal in the joint area after tempering

После местной термообработки сварного стыка по режиму «нормализация + отпуск» структуры в зоне стыка (рис. 6) и ЗТВ по 15 мм от оси состоят из сорбита и поля феррита с твердостью в этой зоне 207...212 НВ. В этой области происходит снижение значений твердости из-за присутствия феррита.

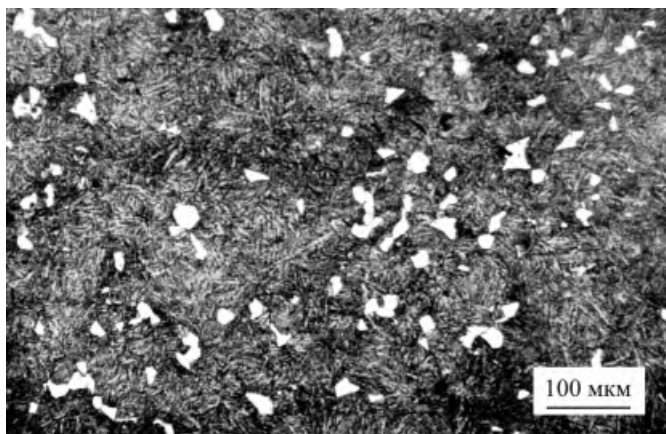


Рис. 6. Микроструктура металла в зоне термического влияния после нормализации и отпуска

Fig. 6. Microstructure of metal in HAZ after normalization and tempering

На рис. 7 показано распределение твердости по сварному стыку после сварки, после сварки и отпуска, а также после сварки и комплексной термообработки «нормализация + отпуск». Видно, что термообработка сварного стыка существенно снижает твердость.

На рис. 8 визуальны показаны результаты испытаний на сплющивание и изгиб сварных образцов. Как сварной, так и образец основного

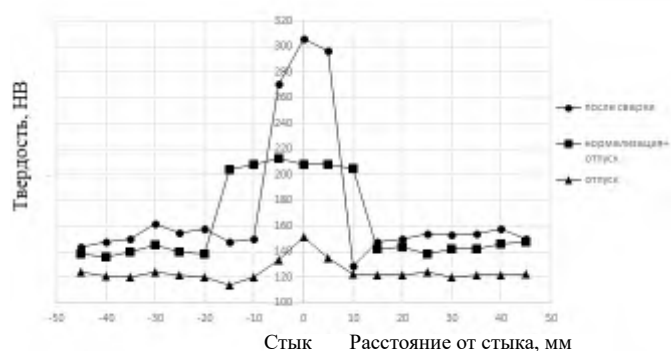


Рис. 7. Распределение твердости по сварному стыку после различных обработок

Fig. 7. Hardness distribution in the welded joint after various treatment modes

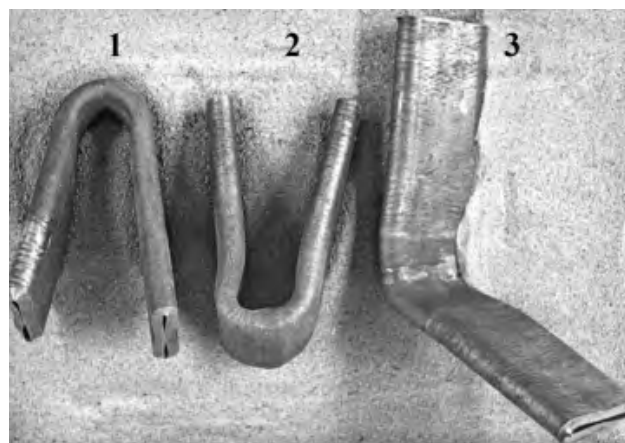


Рис. 8. Сварные стыки труб после испытания на сплющивание + изгиб:

1 – исходная труба; 2 – сваренная труба в состоянии после отпуска; 3 – сваренная труба в состоянии после нормализации с отпуском

Fig. 8. Welded pipe joints after flattening + bending test:

1 – original pipe; 2 – welded pipe in condition after tempering; 3 – welded pipe in condition after complex heat treatment normalization + tempering

материала выдержали испытание на изгиб без видимых дефектов и трещин. Угол загиба труб в исходном состоянии и после местной термообработки по режиму отпуска составил 180°. В то же время после операции нормализации с отпуском угол загиба уменьшился и составил всего 45...70°.

Прочность на разрыв сварных соединений, выполненных с различными параметрами сварки, указана в табл. 3 по результатам испытаний трех образцов в каждой серии. По результатам испытаний предел прочности соединений из стали 15Х5М лежит в пределах 400...470 МПа, что значительно выше значений для основного металла. При испытаниях на растяжение разрушение металла трубы из стали 15Х5М происходило на расстоянии 60...70 мм от стыка.

Результаты и их обсуждение

Технологические параметры контактно-стыковой сварки оплавлением труб, изменяемые в ходе наших исследований, показывают, что давление осадки и припуск на искрение влияют на конечные прочностные свойства сварного стыка (табл. 3). Стыковая сварка оплавлением представляет собой двухэтапный процесс контактной электросварки. На начальном этапе сварки две

Таблица 3

Table 3

Прочность на разрыв сварных соединений из стали 15X5M, выполненных с разными параметрами сварки

Ultimate strength of 0.15C-5Cr-Mo steel welded joints made with different welding parameters

№ серии / Series no.	1	2	3
Припуск на этапе искрения, мм / Sparking allowance, mm	12	6	12
Давление осадки, МПа / Upsetting pressure, MPa	120	120	140
Припуск на осадку, мм / Upsetting allowance, mm	18	18	18
Время тока осадки, с / Upsetting current time, s	5	5	5
Предел прочности, МПа, среднее из трех образцов / Ultimate strength, MPa, average of three specimens	398	405	470

свариваемые детали полностью нагреваются, чтобы получить соответствующую способность к пластической деформации. Процесс осадки: после завершения процесса оплавления к соединению была приложена достаточная сила осадки, чтобы закрыть зазор между прилегающими поверхностями и удалить жидкий металл, а также оксидные включения. Стадия осадки наступает, когда два торца сближаются под действием осевой силы с контролируемой скоростью. Между тем в соединении произошла определенная пластическая деформация, что привело к динамической рекристаллизации и рекристаллизации в процессе осадки с образованием прочного соединения. Термические циклы сварки имеют высокие пиковые температуры и высокие скорости нагрева и охлаждения. При увеличении припуска на искрение с 6 до 12 мм скорость нагрева (пиковая температура / время нагрева) снижается. Во время мгновенного нагрева чем больше допуск на вспышку, тем больше времени требуется для достижения пиковой температуры, что приводит к снижению скорости нагрева. В процессе охлаждения время $t_{8/5}$ увеличивается с 26,0 до 32,5 с, так как припуск на осадку увеличивается с 12 до 16 мм, что можно объяснить увеличением погонной энергии при сварке.

При стыковой сварке оплавлением граница раздела обоих образцов труб была нагрета до температуры плавления, большая часть образовавшегося жидкого металла выплеснулась из границы раздела, а оставшийся жидкий металл образовал очень мелкие зерна. Пиковые температуры в ЗТВ находились в диапазоне солидус – ликвидус, поэтому ее ширина также была огра-

ниченна. В зависимости от пиковых температур и микроструктурных характеристик нагретые образцы труб можно разделить на четыре зоны: расплавленную, полурасплавленную, крупнозернистую и мелкозернистую.

По результатам металлографических исследований выделим следующие особенности эволюции микроструктуры. Заметное снижение содержания первичного огрубевшего феррита наблюдается в структуре сварного шва после отпускной термообработки. Следует отметить, что блочный первичный огрубевший феррит по границам зерен всегда рассматривается как основной фактор, способствующий быстрому распространению трещин и снижению ударной вязкости. Следовательно, можно предположить, что общие характеристики сварного шва могут быть значительно улучшены. В крупнозернистой зоне термического влияния с правой стороны от линии сплавления часть бейнита подвергается распаду, и характерная пластинчатая структура феррита становится менее отчетливой, что приводит к более однородному распределению микроструктуры. После термообработки (отпуска) сварного стыка размер зерен в мелкозернистой зоне увеличивается за счет распада части перлита, а феррит увеличивается в размерах (рис. 6). В зоне основного металла существенного изменения размера зерен не происходит, но содержание перлита заметно снижается.

При анализе результатов рис. 7 установлено, что распределение микротвердости по сварным соединениям в режимах термообработки после сварки «отпуск» и «нормализация + отпуск», отжига и отпускной термообработки существенно

снижается. Общая тенденция по размерам областей ЗТВ выглядит следующим образом: область сварного шва больше зоны термического влияния, которая, в свою очередь, больше зоны основного материала. Эта разница в твердости по сварному стыку и ЗТВ в совокупности отражается в вариациях содержания элементов, микроструктуры и размера зерен в разных микроразделах сварного соединения. Точнее, зона сварного шва обладает наибольшей микротвердостью из-за более высокого содержания таких элементов, как Mn и Si, которые играют важную роль в упрочнении твердого раствора. Кроме того, микроструктура зоны сварного шва состоит преимущественно из бейнита и феррита, что также обуславливает наиболее высокую микротвердость. Во время стыковой сварки оплавлением зона нагрева выше температуры 1300° C (WZ) испытала термический цикл с более высокой пиковой температурой и большей пластической деформацией, вызванной движением дислокаций, в результате чего в этой зоне произошла динамическая рекристаллизация и рекристаллизация. Известно, что пластическая деформация, испытываемая в зоне сварного стыка, имела тенденцию к увеличению количества дислокаций, в то время как количество дислокаций имело тенденцию к уменьшению во время динамической рекристаллизации и процесса рекристаллизации. Зона термического влияния имеет микроструктуру, аналогичную зоне основного металла, но относительно меньшие размеры зерен, что приводит к более высоким значениям твердости. Кроме того, после термообработки в режиме отпуска происходит значительное снижение микротвердости по всему сварному соединению. Уменьшается разница в твердости между разными зонами, особенно между зоной термического влияния и зоной основного металла. В сочетании с наблюдением за микроструктурой предполагается, что снижение твердости происходит главным образом за счет частичного распада бейнита и перлита, а также роста областей феррита (рис. 6), обладающих меньшей твердостью, и за счет образования структур отпуска.

Анализ кривых растяжения-деформации при испытаниях трубных образцов показал, что окончательное разрушение происходило в зоне основного материала образцов как в условиях термообработки по режиму нормализации с от-

пуском, так и в условиях режима отпуска. Причин может быть две: во-первых, содержание легирующих элементов в сварочном шве выше, чем в основном металле (как показано в табл. 3), что указывает на более высокую прочность полученного сварного шва по сравнению с прочностью основного металла труб. Во-вторых, крупнозернистая область в зоне термического влияния испытывает упрочнение сплава за счет диффузии элементов из металла шва, в то время как мелкозернистая зона, характеризующаяся малыми и равномерно распределенными размерами зерен, способствует упрочнению в зоне термического воздействия. В результате общая прочность зоны термического влияния выше, чем у основного металла.

В ходе исследований показано, что процесс контактно-стыковой сварки оплавлением формирует закалочные структуры типа игольчатого бейнита с твердостью 380 HB в сварном стыке и ЗТВ, увеличивая прочность, но ограничивая пластичность, как это видно из испытаний на растяжение и оптического микроскопического анализа. Измерения твердости четко подтверждают эти результаты, показывая увеличение твердости в зоне сварного стыка и ЗТВ образцов. Тем не менее при испытаниях на изгиб трещин зарегистрировано не было, но высокая твердость сварного шва перемещает центр изгиба от сварного шва к основному материалу.

Значения твердости образцов после сварки несколько увеличились за счет образования бейнита в ЗТВ. Быстрое охлаждение в ЗТВ, где температура (в процессе сварки) была выше Ac3, может способствовать образованию в сварном соединении твердых фаз, таких как мартенсит и бейнит. Значения твердости после сварки составили 310 HB. Это связано с тем, что микроструктура, полностью преобразованная в реечную, имела высокую плотность дислокаций. Однако поскольку преобладал бейнит, то реечный мартенсит практически не наблюдался. В процессе нормализации происходило восстановление и рост зерна, тогда как значения твердости уменьшались по сравнению с твердостью образца после сварки (рис. 7). После отпуска значения твердости были примерно на 130...150 HB ниже по сравнению со значениями твердости образца после сварки. На рис. 7 показаны изменения твердости, происходящие в зоне сплавления

и ЗТВ при отпуске и нормализации с отпуском. При повышении температуры отпуска до 600 °С твердость снижалась, но при дальнейшем повышении температуры сохранялась стабильной. Следовательно, можно понять, что 600 °С может быть лучшей температурой отпуска с точки зрения твердости.

Таким образом, очевидно, что после контактно-стыковой сварки труб из стали 15X5M образующиеся в ЗТВ структуры типа бейнита повышают прочностные свойства сварного стыка и твердость, поэтому требуется дополнительно проводить термообработку стыка. Стоит отметить, что в образцах не ощущалось никакого эффекта холодного растрескивания из-за времени ожидания между процессом сварки и последующей термообработкой.

В представленной работе исследовано влияние послесварочной термообработки на микроструктуру и механические свойства различных трубных сварных соединений 15X5M. В дальнейших исследованиях мы планируем разработать практическую технологию с оптимальными режимами сварки и термообработки с целью внедрения в реальное производство.

Заключение

1. Установлено, что трубы из стали 15X5M размером 25×2,5 мм при контактно-стыковой сварке оплавлением имеют удовлетворительную свариваемость по причине образования бейнитных структур повышенной твердости в зоне стыка. Учитывая теплофизические свойства материала труб, контактную сварку оплавлением необходимо проводить на жестких режимах с максимальным давлением осадки.

2. Показано, что твердость является важным индикатором, отражающим изменения микроструктуры в сварном стыке. Изменения прочности показывают положительную корреляцию с изменениями твердости, тогда как изменения пластичности демонстрируют отрицательную корреляцию с изменениями твердости. Таким образом, определение твердости можно использовать на инженерных объектах для оценки эффективности послесварочной термообработки в повышении свойств сварного соединения.

3. Для получения требуемых механических свойств сварных стыков труб из стали 15X5M,

выполненных контактно-стыковой сваркой оплавлением, необходимо проводить локальную термообработку по режимам отпуска или нормализацию с отпуском.

Список литературы

1. Effect of temperature range on thermal-mechanical fatigue properties of P92 steel and fatigue life prediction with a new cyclic softening model / J.-b. Wen, C.-Y. Zhou, X. Li, X.-M. Pan, L. Chang, G.-D. Zhang, F. Xue, Y.-F. Zhao // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 129. – P. 105226. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105226.
2. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and hardness of P92 steel in IN740H/P92 dissimilar weld joints / W. Seo, J. Suh, J.H. Shim, H.S. Lee, K.B. Yoo, S. Choi // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 160. – P. 110083. – DOI: 10.1016/j.matchar.2019.110083.
3. Kumar A., Pandey C. Some studies on dissimilar welds joint P92 steel and Inconel 617 alloy for AUSA power plant application // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2022. – Vol. 198. – P. 104678. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104678.
4. Dak G., Pandey C. A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 377–406. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.019.
5. Masuyama F. Low-alloyed steel grades for boilers in ultra-supercritical power plants // *Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants*. – Woodhead Publ., 2017. – P. 53–76. – DOI: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00002-6.
6. Status of development of VM 12 steel for tubular applications in advanced power plants / J. Gabrel, W. Bendick, B. Vandenberghe, B. Lefebvre // *Energy Materials*. – 2006. – Vol. 1 (4). – P. 218–222. – DOI: 10.1179/174892406X173657.
7. Creep-fatigue life evaluation for grade 91 steels with various origins and service histories / H. Shigeyama, Y. Takahashi, J. Siefert, J. Parker // *Metals*. – 2024. – Vol. 14 (2). – P. 148. – DOI: 10.3390/met14020148.
8. Обеспечение технологической прочности сварных соединений из мартенситных хромистых сталей типа 15X5M / А.А. Халимов, Н.В. Жаринова, А.Г. Халимов, А.М. Файрушин // *Нефтегазовое дело*. – 2012. – Т. 10, № 3. – С. 102–108.
9. Халимов А.А., Жаринова Н.В. Оптимизация технологии высокотемпературной термической обработки сварных соединений из хромистых жаропрочных сталей // *Технология машиностроения*. – 2009. – № 10. – С. 19–25.

10. ГОСТ 20072–74. Сталь теплоустойчивая. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 19 с.
11. РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования (РТМ-1с): утв. Минэнерго России 02.07.2001. – СПб.: ДЕАН, 2002. – 463 с.
12. Полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа стали типа 15X5M (временная инструкция) / А.Р. Исаков, Ю.С. Медведев, Н.М. Королев, Р.С. Зайнуллин, А.Г. Халимов, И.М. Кутлуев, Ю.А. Черных, А.Ф. Тишкин. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. – 8 с.
13. Ручная электродуговая сварка с регулированием термических циклов конструктивных элементов нефтехимического оборудования из закаливающих сталей типа 15X5M: РТМ 26-17-076-87. – М.: Минхиммаш, 1987. – 26 с.
14. Тукаев Р.Ф., Файрушин А.М., Кучуков Т.М. Совершенствование технологии изготовления узла «труба – трубная решетка» кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15X5M применением лазерной сварки // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 1179–1185.
15. Оценка коррозионной стойкости комбинированных соединений труб с трубной решеткой, полученных с применением различных способов сварки / А.С. Токарев, Д.В. Каретников, Р.Г. Ризванов, С.Е. Черепашкин, Д.Ш. Муликов // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 6. – С. 114–133. – DOI: 10.17122/ogbus-2019-6-114-133.
16. 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. Kargapol'tsev, 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.
17. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapol'tsev, 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.
18. Study of impact strength of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) // A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, Y.I. Karlina // CIS Iron and Steel Review. – 2022. – 24. – P. 67–73. – DOI: 10.17580/cisr.2022.02.10.
19. Study of the effect of nanomodifiers from silicon production wastes on morphological form of gray cast iron graphites / A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.D. Koslov, Y.I. Karlina // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 21. – P. 64–69. – DOI: 10.17580/cisr.2021.01.11.
20. Fabricius A., Jackson P.S. Premature grade 91 failures – worldwide plant operational experiences // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol. 66. – P. 398–406.
21. Optimization study of post-weld heat treatment for 12Cr1MoV pipe welded joint / Z. Liu, X. Hu, Z. Yang, B. Yang, J. Chen, Y. Luo, M. Song // Metals. – 2021. – Vol. 11 (1). – P. 127. – DOI: 10.3390/met11010127.
22. Effect of post-weld heat treatment on the toughness of heat-affected zone for grade 91 steel / B. Silwal, L. Li, A. Deceuster, B. Griffiths // Welding Journal. – 2013. – Vol. 92 (3). – P. 80s–87s.
23. Critical review on magnetically impelled arc butt welding: challenges, perspectives and industrial applications / M. Chaturvedi, A. Vendan Subbiah, G. Simion, C.C. Rusu, E. Scutelnicu // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 7054. – DOI: 10.3390/ma16217054.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Y. Skeebe, P.Y. 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.
29. 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.
30. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки корро-

зионностойких 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.

31. 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.Y. Skeebe, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

32. 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/cisir.2022.02.09.

33. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // Metals. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.

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 the possibility of resistance butt welding of pipes made of heat-resistant steel 0.15C-5Cr-Mo

Yulia Karlina^{1, a, *}, Vladimir Konyukhov^{2, b}, Tatiana Oparina^{2, c}

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/0000-0001-9137-9404>,  konyukhov_vyu@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>,  martusina2@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 June 2024

Revised: 17 June 2024

Accepted: 28 June 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Post-weld heat treatment

Stress-relief annealing

Tempering, normalization, heat treatment

Welded joint

Heterogeneous microstructure

Hardness

Properties

Flash butt welding

ABSTRACT

Introduction. Cr-Mo steels are used in high-temperature and high-pressure applications, including critical components of modern supercritical and ultra-supercritical thermal power plants. Due to its unique ability to withstand high temperatures and pressures, these steels are also used in critical components of fast breeder nuclear reactors. The heterogeneity of the microstructure and mechanical properties throughout the welded joint is a decisive factor leading to a decrease in its performance and premature failure. Post-weld heat treatment is the main method for improving mechanical properties. However, the mechanism for the evolution of mechanical properties associated with heterogeneous microstructure after heat treatment remains unclear, which complicates the design of the heat treatment process and a comprehensive assessment of its effect. **The purpose of the work** is to assess the possibility of the resistance butt welding method of welding pipes made of 0.15C-5Cr-Mo steel, to select technological parameters for resistance butt welding of pipes to obtain high mechanical properties. **Research methods.** The experiments were carried out on a resistance butt welding machine MSO-201N. Mechanical tests for static tension, chemical composition analysis and metallographic studies were carried out. **Results and discussion.** Technological parameters of resistance butt welding of pipes, changed in the course of our research, show that upsetting pressure and spark allowance affect the final strength properties of the welded joint. Based on the results of metallographic studies, the following features of the evolution of the microstructure can be noted. A noticeable decrease in the content of primary coarsened ferrite is observed in the structure of the weld after tempering. The use of post-weld heat treatment made it possible to reduce the hardness in the welded joint to the level of regulatory requirements. **Results presented.** The effect of heat treatment on mechanical properties is analyzed based on a comparison of heat treatment modes: stress relief annealing and normalization + tempering in terms of improving mechanical properties during tensile tests. The results show that after tempering, the evolution of mechanical properties in each sub-zone of the welded joint is sequential, i.e., hardness and tensile strength decrease and toughness increases. It is noteworthy that the most significant increase in toughness is observed in the weld zone, primarily due to a significant decrease in the presence of hypoeutectoid ferrite.

For citation: Karlina Yu.I., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Assessment of the possibility of resistance butt welding of pipes made of heat-resistant steel 0.15C-5Cr-Mo. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 79–93. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-79-93. (In Russian).

References

1. Wen J.-b., Zhou C.-Y., Li X., Pan X.-M., Chang L., Zhang G.-D., Xue F., Zhao Y.-F. Effect of temperature range on thermal-mechanical fatigue properties of P92 steel and fatigue life prediction with a new cyclic softening model. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 129, p. 105226. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105226.
2. Seo W., Suh J., Shim J.H., Lee H.S., Yoo K.B., Choi S. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and hardness of P92 steel in IN740H/P92 dissimilar weld joints. *Materials Characterization*, 2020, vol. 160, p. 110083. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.110083.

* 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

3. Kumar A., Pandey C. Some studies on dissimilar welds joint P92 steel and Inconel 617 alloy for AUSC power plant application. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, vol. 198, p. 104678. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104678.
4. Dak G., Pandey C. A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 377–406. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.019.
5. Masuyama F. Low-alloyed steel grades for boilers in ultra-supercritical power plants. *Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants*. Woodhead Publ., 2017, pp. 53–76. DOI: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00002-6.
6. Gabrel J., Bendick W., Vandenberghe B., Lefebvre B. Status of development of VM 12 steel for tubular applications in advanced power plants. *Energy Materials*, 2006, vol. 1 (4), pp. 218–222. DOI: 10.1179/174892406X173657.
7. Shigeyama H., Takahashi Y., Siefert J., Parker J. Creep-fatigue life evaluation for grade 91 steels with various origins and service histories. *Metals*, 2024, vol. 14 (2), p. 148. DOI: 10.3390/met14020148.
8. Halimov A.A., Gharinova N.V., Khalimov A.G., Fairushin A.M. Obespechenie tekhnologicheskoi prochnosti svarnykh soedinenii iz martensitnykh khromistykh stali tipa 15Kh5M [Ensuring technological strength of welding joints of chromium martensitic steel 15CR5M]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*, 2012, vol. 10, no. 3, pp. 102–108. (In Russian).
9. Khalimov A.A., Zharinova N.V. Optimizatsiya tekhnologii vysokotemperaturnoi termicheskoi obrabotki svarnykh soedinenii iz khromistykh zharoprochnykh stali [High-temperature thermal process technology optimization of the welded joints from chromium heat-resistant steels]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya = Technology of Mechanical Engineering*, 2009, no. 10, pp. 19–25.
10. GOST 20072–74. *Stal' teploustoichivaya. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 20072–74. Heat-resistant steel. Specifications]. Moscow, Standards Publ., 1974. 19 p.
11. RD 153-34.1-003-01. *Svarka, termoobrabotka i kontrol' trubnykh sistem kotlov i truboprovodov pri montazhe i remonte energeticheskogo oborudovaniya (RTM-1s)* [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-1s)]. Approved by the order of the Ministry of Energy of Russia from 02.07.2001. St. Petersburg, DEAN Publ., 2002. 463 p.
12. Iskhakov A.R., Medvedev Yu.S., Korolev N.M., Zainullin R.S., Khalimov A.G., Kutluev I.M., Chernykh Yu.A., Tishkin A.F. *Poluavtomaticheskaya svarka v srede uglekislogo gaza stali tipa 15Kh5M (vremennaya instruktsiya)* [Semi-automatic welding in a carbon dioxide environment for steel type 15X5M (temporary instructions)]. Moscow, TSINTIKhimneftemash Publ., 1992. 8 p.
13. *Ruchnaya elektrodugovaya svarka s regulirovaniem termicheskikh tsiklov konstruktivnykh elementov neftekhimicheskogo oborudovaniya iz zakalivayushchikhsya stali tipa 15Kh5M* [Manual electric arc welding with regulation of thermal cycles of structural elements of petrochemical equipment made of hardening steels of type 15X5M]. PTM 26-17-076-87. Moscow, Minkhimnash Publ., 1987. 26 p. (In Russian).
14. Tukaev R.F., Fairushin A.M., Kuchukov T.M. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya uzla «truba – trubnaya reshetka» kozhukhotrubchatogo teploobmennogo apparata iz zharoprochnoi stali 15Kh5M primeneniem lazernoi svarki [Improving the manufacturing technology of the “pipe – tube sheet” assembly of a shell-and-tube heat exchanger made of heat-resistant steel 15X5M using laser welding]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie = Modern mechanical engineering. Science and education*, 2013, no. 3, pp. 1179–1185. (In Russian).
15. Tokarev A.S., Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Cherepashkin S.E., Mulikov D.Sh. Otsenka korrozionnoi stoikosti kombinirovannykh soedinenii trub s trubnoi reshetkoi, poluchennykh s primeneniem razlichnykh sposobov svarki [Assessment of the corrosion resistance of combined pipe-tube sheet joints obtained using various welding methods]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*, 2019, no. 6, pp. 114–133. DOI: 10.17122/ogbus-2019-6-114-133. (In Russian).
16. 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.
17. 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.

18. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina Yu.I. Study of impact strength of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 24, pp. 67–73. DOI: 10.17580/cisr.2022.02.10.
19. Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Kolosov A.D., Karlina Y.I. Study of the effect of nanomodifiers from silicon production wastes on morphological form of gray cast iron graphites. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 21, pp. 64–69. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.11.
20. Fabricius A., Jackson P.S. Premature grade 91 failures – worldwide plant operational experiences. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 66, pp. 398–406.
21. Liu Z., Hu X., Yang Z., Yang B., Chen J., Luo Y., Song M. Optimization study of post-weld heat treatment for 12Cr1MoV pipe welded joint. *Metals*, 2021, vol. 11 (1), p. 127. DOI: 10.3390/met11010127.
22. Silwal B., Li L., Deceuster A., Griffiths B. Effect of post-weld heat treatment on the toughness of heat-affected zone for grade 91 steel. *Welding Journal*, 2013, vol. 92 (3), pp. 80s–87s.
23. Chaturvedi M., Vendan Subbiah A., Simion G., Rusu C.C., Scutelnicu E. Critical review on magnetically impelled arc butt welding: challenges, perspectives and industrial applications. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 7054. DOI: 10.3390/ma16217054.
24. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshekin 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.
25. Efremenkov 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.
26. 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.
27. 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.
28. Zverev E.A., Skeebe V.Y., Skeebe P.Y., 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.
29. Skeebe V.Yu. 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. (In Russian).
30. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. 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. (In Russian).
31. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., 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.
32. 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/cisr.2022.02.09.
33. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.