

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.791.011

EDN: KSMRHH

М.Н. Тимофеев¹, С.Н. Галяткин¹, М.С. Котилло², А.А. Кузнецов³, М.Ю. Ястребов³

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

² АО «ЗиО-Подольск», Подольск, Россия

³ АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КОРПУСОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК РИТМ-200 УНИВЕРСАЛЬНЫХ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ ПРОЕКТА 22220

Объект и цель научной работы. Приведен анализ механических свойств сварных соединений и наплавов реакторных установок РИТМ-200 пяти универсальных двухосадочных атомных ледоколов серии 22220 «Арктика» для выработки направлений совершенствования материалов и технологий сварки при изготовлении перспективных однотипных проектов реакторных установок атомных ледоколов, модернизированных плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности.

Материалы и методы. Показан путь развития сварочных материалов и технологий в направлении повышения производительности операций сварки и наплавки одновременно с повышением сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений и наплавов. Эволюция материалов для автоматической сварки позволила обеспечить сопротивление хрупкому разрушению металла шва и наплавов на уровне требований к заготовкам основного металла – радиационностойкой стали 15Х2МФА-А мод. А.

Основные результаты. Установлено, что сварное соединение приварки корпусов гидрокамер к корпусу реактора через переходные наплавки не имеет аналога конструктивно-технологического исполнения при изготовлении стационарных АЭС. При этом, с учетом значительного безаварийного срока эксплуатации данных сварных соединений, их аттестационные испытания для применения на атомных электростанциях малой мощности можно провести в сокращенном объеме. Показано, что другие применяемые при изготовлении реакторных установок РИТМ-200 сварочные материалы полностью унифицированы с материалами, допущенными Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии.

Заключение. Выработаны направления работы по повышению сопротивления хрупким разрушениям металла шва и наплавов реакторных установок РИТМ-200 и однотипных им.

Ключевые слова: реакторная установка, автоматическая сварка, сопротивление хрупкому разрушению, универсальный атомный ледокол.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

UDC 621.791.011

EDN: KSMRHH

M.N. Timofeev¹, S.N. Galyatkin¹, M.S. Kotillo², A.A. Kuznetsov³, M.Yu. Yastrebov³

¹ NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, St. Petersburg, Russia

² JRC “ZiO-Podolsk”, Podolsk, Russia

³ JRC “OKBM Africantov”, Nizhny Novgorod, Russia

Для цитирования: Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н., Котилло М.С., Кузнецов А.А., Ястребов М.Ю. Опыт применения материалов и технологий сварки и наплавки при строительстве корпусов реакторных установок РИТМ-200 универсальных атомных ледоколов проекта 22220. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 77–86.

For citations: Timofeev M.N., Galyatkin S.N., Kotillo M.S., Kuznetsov A.A., Yastrebov M.Yu. Experience in the use of consumables and technologies for welding and cladding in the construction of reactor vessels RITM-200 of universal nuclear icebreakers of Project 22220. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 77–86 (in Russian).

EXPERIENCE IN THE USE OF CONSUMABLES AND TECHNOLOGIES FOR WELDING AND CLADDING IN THE CONSTRUCTION OF REACTOR VESSELS RITM-200 OF UNIVERSAL NUCLEAR ICEBREAKERS OF PROJECT 22220

Object and purpose of research. Analysis of mechanical properties of welded joints and claddings is given of RITM-200 reactor vessels designed for a series of five universal two-draft nuclear icebreakers “Arktika”, Project 22220. The analysis is undertaken to identify the ways of improving consumables and welding technologies for manufacturing advanced reactors of common type for nuclear icebreakers, upgraded floating power modules and low-power nuclear plants.

Materials and methods. Evolution of consumables and welding technologies is reviewed with respect to improving welding and deposition rates simultaneously with raising brittle fracture resistance of welded joints and cladding. Development of consumables for automatic welding ensured brittle fracture resistance of welded joint metal and cladding at the level of parent metal blanks, i.e. radiation-resistant steel 15X2MФА-A mod. A.

Main results. It is established that joining of welded pots and the reactor shell via intermediate weld overlays are unique design & technological practices in manufacturing fixed-type nuclear installations. Considering long fail-free service of these welded joints, their approval tests for nuclear plant applications and be abridged. It is established that the other welding consumables used for manufacturing RITM-200 reactor installations fully comply with federal regulations and rules in force for the nuclear industry.

Conclusion. Ways to improve brittle fracture resistance of parent material and cladding applied in manufacturing RITM-200 reactors and similar type installations.

Keywords: reactor plant, automatic welding, resistance to brittle fracture, universal nuclear icebreaker.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Серия универсальных двухссадочных ледоколов проекта 22220 «Арктика» заложена в 2012 г. для обеспечения функционирования Северного морского пути в связи с выработкой к середине 2020-х гг. ресурса оборудования реакторных установок атомных ледоколов, заложенных на стапеле еще при Советском Союзе. Серия включает пять ледоколов: три из них – «Арктика», «Сибирь» и «Урал» – уже построены, два – «Якутия» и «Чукотка» – находятся в стадии строительства.

Реакторная установка (РУ) РИТМ-200 для ледоколов серии 22220 спроектирована ведущим конструкторским бюро АО «ОКБМ Африкантов». РУ РИТМ-200 является эволюционным развитием силовых установок атомных ледоколов ранних проектов ОК-900, КЛТ-40 [1].

В конструкции корпуса РУ РИТМ-200 в основном применены материалы и технологии, опробованные на предыдущих проектах энергетических установок атомных ледоколов. За весь срок работы ОК-900, КЛТ-40 не выявлено ни одного случая аварии либо отказа, что позволило продлить их ресурс с 25 до 30 лет [2, 3]. Проектный ресурс незаменимого оборудования РУ РИТМ-200 – 40 лет, при этом возможно его продление.

Корпус РУ является незаменимым элементом, следовательно, обеспечение высоких служебных характеристик его материалов на протяжении всего срока службы в условиях воздействия эксплуатационных факторов является важной задачей. Как известно [4], в процессе эксплуатации материалы корпуса реактора могут проявлять склонность к деградации, сопровождающейся повышением прочности, снижением пластичности и стойкости к хрупкому разрушению. Следовательно, одним из условий безопасной эксплуатации корпуса РУ является нахождение его материалов в вязком состоянии на весь период эксплуатации.

Стратегия развития атомной энергетики России предусматривает строительство модернизированных плавучих энергоблоков (МПЭБ), а также атомных электростанций малой мощности (АСММ).

Так, в настоящее время заложены четыре МПЭБ для энергообеспечения Баимского горно-обогатительного комбината [5], имеющие по две модифицированные реакторные установки РИТМ-200С каждая. Применение установок по типу РИТМ-200 для строящихся МПЭБ, в сравнении с МПЭБ «Академик Ломоносов», имеющим силовую установку КЛТ-40с блочного типа, позволит снизить массогабаритные характеристики при увеличении электрической мощности [6].

В стадии реализации находится проект АСММ с реактором РИТМ-200Н, который является моди-

фикацией ледокольной РУ [1]. Также заложено строительство головного ледокола-лидера по проекту 10510, имеющего конструктивно схожую реакторную установку РИТМ-400 [7].

Поскольку к ресурсу оборудования приведенных перспективных проектов предъявляются требования, не уступающие требованиям к РУ РИТМ-200, представляет интерес анализ опыта применения материалов, в частности, для выполнения сварных соединений и наплавки корпусов РУ, построенных к настоящему времени. Интересным также представляется анализ примененных конструктивно-технологических исполнений сварных соединений и их соответствие Федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии [8], которым должно соответствовать оборудование АСММ.

Целью данной работы является анализ опыта применения материалов и технологий сварки и наплавки при строительстве РУ РИТМ-200 для выработки направлений дальнейшего совершенствования при изготовлении перспективных однотипных проектов реакторных установок атомных ледоколов, МПЭБ и АСММ.

Схема изготовления

Manufacturing flow-chart

Принципиальная схема изготовления корпуса РУ РИТМ-200 приведена на рис. 1 (см. вклейку).

Корпус интегрированный РУ РИТМ-200 состоит из корпуса реактора 1, к которому сварными швами № 2 через переходную наплавку А8 присоединены четыре корпуса гидрокамеры 2.

Корпус реактора в свою очередь состоит из днища 3, обечайки с патрубками 4, обечайки 5 и фланца 6, которые представляют собой кованные либо штампованные заготовки из низколегированной теплоустойчивой радиационностойкой стали 15Х2МФА-А мод. А, имеющие на внутренней поверхности антикоррозионные наплавки А1. Заготовки 3–6 соединены между собой тремя сварными швами № 1.

Корпус гидрокамеры состоит из угольника 7 и обечайки 8, выполненных из той же стали 15Х2МФА-А мод. А, с антикоррозионными наплавками, соединенными друг с другом сварным швом № 3, а также фланца 9, изготовленного из коррозионностойкой стали аустенитного класса 08Х18Н10Т. Фланец 9 и обечайка 8 соединены сварным швом № 4, через переходную аустенитную наплавку А6 на свариваемой кромке обечайки 8. Сварные швы и наплавки проходят термическую обработку, которая формирует их механические свойства.

Механические свойства металла сварных швов и наплавки

Mechanical properties of parent metal and cladding

Заказы на изготовление РУ РИТМ-200 для пяти ледоколов проекта 22220 размещены на АО «ЗиО-Подольск» – одном из старейших машиностроительных заводов России, имеющем большой опыт в изготовлении оборудования атомных станций.

Далее приведен анализ требований к механическим свойствам и статистические данные, полученные при испытании производственных контрольных сварных соединений и наплавки корпуса РУ РИТМ-200.

К сварным швам № 1 и № 3, соединяющим заготовки из стали 15Х2МФА-А мод. А между собой, предъявляют те же требования, что и к основному металлу: обеспечение высоких прочностных свойств на уровне категории прочности 440 МПа (предел текучести при температуре 350 °С), стойкости к хрупким разрушениям, стойкости против деградации механических свойств под воздействием температуры и нейтронного облучения. Ввиду большой протяженности и толщины этих сварных швов их выполняют одним из наиболее производительных способов – автоматической сваркой под флюсом.

Статистические данные механических свойств металла сварных швов № 1 и № 3 при испытании образцов на растяжение приведены на рис. 2 (см. вклейку).

Результаты определения стойкости к хрупкому разрушению металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), характеризуемой значением критической температуры хрупкости T_{K0} (условная температура перехода из хрупкого в вязкое состояние, определяемое по методике [11] путем испытания серии образцов на ударный изгиб типа Шарпи при различных температурах), приведены на рис. 3 (см. вклейку).

При изготовлении РУ РИТМ-200 судоконкомплектов № 1–4 применяли сочетание сварочной проволоки Св-10ХМФТУ-А химической композиции 1,5%Cr-0,5%Mo-0,2%V и плавящего сварочного флюса АН-42М, разработанных еще в 1980-х гг. Как показывают статистические данные рис. 2 и 3, сварные швы, выполненные указанными сварочными материалами, обеспечивали требования, предъявляемые к механическим свойствам. Однако значения T_{K0} металла шва существенно уступают аналогичным значениям металла ЗТВ стали 15Х2МФА-А мод. А (рис. 3).

Начиная с судоконкомплекта № 4, столкнувшись с проблемами поставки проволоки Св-10ХМФТУ-А, принято решение о ее замене на проволоку Св-15ХГМТА химической композиции 1,5%Cr-0,6%Ni-0,5%Mo. Эта сварочная проволока разработана для сварки стали 15Х2МФА-А мод. А в сочетании с агломерированным сварочным флюсом 48АФ-71, с целью обеспечения более высокого сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов [9]. Ранее эти сварочные материалы применяли при сварке корпуса реактора и верхнего блока Курской АЭС-2 по проекту ВВЭР-ТОИ [10], материалы аттестованы в соответствии с Федеральными нормами и правилами [8]. Применение сварочной проволоки Св-15ХГМТА в сочетании с плавным флюсом АН-42М не привело к повышению сопротивления хрупкому разрушению металла шва, были получены значения $T_{K0} = 0$ °С.

При изготовлении оборудования судоконкомплекта № 5 для сварных швов № 1, 3 было применено сочетание сварочной проволоки Св-15ХГМТА и агломерированного сварочного флюса 48АФ-71, что позволило обеспечить снижение значений T_{K0} металла сварных швов до $-45...-40$ °С (рис. 3) при сохранении высоких прочностных и пластических свойств (рис. 2).

Как показывает опыт применения кованных и штампованных заготовок из стали 15Х2МФА-А мод. А, вследствие особенностей ее легирования значения T_{K0} для ЗТВ соответствуют значениям T_{K0} для основного металла. Для металла обечаек 4, 5 предъявляют требования $T_{K0} \leq -35$ °С. Аналогичные требования предъявляют Федеральные нормы и правила [12] для металла сварных швов, выполненных сварочными материалами 1,5%Cr-0,6%Ni-0,5%Mo композиции.

Современные металлургические возможности позволяют обеспечить существенно более высокий уровень сопротивления хрупкому разрушению: T_{K0} заготовок обечаек 4, 5 первого судоконкомплекта находился на уровне от -90 до -40 °С [13]. Указанные обстоятельства позволяют предположить возможность обоснования ресурса сварных соединений стали 15Х2МФА-А мод. А свыше 60 лет [6] при применении в проекте РИТМ-200Н материалов, использованных при изготовлении РУ РИТМ-200 пятого судоконкомплекта.

Для приварки патрубков малого (от 56 мм до 215 мм) диаметра к корпусу РУ РИТМ-200 из стали 15Х2МФА-А мод. А способ автоматической сварки под флюсом неприменим. Поэтому выполнение данных сварных швов судоконкомплектов № 1–4 про-

изводили ручной дуговой сваркой электродами Н-3АА, обеспечивающими 1,1%Cr-0,5%Mo-0,2%V композицию металла шва. В связи с высоким влиянием человеческого фактора на качество при приварке в неповоротном положении патрубков малого диаметра, особенно его корневой части, для оборудования судоконкомплекта № 5 ручную дуговую сварку покрытыми электродами корня шва заменили на ручную аргонодуговую сварку сварочной проволокой Св-08ХГСМА, обеспечивающую ту же химическую композицию металла шва. Оба рассматриваемых сварочных материала аттестованы в соответствии с [8].

Статистические данные механических свойств металла шва, выполненные с использованием указанных материалов, приведены на рис. 4 (см. вклейку). Статистические данные критической температуры хрупкости металла шва приварки малых патрубков – на рис. 5 (см. вклейку).

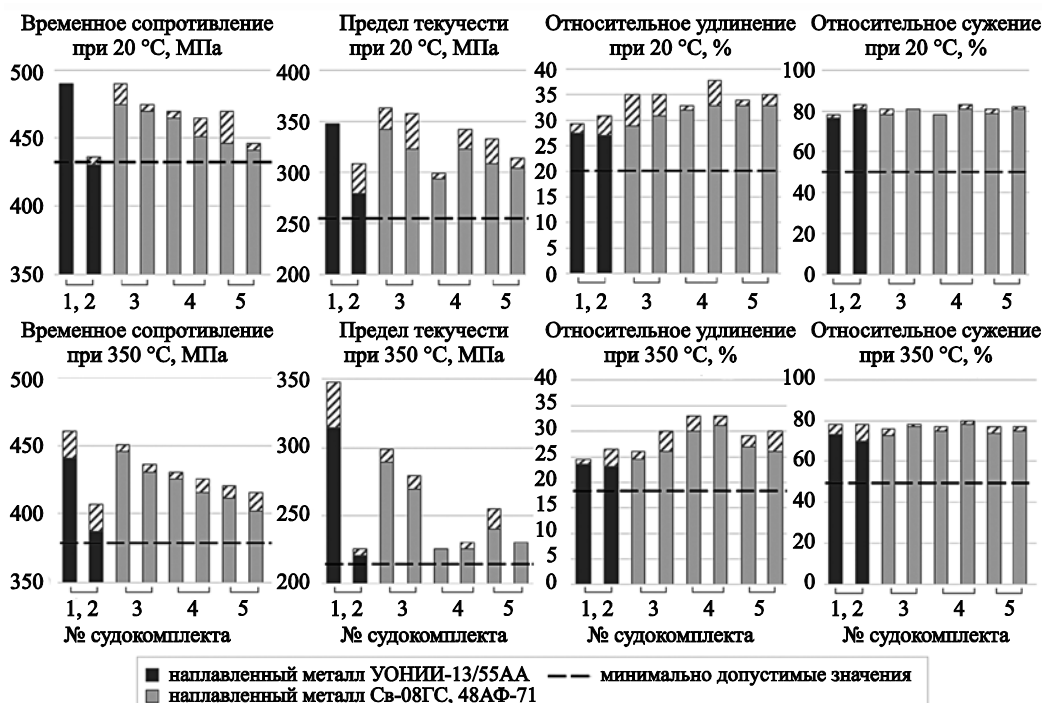
Замена ручной дуговой сварки покрытыми электродами при выполнении корня шва на ручную аргонодуговую привела к снижению уровня дефектности при выполнении сварных соединений приварки патрубков малого диаметра с 17 % до 1 % от общего числа рентген-снимков. При этом удалось повысить сопротивление хрупкому разрушению: T_{K0} снизились со значений $-20...-10$ °С до $-40...-20$ °С. Однако стоит отметить снижение прочностных свойств (рис. 4), что не позволяет рекомендовать применение проволоки Св-08ХГСМА для выполнения всего сечения сварных швов стали 15Х2МФА-А мод. А.

Представляются целесообразными разработка и аттестация материалов для ручной и механизированной сварки стали 15Х2МФА-А мод. А, обеспечивающих систему легирования металла шва, близкую к швам, выполняемым автоматической сваркой под флюсом. Новые сварочные материалы должны обеспечивать сопротивление хрупкому разрушению металла шва на уровне требований к заготовкам основного металла и прочностные свойства категории прочности 440 МПа.

Предварительная наплавка А8 обеспечивает возможность получения необходимых механических свойств сварного соединения корпусов гидрокamер и корпуса реактора из теплоустойчивой стали 15Х2МФА-А мод. А в условиях отсутствия термической обработки – высокого отпуска. Дело в том, что из-за образования закалочных структур под воздействием термического цикла сварки ЗТВ теплоустойчивой хромомолибденованадиевой стали без термической обработки имеет низкое сопротив-

Рис. 6. Механические свойства металла наплавов А8

Fig. 6. Mechanical properties of cladding metal А8



ление хрупкому разрушению. Выполнение предварительной наплавки на свариваемые кромки с применением материалов, не склонных к образованию закалочных структур, позволяет избежать необходимости последующего высокого отпуска после сварки.

К металлу предварительных наплавов А8, помимо отсутствия склонности к закалке при сварке без последующей термообработки, предъявляют также требования по прочностным свойствам и сопротивлению хрупкому разрушению.

Изначально проект РУ РИТМ-200 предполагал выполнение наплавов А8 методом ручной дуговой сварки электродами УОНИИ-13/55АА либо автоматической сваркой под флюсом с применением проволоки Св-06АА и плавного флюса АН-42М. Ввиду дефицитности сварочной проволоки Св-06АА первые три судоконспекта РУ РИТМ-200 имели наплавки А8, выполненные ручной дуговой сваркой. В результате исследований, проведенных ЦНИИ КМ «Прометей» [14–16], разработано сочетание проволоки Св-08ГС и флюса 48АФ-71, обеспечивающего наплавленный металл состава 0,5%Si-1%Mn.

Статистические данные механических свойств металла наплавов А8 и результаты определения $T_{\text{К0}}$ приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Установлено, что применение автоматической сварки под флюсом с использованием рекомендо-

ванного сочетания сварочных материалов взамен ручной дуговой сварки позволило повысить стойкость к хрупкому разрушению до уровня требований к заготовкам основного металла ($T_{\text{К0}} \leq -35$ °C), при этом трудоемкость выполнения наплавов А8 снизилась с 5760 до 800 нормо-часов на один судоконспект. Также за счет перехода с ручного способа на автоматический существенно снизилась дефектность наплавов А8. Материалы, применяемые для выполнения наплавов А8, аттесто-

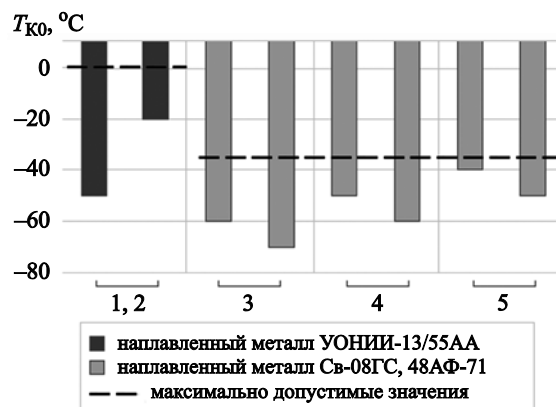


Рис. 7. Критическая температура хрупкости металла наплавов А8

Fig. 7. Critical brittle point of cladding metal А8

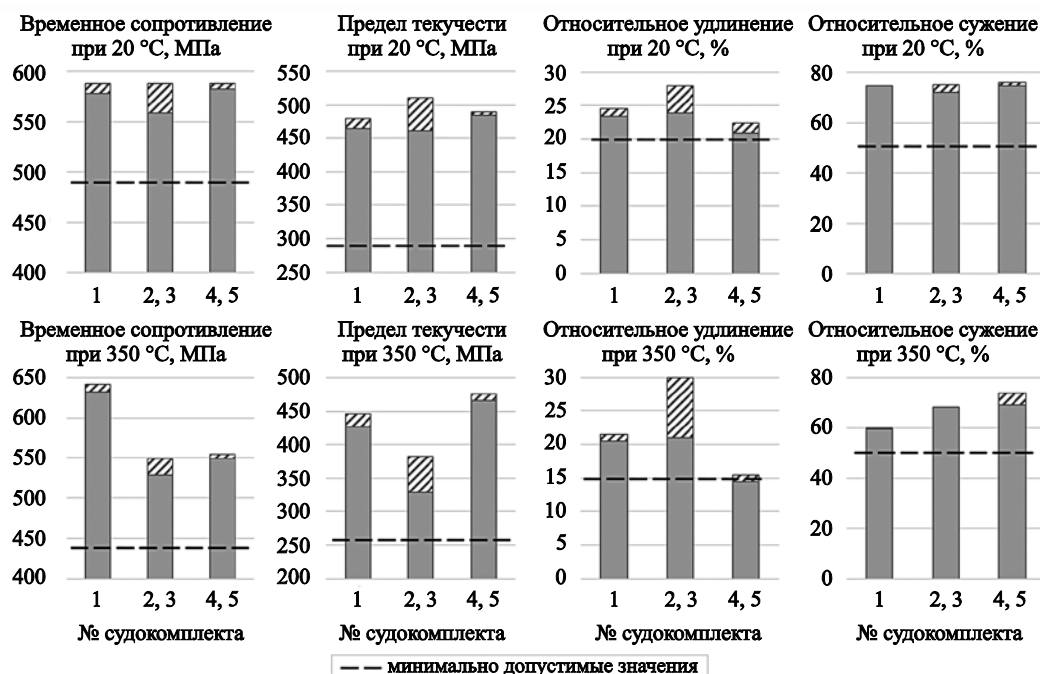


Рис. 8. Механические свойства металла шва № 2, выполненного электродами УОНИИ-13/55АА
Fig. 8. Mechanical properties of parent metal in welded joint No. 2 done by electrodes УОНИИ-13/55АА

ваны в соответствии с Федеральными нормами и правилами [8].

Статистика механических свойств металла сварных швов № 2, соединяющих корпуса гидрокамер 2 с корпусом интегрированным 1, выполненных ручной дуговой сваркой электродами УОНИИ-13/55АА, приведена на рис. 8. Результаты определения T_{K0} металла данных сварных швов – на рис. 9.

Как видно из рис. 9, значения T_{K0} для всех испытанных сварных соединений шва № 2, выполненного электродами УОНИИ-13/55АА, составля-

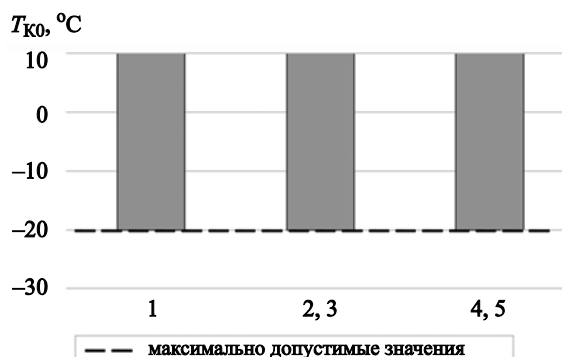


Рис. 9. Критическая температура хрупкости металла шва № 2, выполненного электродами УОНИИ-13/55АА

Fig. 9. Critical brittle point of parent metal in welded joint No. 2 done by electrodes УОНИИ-13/55АА

ют -20 °C, в то время как для наплавки А8 судоконструктов № 3–5 значения T_{K0} не выше -45 °C. Авторам представляется целесообразным проведение НИОКР в направлении автоматизации выполнения сварных швов № 2 с целью снижения доли участия человеческого фактора при выполнении столь ответственных сварных соединений и обеспечения, наряду с необходимыми прочностными свойствами, сопротивления хрупкому разрушению на уровне наплавки А8.

Также в связи с наличием требований [8] по защите материалов внутренней поверхности корпуса антикоррозионной наплавкой при проектировании оборудования АСММ актуальным является разработка конструктивно-технологического исполнения сварного соединения № 2, имеющего антикоррозионную наплавку с внутренней стороны (ранее участки внутренних поверхностей сварных швов № 2 антикоррозионных наплавки не имели). При обосновании работоспособности данного сварного соединения следует учесть, что подобные технологические исполнения сварных соединений теплоустойчивых сталей через предварительные наплавки применяли при изготовлении энергетических установок проектов ОК-900 и КЛТ-40, которые имеют безаварийный опыт эксплуатации на протяжении длительного (до 30 лет) срока, начиная с первого атомного ледокола «Ленин». Соответствие механических свойств всех участков данных

сварных соединений подтверждено исследованием отработавшего ресурса оборудования атомного ледокола «Арктика» по проекту 10520 [17]. На основании изложенного считаем, что необходимые аттестационные испытания могут быть проведены в сокращенном объеме.

Предварительные наплавки А6 на обечайки гидрокамер 8 выполняют по известному [8] в отечественном атомном машиностроении технологическому исполнению: предварительный слой с применением материалов химической композиции 16%Cr-25%Ni-6%Mo, имеющих высокий запас аустенитности во избежание образования хрупких прослоек при перемешивании с основным металлом; основной слой – материалами химической композиции 19%Cr-11%Ni-3%Mo, имеющим аустенитную структуру с содержанием от 2 до 8 % δ -феррита для предотвращения образования горячих трещин.

Сварное соединение № 4 аустенитной переходной наплавки с коррозионностойкой сталью аустенитного класса 08X18H10T выполняют с применением материалов той же химической композиции 19%Cr-11%Ni-3%Mo, что соответствует требованиям [8].

Антикоррозионные наплавки А1 выполняют аттестованными [8] сочетаниями сварочных материалов: предварительный слой – материалами химической композиции 25%Cr-13%Ni, основной слой – композиции 20%Cr-10%Ni-1%Nb. Данные материалы имеют аустенитную структуру с содержанием от 2 до 8 % δ -феррита. Наплавки А1 выполняют преимущественно способом автоматической наплавки ленточным электродом под флюсом либо ручной дуговой сваркой плавящимся электродом. Перспективным для выполнения наплавки А1 является повышение автоматизации за счет замены ручного способа на механизированный.

Так как аустенитные сварочные материалы, имеющие гранецентрированную кристаллическую решетку, не склонны к хрупким разрушениям, сочетания сварочных материалов для выполнения данных разнородных сварных соединений аттестовано [8], статистика механических свойств металла шва № 4, наплавки А6 и А1 не является предметом рассмотрения данной работы.

По итогам анализа опыта изготовления корпусов РУ РИТМ-200 установлено, что основная часть конструктивно-технологических решений при выполнении сварных соединений имеет аналоги при изготовлении стационарных АЭС по Федеральным нормам и правилам [8]. Все используемые в корпусе РУ РИТМ-200 сварочные материалы являются

аттестованными, что позволяет их применить при изготовлении стационарных АСММ. Высокая стойкость к хрупким разрушениям основных сварных швов и наплавки, на уровне требований к заготовкам основного металла, позволяет предположить возможность обоснования ресурса корпуса РУ для АСММ на срок более 60 лет.

Заключение

Conclusion

За период строительства оборудования РУ РИТМ-200 проведен большой комплекс мероприятий, направленных на превышение производительности операций сварки и наплавки одновременно с повышением механических свойств металла шва, в особенности сопротивления хрупкому разрушению. Эволюция материалов для автоматической сварки позволила обеспечить сопротивление хрупкому разрушению на уровне требований к заготовкам основного металла – стали 15Х2МФА-А мод. А.

Применяемые при изготовлении судовых РУ сварочные материалы полностью унифицированы с материалами, допущенными Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии.

Вместе с тем установлено, что сварное соединение приварки корпусов гидрокамер к корпусу реактора через переходные наплавки не имеет аналога конструктивно-технологического исполнения при изготовлении стационарных АЭС. С учетом того фактора, что подобные сварные соединения применяли при изготовлении энергетических установок проектов ОК-900 и КЛТ-40, имеющих безаварийный опыт эксплуатации на протяжении длительного срока, предложено провести необходимые аттестационные испытания в сокращенном объеме в обоснование технического проекта АСММ на базе реактора РИТМ-200Н.

Выработаны направления дальнейшей работы по повышению сопротивления хрупким разрушениям металла шва, выполненного механизированной и ручной дуговой сваркой – предложена разработка новых сварочных материалов, обеспечивающих 1,5%Cr-0,6%Ni-0,5%Mo систему легирования сварных швов.

Список использованной литературы

1. Петрунин В.В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91, № 6. С. 528–540. DOI: 10.31857/s0869587321050182.

2. Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути / Ю.Л. Бордученко, И.Г. Малыгин, В.Ю. Каминский, В.А. Аксенов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2, т. 1. С. 14–25. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.001.
3. Александров М.А., Бордученко Ю.Л. Перспективы атомного ледокольного флота по освоению Северного морского пути // Морской вестник. 2021. № 2(78). С. 17–23.
4. Карзов Г.П., Леонов В.П., Тимофеев Б.Т. Сварные сосуды высокого давления: прочность и долговечность. Ленинград : Машиностроение, 1982. 287 с.
5. Владимиров А.А., Макеев Г.А. Опыт и перспективы создания плавучих энергетических блоков для освоения и развития территорий российского Севера и Дальнего Востока // Судостроение. 2021. № 4. С. 56–60.
6. Плавучие энергоблоки с РУ РИТМ-200М / В.В. Петрунин, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2019. № 1. С. 91–96.
7. Судовые энергетические установки / В.М. Беляев, К.Б. Вешняков, В.Г. Жуковский [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. № 89(373). С. 7–20.
8. НП-104-18. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 14 ноября 2018 г. № 554. Москва, 2018. 260 с.
9. Тимофеев М.Н., Галияткин С.Н. Исследование структуры и свойств металла сварного соединения корпуса атомного реактора из Cr-Mo-V стали в процессе изготовления и эксплуатации // Вопросы материаловедения. 2022. № 2(110). С. 111–123. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-110-2-111-123.
10. Анализ опыта изготовления корпуса реактора и блока верхнего проекта ВВЭР-ТОИ из сталей 15X2НМФА кл. 1 и 15X2МФА-А мод. А / М.Н. Тимофеев, С.Н. Галияткин, А.В. Фоменко, О.В. Шубин // Тяжелое машиностроение. 2021. № 9. С. 9–17.
11. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок : ПНАЭ Г-7-002-86 / Гос. ком. СССР по надзору за безопасным ведением работ в атом. энергетике. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 527 с.
12. НП-105-18. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 14 ноября 2018 г. № 554. Москва, 2018. 119 с.
13. Теплухина И.В., Богданов А.И., Цветков А.С. Опыт изготовления крупногабаритных заготовок для корпусов реакторов универсальных атомных ледоколов нового поколения // Металлург. 2019. № 9. С. 62–69.
14. Improvement of the service properties of the weld joint metal for transport nuclear power units manufactured of heat-resistant steel grades: part I. Technology of welding heat-resistant steel grades using low-carbon welding materials without heat treatment and experience of applying welding materials / M.N. Timofeev, G.P. Karzov, S.N. Galiatkin [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9, No. 6. P. 1142–1147. DOI: 10.1134/S2075113318060242.
15. Timofeev M.N., Galiatkin S.N., Mikhaleva E.I. Improvement of the service properties of the weld joint metal for transport nuclear power units manufactured of heat-resistant steel grades: part III. A study of the influence of alloying elements on the characteristics of the all-weld metal as applied to the fabrication of low-carbon metal deposits and assembly weld joints in icebreaker nuclear power units // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9, No. 6. P. 1155–1164. DOI: 10.1134/S2075113318060266.
16. Structure of welding joints of 15Kh2MFA steel with low carbon surfacing without thermal treatment / M.N. Timofeev, S.N. Galiatkin, R.I. Samoylenko, Yu.M. Markova. // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11, Issue 6. P. 1428–1433.
17. Продление срока эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов. Обеспечение безопасности в продлеваемый период / О.Э. Дарбинян, С.В. Филимошкин, Ю.П. Фадеев [и др.] // Арктика: экология и экономика 2014. № 1(13). С. 88–95.

References

1. Petrunin V.V. Reactor installation for low-power nuclear plants // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2021. Vol. 91, No. 6. P. 528–540. DOI: 10.31857/s0869587321050182 (in Russian).
2. The nuclear icebreaker fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. challenges and prospects for the development of the Northern sea route / Yu.L. Borduchenko, I.G. Malygin, V.Yu. Kaminsky, V.A. Aksenov // Marine Intellectual Technologies. 2021. No. 2, vol. 1. P. 14–25. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.001 (in Russian).
3. Aleksandrov M.A., Borduchenko Yu.L. Prospects of nuclear icebreaker fleet for mastering the North Sea

- Route // *Morskoi vestnik*. 2021. No. 2(78). P. 17–23 (in Russian).
4. Karzov G.P., Leonov V.P., Timofeev B.T. Welded high-pressure vessels: strength and durability. Leningrad: Mashinostroenie, 1982. P. 287 p. (in Russian).
 5. Vladimirov A.A., Makeev G.A. Practice and prospects for construction of floating power plants for developing North and Far East regions of the Russian Federation // *Sudostroyeniye*. 2021. No. 4. P. 56–60 (in Russian).
 6. Floating power units with RITM-200M RP / V.V. Petrunin, Yu.P. Fadeev, A.N. Pakhomov [et al.] // *Issues of nuclear science and technology. Series: Physics of nuclear reactors*. 2019. No. 1. P. 91–96 (in Russian).
 7. Ship power plants / V.M. Belyaev, K.B. Veshnyakov, V.G. Zhukovsky [et al.] // *Transactions of the Krylov Central Research Institute*. 2015. Vol. 89(373). P. 7–20 (in Russian).
 8. NP-104-18. Welding and cladding of equipment and pipelines for nuclear power installations. Federal norms and rules for nuclear power industry: appr. by Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision on 14 November 2018. No. 554. Moscow, 2018. 260 p. (in Russian).
 9. Timofeev M.N., Galyatkin S.N. Study of the structure and properties of the metal of reactor pressure vessel welded joints made of CR-MO-V steel in the process of manufacture and operation // *Voprosy materialovedeniya*. 2022. No. 2(110). P. 111–123. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-110-2-111-123 (in Russian).
 10. Timofeev M.N., Galyatkin S.N. Study of the structure and properties of the metal of reactor pressure vessel welded joints made of CR-MO-V steel in the process of manufacture and operation // *Voprosy materialovedeniya*. 2022. No. 2(110). P. 111–123. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-110-2-111-123 (in Russian).
 11. Analysis of the experience in manufacturing the reactor body and the upper block of the VVER-TOI from 15CR2NIMOVA Class 1 and 15CR2MOVA-A MOD. A steels / M.N. Timofeev, S.N. Galyatkin, A.V. Fomenko, O.V. Shubin // *Tyazheloye mashinostroyeniye*. 2021. No. 9. P. 9–17 (in Russian).
 12. NP-105-18. Rules for the control of metal equipment and pipelines for nuclear power installations. Federal norms and rules for nuclear power industry: appr. by Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision on 14 November 2018. No. 554. Moscow, 2018. 119 p. (in Russian).
 13. Teplukhina I.V., Bogdanov V.I., Tsvetkov A.S. Production experience of large-sized blanks for reactor vessels of universal nuclear icebreakers of new generation // *Металлург*. 2019. No. 9. P. 62–69 (in Russian).
 14. Improvement of the service properties of the weld joint metal for transport nuclear power units manufactured of heat-resistant steel grades: part I. Technology of welding heat-resistant steel grades using low-carbon welding materials without heat treatment and experience of applying welding materials / M.N. Timofeev, G.P. Karzov, S.N. Galiatkin [et al.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9, No. 6. P. 1142–1147. DOI: 10.1134/S2075113318060242.
 15. Timofeev M.N., Galiatkin S.N., Mikhaleva E.I. Improvement of the service properties of the weld joint metal for transport nuclear power units manufactured of heat-resistant steel grades: part III. A study of the influence of alloying elements on the characteristics of the all-weld metal as applied to the fabrication of low-carbon metal deposits and assembly weld joints in icebreaker nuclear power units // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9, No. 6. P. 1155–1164. DOI: 10.1134/S2075113318060266.
 16. Structure of welding joints of 15Kh2MFA steel with low carbon surfacing without thermal treatment / M.N. Timofeev, S.N. Galiatkin, R.I. Samoylenko, Yu.M. Markova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11, Issue 6. P. 1428–1433.
 17. Life extension of nuclear icebreaker reactor installations. Safety assurance in the extended period / O.E. Darbinyan, S.V. Filimoshkin, Yu.P. Fadeev [et al.] // *Arctic: ecology and economics*. 2014. No. 1(13). p. 88–95 (in Russian).

Сведения об авторах

Тимофеев Михаил Николаевич, к.т.н., начальник сектора НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49. Тел.: +7 (812) 274-15-34. E-mail: timofeev-mn-spb@mail.ru.

Галиаткин Сергей Николаевич, к.т.н., начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49. Тел.: +7 (812) 274-17-06. E-mail: prk6@crism.ru.

Котилло Максим Серафимович, руководитель направления АО «ЗиО-Подольск». Адрес: 142103, Россия, Московская обл., Подольск, ул. Железнодорожная, д. 2. Тел.: +7 (495) 747-10-25, доб. 72-88. E-mail: m.kotillo@eatom.ru.
Кузнецов Андрей Александрович, начальник подразделения АО «ОКБМ Африкантов». Адрес: 603074, Россия, Нижний Новгород, Бунаковский пр-д, д. 15. Тел.: +7 (831) 275-26-45. E-mail: kuznetsov@okbm.nnov.ru.

Ястребов Михаил Юрьевич, заместитель начальника подразделения АО «ОКБМ Африкантов». Адрес: 603074,

Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский пр-д, д. 15.
Тел.: +7 (831) 275-26-45. E-mail: yastrebov_mu@okbm.ru.

About the authors

Mikhail N. Timofeev, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, RC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”. Address: 49, Shpalernaya st., St. Petersburg, Russia, post code 191015. Tel.: +7 (812) 274-15-34. E-mail: timofeev-mn-spb@mail.ru.
Sergei N. Galyatkin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, RC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”. Address: 49, Shpalernaya st., St. Petersburg, Russia, post code 191015. Tel.: +7 (812) 274-17-06. E-mail: npk6@crism.ru.

Maxim S. Kotillo, Line-of-Business Manager, JSC ZiO-Podolsk. Address: 2, Zheleznodorozhnaya st., Podolsk, Moscow Region, Russia, post code 142103. Tel.: +7 (495) 747-10-25, ext. 72-88. E-mail: m.kotillo@eatom.ru.
Andrei A. Kuznetsov, Head of Unit, JSC OKBM Afrikantov. Address: 15, Burnakovsky pr., Nizhny Novgorod, Russia, post code 603074. Tel.: +7 (831) 275-26-45. E-mail: kuznetsov@okbm.nnov.ru.
Mikhail Yu. Yastrebov, Deputy Head of Unit JSC OKBM Afrikantov. Address: 15, Burnakovsky pr., Nizhny Novgorod, Russia, post code 603074. Tel.: +7 (831) 275-26-45. E-mail: yastrebov_mu@okbm.ru.

Поступила / Received: 29.08.23
Принята в печать / Accepted: 30.11.23
© Коллектив авторов, 2023

Рис. 1. Схема изготовления корпуса реакторной установки РИТМ-200

Fig. 1. Manufacturing flow-chart of RITM-200 reactor installations

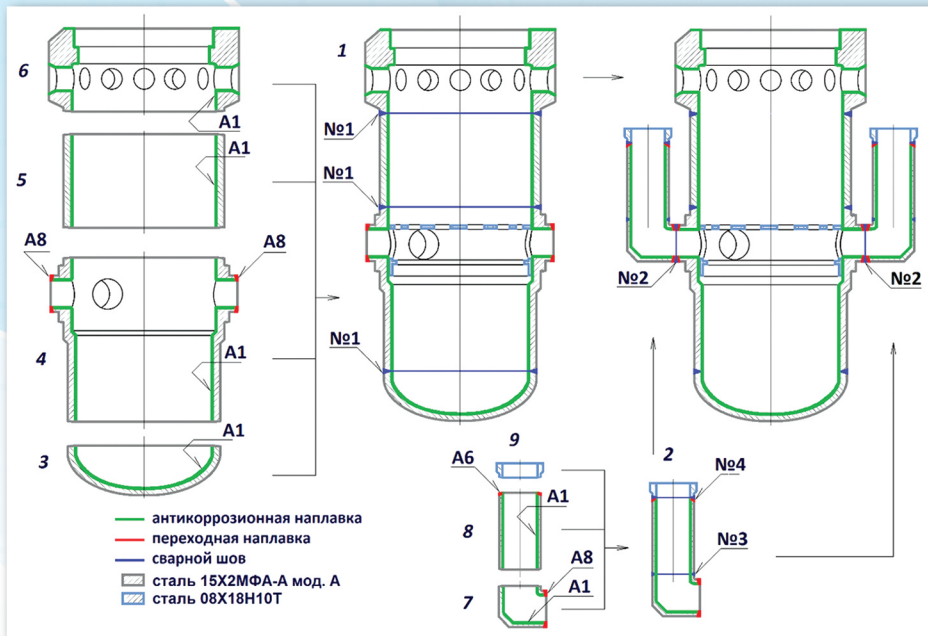
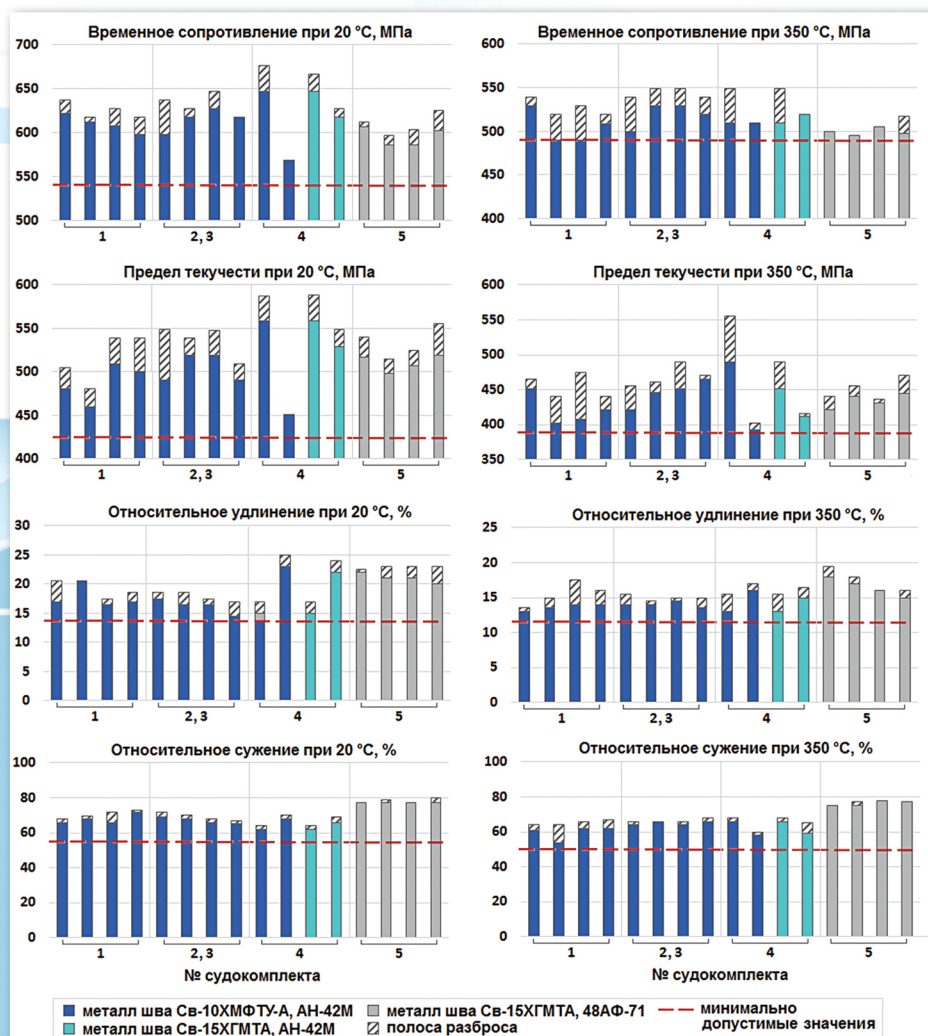


Рис. 2. Механические свойства металла сварного шва № 1 и № 3

Fig. 2. Mechanical properties of parent metal, welded joints No. 1 & No. 3



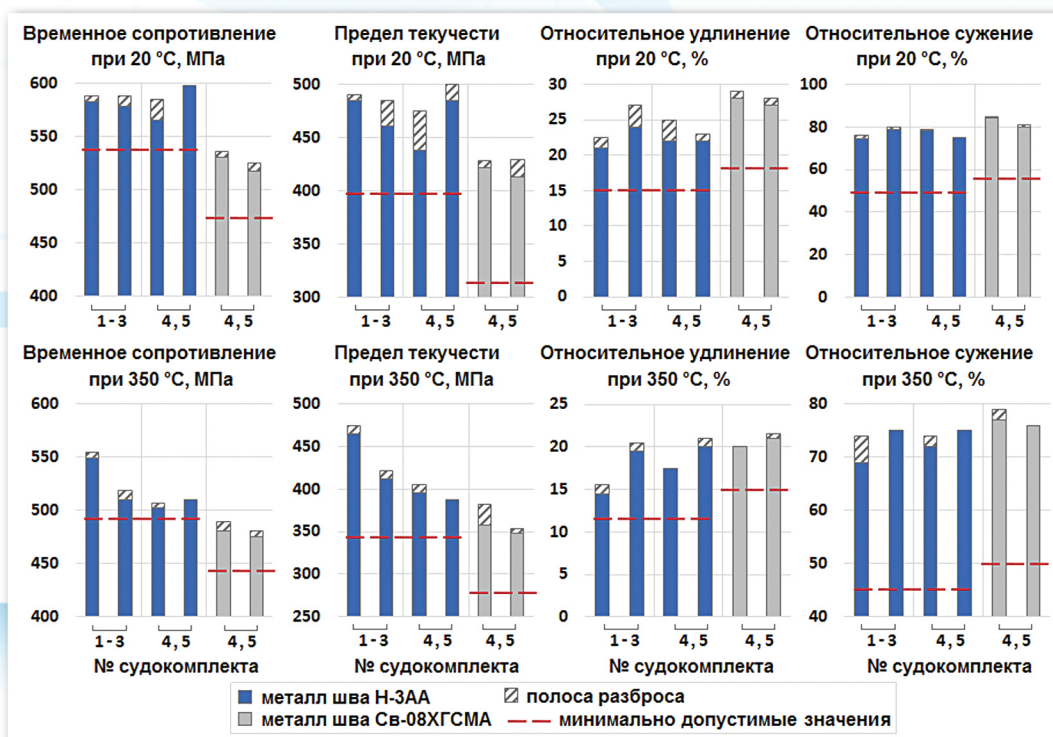
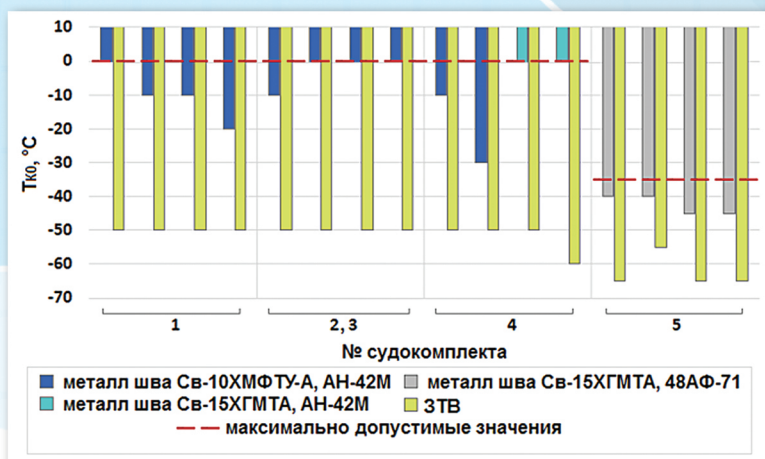


Рис. 4. Механические свойства металла шва приварки малых патрубков

Fig. 4. Mechanical properties of parent metal and welded-in pipe connectors

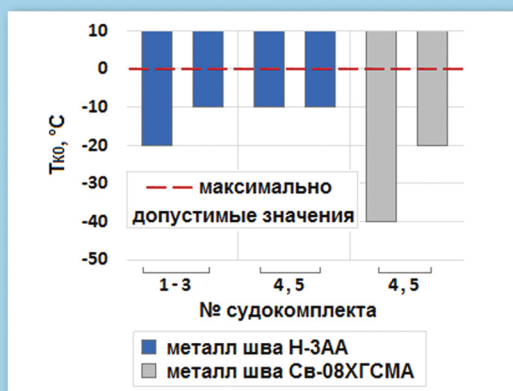


Рис. 5. Критическая температура хрупкости металла шва приварки малых патрубков

Fig. 5. Critical brittle point of parent metal in welding pipe connectors