



ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ (Обзор)

В. Д. ПОЗНЯКОВ, С. Б. КАСАТКИН, С. Л. ЖДАНОВ, кандидаты техн. наук, **П. А. СТРИЖАК**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности проведения ремонтных сварочных работ при восстановлении металлоконструкций механизмов, машин и инженерных сооружений. Описаны наиболее часто используемые в процессе выполнения восстановительных работ способы удаления дефектов, разделки кромок, технологии ремонтной сварки, сварочные материалы, применяемые при ремонтной сварке, методы контроля качества сварных соединений.

Ключевые слова: ремонтная сварка, восстановление сварных конструкций, удаление дефектов, разделка кромок, контроль качества сварных соединений, остаточные напряжения, сварочные материалы, усталостные трещины

В настоящее время в Украине эксплуатируется большое количество инженерных сооружений и машин, исчерпавших назначенный срок службы или близких к этому состоянию. Большинство из них имеет усталостные и хрупкие повреждения. Дальнейшая эксплуатация таких изделий становится небезопасной.

Как свидетельствуют публикации [1–4], проблема существует и в других экономически развитых странах. Так, согласно данным работы [2], около 26 % мостов в США нуждаются в ремонте. Особенно остро стоит проблема ремонта мостов на скоростных дорогах США. В работе [4] указывается, что многие конструкции (котлы высокого давления, морские платформы для добычи нефти и газа) превысили срок эксплуатации, установленный при их разработке. Однако несмотря на это они не заменяются новыми. Основная причина — огромные затраты на их покупку и установку. Кроме того, во время замены старых конструкций новыми те и другие не будут функционировать, что приведет к существенным убыткам. Поэтому в настоящее время разрабатываются способы, позволившие бы максимально продлить срок эксплуатации действующих объектов.

В большинстве случаев такие проблемы решают путем восстановления (ревитализации) металлоконструкций с применением дуговой сварки или упрочняющих обработок поврежденных элементов [4].

Учитывая большую значимость ремонтно-восстановительных работ для промышленности, в Американском институте сварки разработана и с начала 1980-х гг. осуществляется широкая научно-исследовательская программа по ремонтной сварке [2]. В начале нынешнего тысячелетия аналогичная программа, получившая условное название «Ресурс», реализуется и в Украине.

Необходимость в проведении исследований, направленных на совершенствование ремонтных технологий, обусловлена тем, что в настоящее время при восстановлении металлоконструкций, как

правило, используют стандартные технологии сварки, разработанные для изготовления новых изделий. Они не учитывают специфики ремонтных соединений, обусловленной влиянием значительных остаточных напряжений в них и ограниченным выбором способов удаления дефектов, разделки кромок и собственно сварки, которая может оказывать существенное влияние на свойства сварных соединений восстановленной конструкции [1, 3, 5, 6].

Так, в работе [7] отмечается, что ремонтная сварка способствует образованию в соединениях большего количества повреждений, чем при обычной первоначальной сварке. Это обусловлено тем, что ремонтная сварка более кратковременна, чем первоначальная. Поэтому при ее выполнении образуется больше участков, на которых происходили процессы начала и окончания сварки. Для этих участков характерны повышенные скорости охлаждения металла, что приводит к увеличению его твердости и склонности к образованию холодных трещин. Еще одной особенностью таких соединений является образование участков металла с неблагоприятной охрупченной структурой.

Данные работы [8] свидетельствуют, что из-за увеличения уровня остаточных напряжений и образования неоднородностей структуры при ремонтной сварке значения ударной вязкости снижаются на 20... 25 % по сравнению с исходным вариантом.

В работе [6] установлено, что вблизи исправленных сваркой дефектных участков могут возникать дефекты, обусловленные пластическими деформациями укорочения. Склонность сварных соединений к образованию таких дефектов тем больше, чем меньше их деформационная способность.

Для ремонтной сварки характерно также появление микротрещин в ледебуритном слое на поверхности реза, осуществляемого кислородной горелкой [3], наличие подрезов, несплавлений, неметаллических включений. При ремонтной сварке возможно образование ламелярных трещин [5].

В работе [9] отмечается, что отремонтированные тавровые сварные соединения стали средней прочности имеют более низкую сопротивляемость образованию усталостных трещин, чем не подвергавшиеся ремонтам соединения той же стали. Это объясняется тем, что в ремонтных сварных сое-



динениях обнаруживается неоднородность прочностных свойств (участки металла с повышенной хрупкостью). Сопrotивляемость усталостному разрушению указанных сварных соединений возрастает после дугового оплавления угловых швов.

По мнению авторов работы [2], технологии восстановления следует уделять большее внимание, чем первоначальной сварке. Важнейшей задачей при этом является выбор или разработка таких сварочных технологий, которые обеспечат низкий уровень остаточных напряжений и позволят в ряде случаев отменять мероприятия по их снятию.

Основными дефектами, исправляемыми ремонтной сваркой, являются усталостные трещины. Причиной их появления могут быть неадекватный проект конструкции, высокий уровень напряжений, неправильный выбор сварочных материалов, не способных обеспечить необходимую вязкость и свариваемость соединений, неудовлетворительное выполнение термической резки, недостаточное проплавление, наличие подрезов, вибрация, коррозионная среда, эксплуатационные нагрузки [10].

При эксплуатации большегрузных автосамосвалов, экскаваторов, бульдозеров в условиях севера в них зафиксированы многочисленные случаи образования усталостных трещин, которые при пониженных климатических температурах инициируют хрупкое разрушение [5].

Значительная часть простоев автосамосвалов связана с ремонтом сварной рамы. Ее разрушение, как правило, начинается в сварном шве в зоне конструктивного или технологического концентратора напряжений, а также в области перехода от более жесткого узла к менее жесткому. В дальнейшем трещина распространяется как по металлу шва в зоне термического влияния (ЗТВ), так и по основному металлу до полного разрушения узла рамы. Причинами разрушения могут служить непровары, подрезы, холодные трещины. Зачастую трещины появляются в узлах крепления передней подвески, а именно: в околошовной зоне по металлу стенки вертикальной стойки (концентратору напряжений, испытывающему повторные динамические нагрузки непосредственно от подвески).

Одним из слабых узлов автосамосвала М-200 с точки зрения трещинообразования является обод колеса. Многочисленные трещины обнаруживаются в колесе по околошовной зоне шва, соединяющего конусообразующую часть детали с цилиндрической. Причина данного разрушения — конструктивный концентратор напряжений. Трещина развивается под влиянием коррозионной среды, циклического и ударного нагружений.

Установлено, что при повторных статических нагрузках в металле магистральных трубопроводов могут происходить деформационные повреждения, в которых развивается процесс старения. Старение в сочетании с наводороживанием приводит к охрупчиванию металла, снижению ударной вязкости и пластичности, и как следствие, — к разрушению [11].

Особенности и причины разрушения конструкций должны быть учтены при разработке технологии их восстановления. В связи с этим в работе

[7] рекомендуется перед проведением ремонтной сварки проанализировать следующее:

— позволяет ли состояние данной сварной конструкции производить на ней ремонтную сварку;

— сколько ремонтов можно производить на одном и том же участке сварной конструкции;

— какая технология может быть использована для обеспечения лучшей работоспособности и меньшей степени деградации свойств металла вблизи сварного соединения.

В работе [1] акцентируется внимание на обязательном осуществлении неразрушающего контроля поврежденных узлов изделия для установления границ залегания дефектов и идентификации основного металла перед ремонтной сваркой. Для последнего требуется определять его химический состав, а также проводить металло- и спектрографические исследования.

При ремонтной сварке выполняют удаление трещин, формирование разделки кромок, собственно ремонтную сварку и сопутствующие ей процессы [5, 10, 12]. При необходимости улучшают дизайн конструкции, обрабатывают сварные соединения для снятия напряжений и повышения свойств металла. После сварки обязательно контролируют качество соединений.

Перед удалением трещины необходимо высверлить отверстия у ее вершины, а затем устранить поверхностные трещины с помощью шлифовки [13]. Удаление металла вблизи трещины следует выполнять за ее видимые границы, не должно оставаться дефектов, которые могут инициировать появление новых трещин [10]. Зону металла вблизи удаленной трещины необходимо контролировать ультразвуковым или рентгеновским методами.

Для удаления трещины и формирования разделки кромок используют различные способы обработки металла: газокислородную резку, воздушно-дуговую строжку угольным электродом, дуговую резку специальными электродами, шлифовку, фрезеровку и т. д.

Для удаления дефектов и выполнения разделки кромок рекомендуется использовать воздушно-дуговую строжку металла специальными электродами [5].

При ремонте стойки и рукояти экскаваторов ЭКГ-12.5, изготовленных из сталей 08ГДНФА и ИЖ-6, разделку кромок осуществляли воздушно-дуговой строжкой угольным электродом [5]. Образующийся при этом науглероженный слой удаляли абразивным кругом. При отсутствии воздушно-дуговой строжки можно применять газовую резку. Однако при этом необходимо удалить твердый слой металла, что является весьма трудоемкой операцией. В этой же работе отмечается, что обнаруженные в узлах автосамосвалов трещины удаляли способом воздушно-дуговой строжки с применением угольных электродов. Подготовленные кромки зачищали абразивным камнем до полного удаления ржавчины, окалина, масла и других загрязнений.

В то же время наиболее предпочтительным способом для формирования разделки кромок является механическая обработка [14]. Соединения,



разделку кромок для сварки которых выполняли способом фрезерования с помощью специального устройства, имели более высокую сопротивляемость усталостным разрушениям, чем соединения с разделкой кромок, произведенной газокислородной резкой.

В работе [5] отмечается, что на свойства сварных соединений оказывают влияние параметры разделки кромок. Слишком узкая разделка способствует возникновению дефектов (шлаковых включений, несплавлений с основным металлом), а слишком широкая — увеличивает продолжительность сварки, затрудняет управление тепловложением и приводит к большому расходу сварочных материалов.

В связи с этим для балки рукоятки и двуногой стойки толщиной 50 и 30 мм наиболее оптимальными являются следующие параметры разделки: скос каждой кромки 10° , зазор 12 мм, подкладное кольцо толщиной более 3 мм и шириной 20... 24 мм. Температура предварительного подогрева для балки рукоятки равна 230, а для стойки — 120°C .

После удаления повреждений и формирования разделки кромок приступают непосредственно к процессу сварки. Разработке технологического процесса ремонтной сварки обычно предшествуют исследования, целью которых является изучение влияния того или иного фактора на работоспособность восстановленного узла конструкции. Поскольку значительная доля разрушений конструкций связана с образованием в них усталостных трещин, естественно, акцент в тематике исследований направлен на разработку способов повышения сопротивляемости отремонтированных соединений этому виду разрушения.

В работе [15] описаны исследования сопротивляемости усталостным разрушениям в стыковых сварных соединениях морских конструкций из стали St-52-3, подвергавшихся ремонтам. Испытания проводили на образцах толщиной 200 мм и длиной 500 мм. Образцы имели первоначальные стыковые швы, выполненные сваркой под флюсом. Затем на этих образцах моделировали ремонтные этапы работ. Производили разделку под ремонтную сварку вблизи первоначального шва (в месте возникновения усталостных трещин). После этого выполняли многопроходную ремонтную сварку в специальной камере, заполненной инертным газом под давлением 1,6 МПа с применением пульсирующей дуги. Давление газа, создаваемое в камере, соответствовало давлению воды на глубине 160 м.

Испытания на усталость проводили на воздухе и в морской воде на базе 2 млн циклов при нулевом цикле нагружения. Большинство образцов разрушились по ремонтным швам, некоторые — по первоначальному швам. Пределы выносливости σ_0 для образцов, выполненных по оптимальной и реальной технологиям, равнялись соответственно 116 и 107 Н/мм^2 . У образцов, выполненных по реальной ремонтной технологии и испытанных в морской воде, $\sigma_0 = 40\text{ Н/мм}^2$. Испытания показали, что предел выносливости сварных ремонтных соединений существенно снижается под действием морской воды.

В работе [16] описано усовершенствование технологии ремонтной сварки рельсов путем замены ручной дуговой сварки механизированной в углекислом газе. При испытании сварных рельсов на усталость установлено, что наибольшую сопротивляемость усталостным разрушениям имеют отремонтированные сварные соединения рельсов, выполненные механизированной сваркой в углекислом газе с предварительным и сопутствующим подогревом.

Соединения рельсов, полученные в углекислом газе проволокой Св-08ХЗГ2СМ с подогревом изделий, имеют несколько более высокую сопротивляемость усталостным разрушениям, чем соединения, выполненные с подогревом проволокой Св-08Г2С. Отремонтированные с использованием сварки с предварительным и сопутствующим подогревом проволокой Св-08ХЗГ2СМ рельсы имеют сопротивляемость усталостным разрушениям, равную таковой цельнокатаных рельсов.

В работах [17, 18] описан способ повышения сопротивляемости сварных соединений усталостному разрушению, основанный на применении сварочной проволоки с 10 % Ni и 10 % Cr, которая обеспечивает низкую температуру мартенситных превращений в металле сварного шва. Мартенситные превращения сопровождаются увеличением объема и расширением металла шва на конечной стадии охлаждения. Благодаря этому в сварном соединении возникают сжимающие остаточные напряжения, способствующие повышению сопротивляемости сварных соединений усталостным разрушениям.

С применением данного способа выполнили ремонтную сварку тавровых соединений стали SM 570 с $\sigma_{0,2} = 579\text{ МПа}$ в смеси 80 % Ar и CO_2 на режиме $I_{\text{св}} = 290\text{ А}$, $U_{\text{д}} = 30\text{ В}$, $v_{\text{св}} = 30\text{ см/мин}$. Температура начала мартенситного превращения составляла 180°C , а заканчивалось оно при комнатной температуре. Предел выносливости сварных соединений, выполненных указанной проволокой, в 2 раза выше, чем у соединений, в металле которых не происходят превращения, сопровождающиеся увеличением объема.

Кроме перечисленных способов, для повышения сопротивляемости сварных соединений усталостным разрушениям, рекомендуется применять специальные виды обработки, такие как ударная обработка, шлифовка, оплавление швов с использованием технологии ТИГ и др. [4, 19–21].

Обработка сварных соединений пневматическим молотком создает в них сжимающие напряжения, которые повышают сопротивляемость усталостным разрушениям [20]. Наилучшие результаты достигнуты при ударной нагрузке 280 кПа и шестиразовой обработке одного и того же сварного соединения. Толщина пластически деформированной зоны составляла 0,5 мм.

В работе [4] приведены результаты испытания на трехточечный изгиб тавровых соединений стали повышенной прочности с $\sigma_{0,2} = 400\text{ МПа}$, моделирующих наиболее широко распространенные узлы сварных конструкций. Образцы длиной 220 мм, шириной 68,5 мм и толщиной 12,5 мм с попе-

речным ребром сваривали вручную покрытыми электродами. Испытания показали, что в результате снятия усиления шва шлифовальным кругом сопротивляемость усталостным разрушениям образцов повышается больше, чем после проковки пневматическим молотком (соответственно в 2,6 и 2,5 раза). Это объясняется тем, что при проковке в поверхностном слое металла толщиной 3,5 мм образуется наклеп и заметно увеличивается твердость, а при шлифовке твердость металла существенно не возрастает.

Рекомендуется подвергать ремонтные сварные соединения таким видам обработки, которые повышают сопротивляемость разрушениям [10]. Отмечается, что в ремонтных соединениях необходимо снижать уровень остаточных напряжений растяжения, уменьшать остроту надреза, удалять трещиноподобные дефекты. Для этого отремонтированные сварные соединения следует шлифовать, оплавливать вольфрамовым электродом в инертном газе или плазменной горелкой, проковывать пневматическим молотком. Первые два способа улучшают форму сварного соединения, третий — снижает уровень остаточных напряжений растяжения в них.

Образцы, имитирующие узлы мостовых конструкций, подвергали ремонтной сварке с применением различных технологий [22]:

сварка с полным проплавлением, сварочные валики обрабатывали шлифовальным кругом;

сварка с выполнением ремонтных швов по той же технологии, что и в первом случае, а затем оплавление вольфрамовым электродом в инертном газе по способу ТИГ;

заварка с выполнением дополнительных швов для увеличения глубины первоначального шва, затем валик оплавливали вольфрамовым электродом в инертном газе.

После ремонтной сварки образцы подвергали усталостным испытаниям, показавшим, что образцы, подвергнутые ремонту по третьей технологии, имели самую высокую сопротивляемость усталостным разрушениям. Их предел выносливости в 3 раза превышал предел выносливости исходных неремонтированных сварных соединений с дефектами.

Предложена методика оценки усталостной прочности сварных конструкций с дефектами, основанная на применении коэффициента улучшения W [23]:

$$W = \Delta\sigma_F / \Delta\sigma_N,$$

где $\Delta\sigma_F$ — размах приложенной нагрузки к реальному соединению; $\Delta\sigma_N$ — расчетная сопротивляемость сварного соединения разрушению при нагружении, аналогичному в реальной конструкции.

При $W < 2$ повышение усталостной прочности конструкции необходимо проводить традиционными способами (проковкой, зачисткой). В случае $W \geq 2$, помимо этих способов, целесообразно дополнительное повышение предела выносливости соединений.

После выбора сварочных материалов и способов сварки приступают непосредственно к выполнению

ремонтной сварки. При этом учитывают тип конструкции и свойства стали, из которой она изготовлена. Ниже приведены примеры выполнения ремонта конструкций различного назначения, эксплуатируемых в различных условиях и при разных видах нагрузок.

В работе [14] описан процесс ремонтной сварки автосамосвала М-200 с использованием электродов со фтористо-кальциевым покрытием марки УОНИ-13/55. Сварку выполняли короткой дугой валиками шириной не более 3 диаметров электрода, блочным способом. Блоки сваривали поочередно. Начало и конец блока смещали относительно предыдущих на 20...30 мм. При сварке применяли предварительный подогрев до 110...120 °С.

Для ремонтной сварки балки рукояти ковшей экскаваторов ЭЖГ-12,5, изготовленных из сталей 08ГДНФ и ИЖ-6 [5], изначально рекомендовали электроды ЖАНП-4. Однако из-за недостаточной пластичности стали и ее большой толщины (50 мм) предпочтение отдано электродам УОНИ-13/55. Равнопрочности сварного соединения в данном случае достигали за счет перехода в шов легирующих элементов из основного металла. Применение более пластичного присадочного металла исключает образование закалочных структур в шве, что препятствует распространению трещин, возникающих во время эксплуатации [5].

При ремонте трубопроводов первый и второй слой выполняют электродами типа FOX EV 47 диаметром 3,25 и 4,00 мм, а последующие слои — диаметром 6 мм, что позволяет измельчить структуру и предотвратить образование трещин [24]. Описана технология ремонта мостовых кранов, при эксплуатации которых в них возникают усталостные трещины в верхней полке двутавровой балки, между ребром и полкой балки и в других узлах кранов [25]. При ремонтной заварке усталостных трещин сначала удаляют трещины, а затем выполняют сварку крупными валиками за один проход. После этого сварочный валик шлифуют с целью уменьшения концентрации напряжений и повышения сопротивляемости усталостным разрушениям.

При ремонте сварных швов между верхней полкой и ребром двутавровой балки также удаляют трещины шлифовкой или воздушно-дуговой строжкой, а затем выполняют сварку угловых швов. Качество швов контролируют ультразвуковым методом.

В работе [26] описан так называемый волновой или двухцикловый способ ремонтной сварки, применяемый для оборудования электростанций, изготовленного из стали с 2,25 % Сг и 1 % Мо. Ручную дуговую сварку стыковых соединений выполняли электродами диаметром 4 мм. Время между двумя циклами при волновом способе сварки достигает 40 с. При первом цикле температура нагрева металла составляет 1350 °С, а при втором — 800 °С. Применение волнового способа позволило существенно снизить твердость металла шва и ЗТВ, поскольку при втором цикле происходит отжиг металла шва и ЗТВ, образовавшихся при прохождении первого цикла. После второго цикла сварки образуется довольно пластичная структура



металла ЗТВ с твердостью 276 HV. Применение трехволнового способа сварки позволило снизить твердость металла ЗТВ до 250 HV.

После восстановления целостности отдельных узлов или конструкций проверяют качество ремонтных соединений. Если оно после ремонтной сварки соответствует уровню качества первоначального сварного соединения, то снижение долговечности, как правило, незначительно [27].

Поскольку при ремонте сварных соединений вероятность образования в них дефектов достаточно высока, этому процессу уделяют особое внимание. Как правило, для контроля качества сварных соединений применяют ультразвуковой, рентгенографический, магнитопорошковый, выборочной разрезки сварных соединений и другие способы.

Проверку ремонтных соединений производили путем их выборочной разрезки [2]. Осматривали разрез с целью установления отсутствия или наличия сварочных дефектов, измеряли твердость. Рекомендуется производить ультразвуковой и радиографический контроль ремонтных сварных соединений.

Неразрушающий контроль ремонтных сварных соединений осуществляли с помощью ультразвука или магнитных частиц [4]. Ультразвуковой контроль проводили с целью выявления трещин, шлаковых включений, пор и т. д. Кроме того, рекомендуется измерять твердость металла шва и ЗТВ в сварном соединении по Виккерсу и контролировать изменение размеров изделия.

Необходимо отметить тот факт, что на практике выполнение ремонтной сварки в одном соединении может повторяться несколько раз. О том, как это сказывается на дальнейшей работоспособности изделия, единого мнения нет.

Так, в работе [8, 28] отмечается, что в результате ремонта увеличивается зона с измельченным зерном на 0,3; 7,6; 48,2 % по сравнению с первоначальной сваркой соответственно после первого – третьего ремонтов, но такое изменение ширины зоны с мелким зерном не влияет на прочностные свойства соединения. Как следует из работы [29], после многократных ремонтов прочностные свойства металла ЗТВ сварных соединений снижаются незначительно. В то же время ударная вязкость в металле ЗТВ сварных соединений после трех ремонтов снижается на 15... 20 %. Для повышения сопротивляемости усталостным разрушениям ремонтные швы должны быть сварены без подваликовых трещин, и иметь пониженную твердость.

В работе [20] установлено, что после третьего ремонта сопротивляемость металла сварных соединений усталостным разрушениям снижалась, однако после четвертого ремонта она увеличивается, что объясняется неполным удалением усталостной трещины перед ремонтной сваркой. Другие исследователи установили, что количество ремонтов в одном и том же сварном узле нужно ограничивать тремя, поскольку их большее количество ухудшает свариваемость металла.

С учетом большой значимости ремонтной сварки в Японии создана специальная база данных по ремонтам мостов, в которых при эксплуатации воз-

никали усталостные трещины [30]. Она введена в Интернет и содержит информацию об опыте ремонта мостов в Японии и других странах. В нее включены описания восстановления 96 мостов, ремонт которых производили начиная с 1960-х гг., а также фотографии конструкций мостов, их дефектов, отремонтированных узлов конструкций, описания способов ремонта.

В базе данных указывается на существование двух подходов к ремонту повреждений, вызванных усталостным разрушением конструкции: удаление повреждений; повышение сопротивляемости конструкции усталостным разрушениям.

База данных содержит следующие разделы: область применения ремонтных технологий; условия проведения ремонтов; тип конструкции; особенности нагружения; описание повреждений; применяемые способы ремонта.

В соответствии с классификацией, приведенной в базе данных, сварные конструкции повреждаются в результате следующих причин:

- наличия дефектов, образовавшихся при сварке;
- применения узлов конструкций с низкой сопротивляемостью усталостным разрушениям;
- наличия остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях конструкций;
- использования конструкций, не пригодных к эксплуатации в условиях усталостного нагружения.

В базе данных приведен следующий перечень способов восстановления сварных конструкций мостов:

- удаление трещин;
- заварка мест, где были удалены трещины;
- поверхностная обработка сварных соединений с помощью оплавления вольфрамовым электродом в инертном газе или проковка пневмомолотом;
- укрепление болтами;
- улучшение формы конструкций;
- высверливание тормозящих трещину отверстий;
- модификация соединительных деталей.

В базе данных содержатся рекомендации по применению способов ремонта для различных случаев повреждения сварных конструкций. При наличии в конструкции сварочных дефектов и образовании от них усталостных трещин необходимо удалять эти трещины, заваривать места удаления трещин с последующей поверхностной обработкой сварных соединений с помощью пневмомолота для создания сжимающих остаточных напряжений.

При наличии в конструкции узлов с низкой сопротивляемостью усталостным разрушениям рекомендуется уменьшать уровни остаточных напряжений растяжения и эксплуатационных напряжений, действующих на конструкцию, путем увеличения поперечного сечения конструкции.

В базе данных приведена информация о наблюдениях за отремонтированными сварными конструкциями мостов в течение многих лет, свидетельствующая о существенном увеличении срока эксплуатации конструкции до появления новых повреждений после улучшения формы конструкции.

Представленный обзор свидетельствует о большом значении ремонтной сварки. Приведенная в нем информация помогает успешно решать определенные задачи по восстановлению поврежденных конструкций. Вместе с тем остается еще много неясных вопросов, требующих уточнения.

- Maccocaire C. Repair welding: how to set up a shop // *Welding J.* — 1991. — № 8. — P. 54–56.
- Irving R. R. Can industry afford the high cost of weld repair? // *Iron Age.* — 1980. — № 3. — P. 49–55.
- A study on cracks on the oxygas cut surfaces of weld grooves of 14MnMoVN steel plates during cold forming // Y. Donglin, H. Yongfu, Z. Rangez et al. // *Trans. China Welding Inst.* — 1982. — № 4. — P. 159–164.
- Branco C. M., Infante V., Maddox S. J. A fatigue study on the rehabilitation of welded joints. — S. I. [1999]. — 29 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1769-99*).
- Ларионов В. П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. — Новосибирск: Наука, 1986. — 168 с.
- Волков А. С. Причины появления дефектов вблизи исправленных участков сварных швов // *Свароч. пр.-во.* — 1974. — № 8. — С. 33–34.
- Somardzic I., Siewert T. Reliability improvements in repair welding of high strength steels. — S. I. [2001]. — 13 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-2002-01*).
- Lai M. O., Fong H. S. Fatigue performance of repaired pipelines steel weld // *J. Mater. Sci. Lett.* — 1988. — № 12. — P. 1353–1354.
- Brink S. H. van den. Reparatielassen // *Lastechniek.* — 1989. — № 2. — P. 40–41, 43, 45, 47.
- Recommendation on the repair of fatigue-loaded welded structures. — S. I. [1996]. — 16 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1632-96*).
- О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // *Автомат. сварка.* — 2000. — № 7. — С. 3–12.
- Petershagen H. Recommendation de le'IS concernant la reparation de structures soudees sollicitees en fatigue // *Soudage et techn. connexes.* — 1999. — № 5/6. — S. 29–34.
- Miki C. The repair of fatigue loaded welded structures. — S. I. [1997]. — 10 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII WG5-14-97*).
- Рекомендации по выполнению сварочно-монтажных работ при изготовлении и ремонте металлоконструкций и деталей машин, предназначенных для работы в районах Крайнего Севера / В. П. Ларионов, Р. С. Григорьев, О. И. Слепцов, К. Н. Тулоханов. — Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1980. — 23 с.
- Rohe R., Wormicke R. Schwingfestigkeitsuntersuchungen an hyperbar geschweißten Reparaturen // *Schweissen und Schneiden.* — 2000. — № 3. — S. 150–157.
- Сергученко Ю. В., Носовский Б. И., Чугарев В. В. Совершенствование технологии ремонта железнодорожных рельсов с применением дуговой сварки // *Автомат. сварка.* — 1998. — № 3. — С. 46–48.
- Ohta A., Maeda Y., Suzuki N. Fatigue life extension by repairing fatigue cracks initiated around box welds with low transformation temperature welding wire. — S. I. [2000]. — 13 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1835-00*).
- Ohta A., Suzuki N., Maeda Y. Extension of fatigue life by additional welds using low transformation temperature welding material. — S. I. [2001]. — 8 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1881-01*).
- Miki C. Repairing and reinforcing of fatigue demanded steel bridges // *Intern. conf. on performance of dynamically loaded welded structures (San-Francisco, July 14–15, 1997).* — San-Francisco, 1997. — P. 286–298.
- Dixter R. J., Kelly B. A. Research on repair and improvement methods // *Ibid.* — P. 273–285.
- Miki C., Anami K., Kaji H. Repair of fatigue cracks bridge structures. — S. I. [1997]. — 14 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII WG5-12-97*).
- Konishi T., Miki C. Fatigue assessment of repaired structural components. — S. I. [1998]. — 24 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1732-98*).
- Chapeau W. Choix d'un mode de reparation des fissures de fatigue dans les constructions soudees // *Revue Soudure.* — 1988. — № 3–4. — P. 31–35.
- Alberry P. J., Myers J., Chew B. An improved welding technique for heat affected zone refinement // *Welding and Metal Fabrication.* — 1977. — № 9. — P. 549–553.
- Timossi L., Servetto C. Inspection and repairing methodologies on cracks in steel manufacturing plants. — S. I. [1996]. — 9 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XV-908-96*).
- Bowers R. J., Letts M. W. Weld-repair simulation in 2,25Cr-1Mo steel. — S. I. [1996]. — 21 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1856-96*).
- Gregory E. N., Slater G., Woodley C. C. Weld repair of cracks in steel bridge members // *Rept. Nat. Coop. Highway Program.* — 1989. — № 321. — P. 1–4.
- Lai M. O., Fong H. S. Effect of repeated repairs on the strength of welded joints // *Welding J.* — 1989. — № 6. — P. 28–30.
- Blagojevic A. Utjecaj popravljivanja grešaka na kvalitet zavarjenog spoja celika povisene č30. vrtoč31. // *Zavarivanje.* — 1975. — № 4. — S. 111–122.
- Miki C., Goto E., Jto Y. Data base of repair case for fatigue failure on Internet. — S. I. [2001]. — 13 p. (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1887-01*).

Peculiarities of performing repair welding operations in reconditioning of metal structures, mechanisms, machines and engineering facilities are reviewed. Methods for repair of defects and groove preparation, repair welding technologies, welding consumables used for repair, and methods for inspection of quality of welded joints, which are most extensively applied for repair and reconditioning operations, are described.

Поступила в редакцию 20.09.2004

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЛЕГЧЕННЫХ СВАРНЫХ БАЛЛОНОВ

Технология разработана в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и направлена на решение двух приоритетных задач: снижение удельной массы и повышение эксплуатационной надежности.

Новый подход заключается в слоистом устройстве стенки баллонов и рациональном сочетании металлов с разными физико-механическими свойствами. Он позволяет:

- ✓ применять металлы с высокой удельной прочностью;
- ✓ повысить эксплуатационную надежность путем сведения к минимуму несовершенства конструкции, связанные со сварными швами на цилиндрической части и горловине;
- ✓ сделать технологию простой и доступной для осуществления в заводских условиях.

Зарубежные аналоги отсутствуют.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 12
Тел.: (38044) 269 06 90, 261 50 58