



Научная статья

УДК 622.118.17

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83>

Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов

А.П. Макаров^a, В.А. Храмовских^{ba}, К.А. Непомнящих^c^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Остаточные напряжения в металлоконструкциях карьерного оборудования, вызванные сваркой, возникают из-за неравномерного одновременного нагрева и охлаждения локальных участков конструкций, переменных скоростей охлаждения в разных областях сварного шва, а также деформаций, связанных с металлургическими фазовыми преобразованиями. Остаточное напряжение в сварном соединении может существенно увеличить внешнюю нагрузку и привести к разрушению конструкции. Исследования по расчету, измерению и снижению остаточных напряжений при сварке являются важными вопросами при прогнозировании ресурса узлов металлоконструкций горных машин и оборудования. Точная количественная оценка остаточных напряжений в сварных изделиях, включая ремонтные швы, а также поиск основных принципов, лежащих в основе методов устранения остаточных деформаций, представляет значительный практический интерес, актуальный и для авторов данного исследования. В ходе работы нами была обобщена информация по последним исследованиям в области оценки и измерения остаточных напряжений, вызванных электрогазосварочным воздействием. Предложено использование в исследовании различных техник и аналитических методов для количественной оценки остаточных напряжений сварного шва на основе механики разрушения, что позволяет на ранних стадиях предпринимать упреждающие меры по снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание сварных металлоконструкций карьерных экскаваторов. В результате проведенных работ сформированы предложения для снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов.

Ключевые слова: остаточное напряжение и деформация, электрогазовая сварка, конечный элементный анализ

Для цитирования: Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А. Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83>.

Original article

Methods to reduce residual welding stresses in mining excavator metal structures

Anatoly P. Makarov^a, Vitaly A. Khramovskikh^{ba}, Kirill A. Nepomnyashchikh^c^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Residual stresses in metal structures of mining machinery caused by welding occur due to simultaneous uneven heating and cooling of local sections of structures, variable cooling rates in the different areas of the weld and deformations caused by metallurgical phase transformations. Residual stress in the welded joint can significantly increase the external load that can lead to structural failure. Research on the calculation, measurement and relief of residual stresses under welding is an important issue when predicting the service life of metal structure units of mining machinery and equipment. An accurate quantitative estimation of residual stresses in welded products, repair welds included, as well as the search for the fundamental principles of the elimination methods of residual deformations are of considerable practical interest, which is relevant for the authors of this paper. The study involved a general review of the latest researches in the field of estimation and measurement of residual stresses caused by electrogas welding. It has been proposed to use various techniques and analytical methods for quantitative estimation of welded joint residual stresses on the basis of fracture mechanics, which enabled to take preventative measures at early stages to reduce the cost of repair and maintenance of welded metal structures of mining excavators. The conducted study resulted in formulating the proposals on relief of residual welding stresses in the metal structures of mining excavators.

Keywords: residual stress and deformation, electrogas welding, finite element analysis

© Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А., 2023



For citation: Makarov A.P., Khramovskikh V.A., Nepomnyashchikh K.A. Methods to reduce residual welding stresses in mining excavator metal structures. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):72-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83>.

Введение

Остаточные напряжения при сварке возникают из-за несоответствия между различными деталями, областями внутри одной и той же детали, возникающими из-за неравномерной термической деформации, а также деформаций, возникающих в результате затвердевания и фазовых превращений в твердом состоянии. Во время сварки область вокруг сварочной ванны неизбежно связана с растягивающими остаточными напряжениями в направлении сварки, а растягивающие напряжения уравниваются сжимающими напряжениями дальше от линии сварки. Остаточное напряжение растяжения, вызванное сваркой, способствует хрупкому разрушению, деформации при изгибе и коррозионному растрескиванию металлоконструкций под напряжением и снижает усталостный ресурс сварных конструкций в процессе эксплуатации. В связи с этим при расчетах на статическую и динамическую прочность и долговечность металлоконструкций остаточные напряжения следует учитывать наряду с напряжениями от внешних нагрузок.

Основным направлением исследований остаточных напряжений, вызванных сваркой, является разработка математических моделей для оценки и экспериментальных методов измерения, а также снижения остаточных напряжений для различных геометрий соединений и условий сварки. Поиск способов устранения негативного влияния остаточных напряжений может рассматриваться на разных стадиях жизненного цикла работы металлоконструкций карьерных экскаваторов от стадии проектирования и выбора конструкционных материалов через длительный процесс эксплуатации до ремонтного воздействия. Область данного исследования заключается в поиске эффективных методов снятия остаточных напряжений на стадиях эксплуатации и ремонта.

Материалы и методы исследования

Оценка остаточных напряжений, вызванных сваркой, на основе аналитических расче-

тов температурного поля приводит исследователей к ограниченному успеху. Компьютерные численные модели привлекают значительное внимание, поскольку с их помощью можно учитывать реалистичные граничные условия, свойства материала, зависящие от температуры, а также сложную геометрию соединения. Тем не менее в ходе применения численных моделей исследователи сталкиваются с определенными проблемами: для точной оценки температурного поля в сварном шве необходимы точные трехмерные модели и анализ, учитывающий разные режимы теплопередачи, такие расчеты, как правило, требуют больших вычислительных затрат; изменение термомеханических деформаций по мере затвердевания и охлаждения металла в сварочной ванне зависит от переходного температурного поля и механических ограничений, связанных с геометрией соединения, которые слишком сложны для рассмотрения; модели, которые могут точно описать термоупругопластическую реакцию материалов на напряжение, деформацию и учет влияния твердофазного фазового превращения, малодоступны для многих материалов [1–5].

Анализ методом конечных элементов, пример использования которого изображен на рис. 1, является мощным инструментом. Данный метод можно использовать для точного определения остаточного напряжения и деформации сварных соединений, однако он требует значительных вычислительных затрат и времени, что затрудняет его применение в практических проектах. В связи с этим некоторыми исследователями были предприняты попытки объединить различные методы анализа для повышения эффективности вычислений с использованием искусственных нейронных сетей, которые признаны одним из самых популярных и перспективных методов машинного обучения, преодолевающим ограниченность и неэффективность математических моделей [6–10].

Такого рода системы для прогнозирования остаточного напряжения и деформации сварки обладают рядом преимуществ и способны моделировать, оптимизировать и прогнозировать

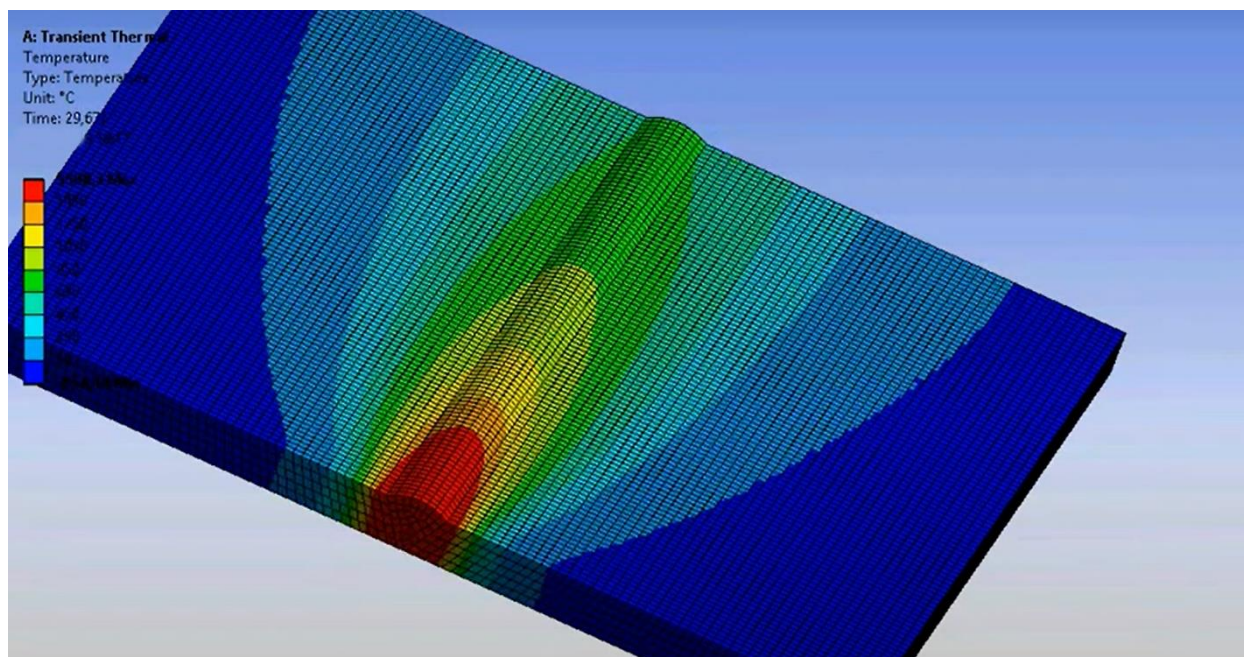


Рис. 1. Моделирование теплового процесса при сварке стыкового соединения в программном комплексе ANSYS, базирующемся на методе конечных элементов
Fig. 1. Modeling of thermal process under butt joint welding in the ANSYS software package based on the finite element method

сложные системы под воздействием множества параметров, что особенно подходит для сварочного процесса с присущей ему сильной нелинейностью. Модель искусственной нейронной сети для прогнозирования остаточных напряжений и деформаций, полученных при электрогазовой сварке, использует ряд входных данных. Некоторые из них, такие как сварочный ток, тип охлаждения и сварочный материал, влияют на тепловое поле, в то время как толщина металла, угол разделки кромок, зазор и сварочный материал могут влиять на жесткость свариваемой конструкции. Как тепловое поле, так и жесткость конструкции оказывают сильное влияние на присущую деформацию, которая определяет остаточное напряжение и деформацию, замеченная корреляция между переменными гарантирует, что входные данные будут варьироваться в зависимости от выходных данных самообучения системы. Остаточные напряжения и деформация являются ключевыми факторами в определении надежности и срока службы сварной металлоконструкции горных машин в практическом проектировании [11–13].

Сравнение предсказаний нейронной сети и результатов анализа методом конечных элементов показывает, что модель нейронной сети достаточно точна и эффективна в прогно-

зировании остаточных напряжений и деформаций. Это делает процедуру прогнозирования более эффективной и менее трудоемкой.

Следует учитывать, что для сварных соединений, подвергающихся циклической нагрузке в течение срока службы, остаточные напряжения не находятся на постоянном уровне, а расслабляются в течение циклов нагружения, что создает дополнительные проблемы при анализе остаточных напряжений. Некоторые исследователи обнаружили влияние приложенной циклической нагрузки на остаточные напряжения и фиксировали расслабление остаточных напряжений в сварных конструкциях. Экспериментальные данные исследования сварных соединений под изгибающими нагрузками показывают, что остаточные напряжения уменьшаются, когда приложенные напряжения эквивалентны 95 % предела текучести. Они также определили некоторые факторы, влияющие на расслабление остаточных напряжений из-за циклической нагрузки, такие как начальные распределения остаточных напряжений, амплитуда напряжений, коэффициент напряжений, количество циклов и пластичность материала со степенью кинематического упрочнения или размягчения. На сегодняшний день несколько исследований показали, что значительные ре-



лаксации происходят уже в первом цикле загрузки. Для прогнозирования релаксации остаточных напряжений крайне важно все вышеупомянутое, а также модели с различными влияющими факторами.

Влияние остаточных сварочных напряжений на надежность горных машин и оборудования, эксплуатируемых на карьерах Севера, где на отрицательные среднесуточные температуры приходится более полугода, является существенным, поскольку оно приводит к хрупким разрушениям. Хрупкие разрушения возникают при неблагоприятном сочетании конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Как показывает практика, изучение хрупкого разрушения как наиболее опасного вида разрушений, развивающегося катастрофически быстро и под действием сравнительно низких напряжений, гораздо важнее, чем вязкого.

В качестве основных факторов, влияющих на разрушения горных машин, можно отметить следующее: значительные циклические нагрузки, испытываемые металлоконструкциями; большие динамические и статические напряжения; низкие значения и существенные колебания суточных температур в весенне-зимний период эксплуатации; недостаточная пластичность и показатели хладостойкости используемых материалов.

У большинства крупногабаритных сварных деталей при больших толщинах сечений конструкций, при изменении свойств металла из-за наклепа, старения, вида термообработки, а также при пересечении швов, расположенных пространственно, возникает местное уменьшение пластичности вследствие сложного объемного напряженного состояния. На долговечность металлоконструкций существенную роль оказывает характер их нагружения и остаточные напряжения, возникающие после сборки и сварки.

Для увеличения сопротивления металлоконструкций хрупкому разрушению используют стали повышенной хладостойкости либо, если возможно, увеличивают толщину элементов или приваривают усилители (косынки, накладки и т. п.). В результате исследований, проведенных в Удачнинском и Айхальском горно-обогатительных комбинатах АК «АЛРОСА»,

установлено, что трещины в зоне сварного соединения возникают в некоторых случаях на концевых участках швов. Этот факт не случаен, так как в конце швов, как правило, имеют место конструктивные (сопряжения различных элементов – трубы и листового металла) и технологические (высокие остаточные напряжения) концентраторы. Этот факт отмечен на нижней и верхней секции стрелы экскаваторов ЭКГ-8И, ЭКГ-12,5 и их модификациях ЭКГ-10 и ЭКГ-15 [14].

При стыковой многопроходной сварке выполнение уже второго шва приводит к значительному увеличению поперечной усадки соединения $\Delta_{пу}$ и явно выраженной неравномерности ее вдоль стенки:

$$\Delta_{пу} = \frac{\alpha}{c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v_c \cdot \delta_n}, \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $1/K$; c – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot K)$; ρ – плотность, $кг/м^3$; $c \cdot \rho$ – объемная теплоемкость, $Дж/м^3 \cdot K$; q – эффективная тепловая мощность источника нагрева, $кВт$; v_c – скорость сварки, $м/с$; δ_n – толщина пластины, $м$.

Причина возникновения градиента поперечной усадки при сварке толстостенных элементов находит качественное объяснение в следующем. Первый шов выполняется практически по ненапряженному металлу. Влияние прихваток, если они используются, не вызывает практически никакого напряжения в соединенных элементах. Примерно равномерная поперечная усадка, определяемая по зависимости (2), возникает в результате термомеханических явлений, имеющих место в зоне сварного соединения во время термического цикла сварки. При наложении первого шва остаточное напряженное состояние в его зоне является самоуравновешенным.

Второй шов выполняют по напряженному металлу. В результате вторичного переплавления части стыка напряженное состояние в зоне соединения становится неуравновешенным, что приводит к перераспределению поля остаточных напряжений непосредственно во время сварки и деформации в плоскости свариваемых элементов. Экспериментально, а также в результате измерений на натурных образцах установлено, что максимальная поперечная усадка всегда имеет место в начале выполнения второго шва. Сварка второго шва



приводит при достаточно высокой линейной энергии к «перерезанию» имеющегося сварного соединения от первого прохода. В зоне дуги при втором проходе в результате перераспределения продольных и поперечных остаточных напряжений возникают момент M_x и усилие P_x . Модель распределения сил при стыковой многопроходной сварке представлена на рис. 2 [15]. При этом

$$M_x = P_x \cdot h, \quad (2)$$

где M_x – изгибающий момент; P_x – равнодействующая остаточных усилий сжатия или растяжения половины эпюры остаточных усилий (напряжений); h – расстояние между равнодействующими силами половины эпюры.

Момент M_x может быть значительным, так как в зоне соединения для малоуглеродистых и низколегированных сталей остаточные напряжения достигают предела текучести. Вместе с тем момент M_x примерно остается постоянным при выполнении второго шва, так как эпюра остаточных продольных напряжений мало изменяется вдоль оси соединения за исключением концевых участков. У конца шва имеют место высокие поперечные напряжения (230 МПа), а вблизи оси шва – высокий пик сжимающих напряжений (276 МПа). Поперечные напряжения вблизи кромки по всему сечению являются растягивающими и достигают своего максимума (130 МПа) в середине пластины. Такое распределение напряжений объясняется поперечной усадкой и наличием масштабного фактора.

Еще большая величина остаточных напряжений сварки наблюдаются, если конструкция сваривается полый в виде коробчатого сечения.

На карьерах Севера все большее применение находят гидравлические погрузчики и экскаваторы с коробчатым сечением стрел и рукоятей. Тем не менее балочные конструкции рабочего оборудования этих машин подвержены значительным изгибающим нагрузкам, которые наряду с низкими температурами вызывают образование трещин в металлоконструкциях. Обычно балки коробчатого сечения собирают на жестких прихватках для сохранения взаимного расположения стыкуемых элементов, поэтому можно считать, что сечение балки работает как одно целое. Для изготовления рабочего оборудования экскаваторов и погрузчиков наиболее широкое распространение получили малоуглеродистые и низколегированные стали. Высокопрочные и высоколегированные стали не используются ввиду их высокой стоимости, ограниченного объема их выпуска и усталостных явлений, обусловленных характером работы горно-транспортного оборудования. Применение низколегированных сталей в стреле и рукояти наиболее рационально при больших нагрузках на рабочий орган, когда размеры сечений определяются не столько из условий жесткости, сколько из условий прочности.

При сварке кольцевых многопроходных швов возникновение напряжений зависит как от поперечной усадки очередного уложенного

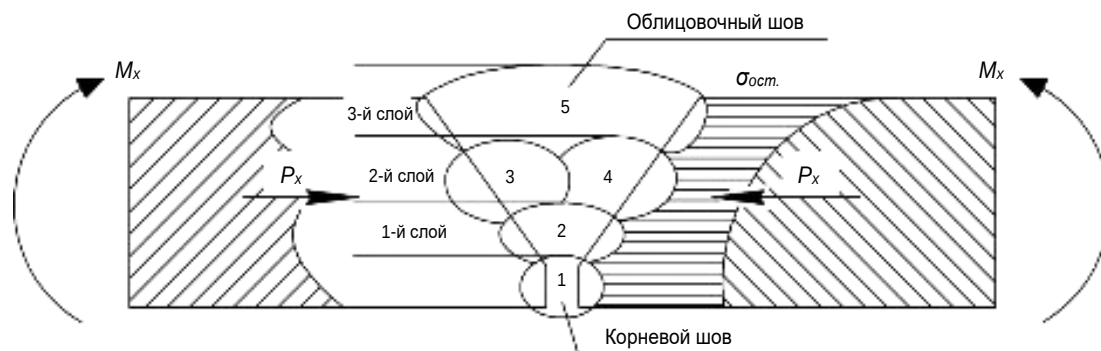


Рис. 2. Модель распределения сил при стыковой многопроходной сварке:

$\sigma_{ост.}$ – остаточное напряжение в металлоконструкции при многопроходной сварке;

M_x – изгибающий момент; P_x – равнодействующая остаточных усилий сжатия или растяжения половины эпюры остаточных усилий (напряжений)

Fig. 2. Force distribution model for butt multi-pass welding

$\sigma_{ост.}$ – residual stress in the metal structure under multi-pass welding;

M_x – bending moment; P_x – resultant force of the residual compressive or tensile forces of the half of the diagram of residual forces (stresses)



валика, так и от его продольной усадки. Образование напряжений и пластических деформаций в корне шва зависит от типа разделки и последовательности укладки валиков.

При укладке очередного слоя в разделку независимо от того, уложен он с внутренней или с наружной стороны толстостенной трубы, возникает окружная усадка слоя, вызывающая радиальную нагрузку, которая направлена к оси цилиндра.

При сварке разделкой наружу, коим образом, собственно, и свариваются все трубчатые конструкции экскаватора ЭКГ-15, изгибающий момент от поперечной усадки очередного слоя создает напряжение, направленное к оси оболочки, что совпадает с приращением напряжения от окружной усадки.

В практическом отношении больший интерес представляют поперечные деформации в корне многослойного шва с V-образной разделкой. Они могут оказаться настолько значительными, что вызовут разрушение металла.

При сварке V-образной разделкой наружу окружная усадка и изгибающие моменты вызывают растягивающие напряжения в корне шва, а поперечная усадка – сжимающие. При этом в корне шва практически всегда возникает растяжение.

Независимо от примененного способа сварки сварные соединения следует рассматривать как металлургические неоднородные области, простирающиеся от исходного металла через зону термического влияния, испытавшую воздействие высоких температур, до металла сварного шва, который можно считать литым металлом.

Подвергнув термообработке все сварное соединение, можно получить почти однородную металлургическую структуру наплавленного и исходного металлов. Тем не менее, как правило, у сварных соединений, впрочем, как и у резьбовых, заклепочных, усталостная прочность всегда ниже, чем у монолитной детали из такого же материала. Это связано со следующими факторами:

– нарушением однородности материала в зоне сварки и растрескиванием свариваемого металла и металла сварного шва из-за усадочных напряжений, возникающих в зоне термического влияния при охлаждении;

– недостаточностью глубины проникания металла сварного шва в основной металл;

– недостаточностью сплавления исходного металла и металла сварного шва в местах предыдущей сварки; подрезами на концах сварных швов из-за неаккуратной сварки;

– натеками металла сварного шва за пределы зоны сварки;

– шлаковыми включениями и пористостью, возникающими при нарушении технологии сварки;

– наличием поверхностных дефектов сварки [16–19].

Указанные явления приводят к концентрации напряжений. Концентрация напряжений, локализуемая геометрическими особенностями конструкции, а также она в местах соединения деталей существенно влияет на усталостную прочность (долговечность). Размеры вырезов, отверстий, канавок, мест соединений и других концентраторов напряжений зависят от их относительного расположения, вида напряжения и механических свойств материала детали. При восстановлении детали рекомендуется учитывать три рода напряжений:

1. Напряжениями первого рода называются остаточные напряжения сжатия – растяжения, уравнивающие себя в пределах детали или ее части.

2. Напряжения второго рода возникают при эксплуатации машин. При неравномерном распределении температуры в элементе конструкции между соседними зернами металла появляется несогласованность. Если какое-либо зерно структуры при охлаждении стремится сократиться, то соседние зерна будут препятствовать этому. Таким образом, они взаимно напрягут друг друга. В зерне, которое стремилось сократиться, возникают силы растяжения, а зерно, которое сопротивлялось, окажется сжатым. И чем больше перепад температур при быстром остывании детали, тем больше будут эти силы. В некоторых материалах они так велики, что детали растрескиваются или «взрываются» сразу или со временем.

3. Внутренние напряжения третьего рода возникают уже на атомарном уровне. Дефекты, вызываемые такими напряжениями,



настолько малы, что на протяжении десятков расстояний между атомами они уже исчезают. Они существуют как несовершенства структуры кристаллической решетки, являющиеся источниками дислокаций [14, 20].

Экспериментальные данные показывают, что расслабление остаточных напряжений происходит в основном в течение первого цикла нагрузки. Величина релаксации зависит от пластической деформации и, следовательно, от максимальной нагрузки циклических нагрузок. Остаточное напряжение и его расслабление влияют на коэффициент напряжений без изменения циклического диапазона напряжений.

Результаты исследования и их обсуждение

Остаточные напряжения вредны для металлоконструкций, полученных способом сварки, однако существуют способы уменьшения их величины. В настоящее время известно несколько основных принципов, лежащих в основе методов устранения остаточных деформаций и напряжений при сварке металлоконструкций. К ним относятся:

- уменьшение пластических деформаций сжатия при сварке путем подогрева, снижения распределенной энергии, уменьшения катетов швов, искусственного охлаждения, предварительной деформации растяжения;
- создание пластических деформаций в процессе сварки или после полного остывания путем прокатки, проковки, предварительного прогиба;
- компенсация пластических деформаций посредством термической правки, симметричного расположения швов.

Наиболее часто используемым способом предотвращения остаточных напряжений является предварительный нагрев соединения во время сварки. Он замедляет скорость охлаждения. Это гарантирует, что напряжения, развивающиеся в детали, в начале будут иметь меньшую величину.

Предварительный нагрев присадочной проволоки также может быть использован в качестве метода уменьшения напряжений в металлоконструкциях горных машин. С увеличением значения предварительного нагрева

присадочной проволоки сварочный ток уменьшается, что приводит к стабилизации сварочной дуги и снижению теплоотдачи. Снижение теплоотдачи уменьшает максимальное напряжение, вызванное внутри и вокруг сварных швов, что снижает уровень искажений в свариваемой конструкции. Снижение теплоотдачи и стабильная дуга также указывают на то, что предварительный нагрев присадочной проволоки очень эффективен в уменьшении растрескивания сварочного и основного металла. Более высокая скорость охлаждения с увеличением предварительного нагрева присадочной проволоки приводит к образованию в сварочном металле мелких зерен, что свидетельствует об улучшении металлургических и механических свойств сварного шва.

Очень эффективным способом снятия остаточных напряжений является подвержение сварного шва термической обработке после сварки. Термическая обработка может быть выполнена как локально только для зоны сварного шва, так и для всей конструкции в целом. Метод основан на многоэтапном воздействии общего высокого отпуска при сварке углеродистых металлоконструкций, предполагающем нагрев до температуры порядка 650 °C с выдержкой в течение 2–3 мин на каждый 1 мм толщины металла. С целью предотвращения повторного возникновения остаточных напряжений следует контролировать процесс охлаждения. Режим охлаждения зависит от химического состава стали и элементов, способствующих закалке, при высоком их содержании охлаждение должно протекать как можно медленнее.

Еще одним способом снятия остаточных сварочных напряжений является воздействие неплавящимся электродом в среде аргона на участок сварного шва в зоне перехода к основному металлу. Вследствие процесса плавления части металла происходит ослабление внутренних остаточных напряжений, что способствует образованию более плавного перехода основного металла к сварному шву, а также значительному повышению прочностных характеристик сварных соединений при знакопеременных нагрузках.

Вибрационное старение может использоваться как метод устранения остаточного



внутреннего напряжения. Его сущность заключается в том, чтобы через вибрацию уменьшить пластическую деформацию, вызванную внутренними остаточными напряжениями, с целью устранения остаточных напряжений. Принцип способа заключается в размещении моторной системы с эксцентриковым вибратором на конструкции, создании состояния резонанса и проведении вибрационной обработки металлоконструкции с целью снижения внутренних напряжений. Данный метод имеет низкие требования, для него характерна простая работа на участке механообработки, которая принята большинством заводов-изготовителей. Структура и внешний вид деталей при этом не изменяются из-за влияния внешней среды, поэтому стабильность деталей гарантирована.

Метод проковки околошовной зоны позволяет создать дополнительные пластические деформации, что способствует практически полному снятию остаточных сварных напряжений, а также повышению усталостной прочности конструкции. С целью предотвращения образования надрывов процесс проковки не следует осуществлять в интервале температур 200–400 °С. В целях предотвращения возникновения трещин при многослойной сварке проковывают каждый слой за исключением первого, для этого используют ручные слесарные инструменты или применяют механизированные способы воздействия с небольшим усилием.

Эффективным способом снятия сварочных напряжений является создание внешних статических воздействий на элементы металлоконструкций карьерных экскаваторов, значения которых близки к пределу текучести металла. Такой способ снятия остаточных напряжений рекомендуется применять для конструкций, работающих в тяжелых условиях эксплуатации при низких отрицательных температурах и больших значениях динамических нагрузок.

Рассматривая металлоконструкции горных машин и оборудования, также следует понимать, что все виды напряжений не существуют отдельно друг от друга. Они суммируются, достигая на некоторых участках крити-

ческой величины, которая и приводит к их разрушению [21–24].

Заключение

Остаточные напряжения в металлоконструкциях карьерного оборудования, вызванные сваркой, представляют собой самоуравновешивающиеся напряжения в структуре, возникающие в результате сопротивления усадке, вызванной неоднородным распределением температуры в процессе сварки. Для сварных конструкций растягивающие остаточные напряжения потенциально приводят к пагубным последствиям для целостности и долговечности конструкции, поскольку могут вызывать возникновение трещины и снизить ударную вязкость материала. Определение остаточных напряжений на ранних стадиях позволяет принимать упреждающие меры по снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание сварных металлоконструкций.

Оценка сварного шва на основе механики разрушения требует детального знания распределения остаточных напряжений на поверхности и в направлении толщины металлоконструкций. Несмотря на наличие различных техник и аналитических методов для количественной оценки остаточных напряжений сварки, определение точного профиля остаточных напряжений остается довольно сложной задачей.

Для определения точного распределения сварочных остаточных напряжений в сварных швах существует множество хорошо зарекомендовавших себя методов измерения, многие из которых являются разрушающими способами. Такие методы разрушают образец материала для снятия напряжений механическими или химическими средствами и измеряют деформацию образца для расчета остаточного напряжения на основе упругости материала, при этом дальнейшее использование конструкции не представляется возможным. Метод конечных элементов является эффективным средством для того, чтобы понять эволюцию остаточных напряжений в процессе сварки. В связи с этим неразрушающие методы оценки остаточных напряжений оказываются более предпочтительным вариантом.



Список источников

1. Guo J., Fu H., Pan B., Kang R. Recent progress of residual stress measurement methods: a review // Chinese Journal of Aeronautics. 2021. Vol. 34. Iss. 2. P. 54–78. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010>.
2. Zerbst U., Ainsworth R.A., Beier H.Th., Pisarski H., Zhang Z.L., Nikbin K., et al. Review on fracture and crack propagation in weldments – a fracture mechanics perspective // Engineering Fracture Mechanics. 2014. Vol. 132. P. 200–276. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.05.012>.
3. Joseph A., Rai S.K., Jayakumar T., Murugan N. Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2005. Vol. 82. Iss. 9. P. 700–705. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.03.006>.
4. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U., Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 198. P. 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
5. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D.A. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures // Welding Journal. 1999. Vol. 78. Iss. 11. P. 361.
6. Xu S., Thermal Stress Analysis of dissimilar welding joints by Finite Element Method // Procedia Engineering. 2011. Vol. 15. P. 3860–3864. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2011.08.722>.
7. Larsen M.L., Arora V., Clausen H.B. Finite element shape optimization of weld orientation in simple plate structure considering different fatigue estimation methods // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 31. P. 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.011>.
8. Зива В.В., Косухина А.А., Осадчий С.О. Анализ факторов, влияющих на результаты теплового анализа методом конечных элементов // Студенческий форум. 2020. № 26. С. 28–32 [Электронный ресурс]. URL: <https://nauchforum.ru/archive/studjournal/26%28119%29.pdf> (15.12.2022).
9. Занин А.В., Квасов И.Н. Расчет врезки трубопровода с использованием программного продукта ANSYS и анализ с помощью метода конечных элементов // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 2. С. 103–113. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-7-2-103-113>.
10. Борискина З.М., Барышникова О.О. Анализ деформированного состояния металлоконструкций подъемно-транспортных машин с использованием метода конечных элементов // Проблемы механики современных машин: материалы V Междунар. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2012. Т. 2. Ч. 1. С. 53–56.
11. Liu F., Tao C., Dong Z., Jiang K., Zhou S., Zhang Z., et al. Prediction of welding residual stress and deformation in electro-gas welding using artificial neural network // Materials Today Communications. 2021. Vol. 29. P. 102786. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102786>.
12. Mathew J., Moat R.J., Paddea S., Fitzpatrick M.E., Bouchard P.J. Prediction of residual stresses in girth welded pipes using an artificial neural network approach // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2017. Vol. 150. P. 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.01.002>.
13. Na M.-G., Kim J.-W., Lim D.-H. Prediction of residual stress for dissimilar metals welding at nuclear power plants using fuzzy neural network models // Nuclear Engineering and Technology. 2007. Vol. 39. Iss. 4. P. 337–348. <https://doi.org/10.5516/NET.2007.39.4.337>.
14. Макаров А.П. Развитие усталостных трещин в металлоконструкциях экскаваторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 11. С. 105–109.
15. Макаручук А.В., Макаручук Н.В., Старцев В.Н. Разработка математической модели многопроходной дуговой сварки // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. № 1. С. 121–131.
16. Серенко А.Н. Оценка влияния остаточных напряжений на кинетику развития усталостных трещин в сварных соединениях. Часть I // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. 2011. № 22. С. 156–161.
17. Загорин А.С., Любимова Л.Л., Буваков К.В., Кулеш А.С., Ташлыков А.А., Кулеш Р.Н. Влияние остаточных напряжений в зонах сварного узла на сопротивление хрупким разрушениям // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 128–142. <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2112>.
18. Авдеев А.Н., Храмовских В.А. Анализ отказов базовых узлов экскаваторов, работающих в районах Крайнего Севера // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 1. С. 53–55.
19. Храмовских В.А. Оценка ресурса базовых узлов металлоконструкций карьерных экскаваторов на основе обработки статистической информации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 1. С. 167.
20. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 198. P. 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
21. Макаров А.П., Шевченко А.Н., Павлов А.М. Определение критической длины трещины в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12. С. 57–63.
22. Серебренников А.В., Демченко И.И., Серебренников В.Л. Оценка методов и приборов для измерения механических напряжений в конструкционных материалах горных машин // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 11. С. 56–62.
23. Panfilova O.R., Dyorina N.V., Velikanov V.S. Substantiation of parameters of metal structure elements of mining transport machines // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. № 2. С. 110–



116. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-110-116>.
24. Серебренников А.В., Демченко И.И., Серебренников В.Л., Левченко Е.А. Способ измерения локальных

напряжений в металлоконструкциях горных машин // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 6. С. 42–46.

References

1. Guo J., Fu H., Pan B., Kang R. Recent progress of residual stress measurement methods: a review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021;34(2):54-78. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010>.
2. Zerbst U., Ainsworth R.A., Beier H.Th., Pisarski H., Zhang Z.L., Nikbin K., et al. Review on fracture and crack propagation in weldments – a fracture mechanics perspective. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;132:200-276. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.05.012>.
3. Joseph A., Rai S.K., Jayakumar T., Murugan N. Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2005; 82(9):700-705. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.03.006>.
4. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U., Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;198:123-141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
5. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D.A. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures. *Welding Journal*. 1999;78(11):361.
6. Xu S., Thermal Stress Analysis of dissimilar welding joints by Finite Element Method. *Procedia Engineering*. 2011;15:3860-3864. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.722>.
7. Larsen M.L., Arora V., Clausen H.B. Finite element shape optimization of weld orientation in simple plate structure considering different fatigue estimation methods. *Procedia Structural Integrity*. 2021;31:70-74. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.011>.
8. Ziva V.V., Kosukhina A.A., Osadchii S.O. Analysis of factors affecting the results of thermal analysis performed by the finite element method. *Studencheskii forum*. 2020;26:28-32. Available from: <https://nauchforum.ru/archive/studjournal/26%28119%29.pdf> [Accessed 15th December 2022]. (In Russ.).
9. Zanin A.V., Kvasov I.N. Analysis of tie-in calculations for the pipeline using ANSYS software and analysis with finite element method. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2019;7(2):103-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-7-2-103-113>.
10. Boriskina Z.M., Baryshnikova O.O. Analysis of the deformed state of hoisting and transport machine metal structures using the finite element method. In: *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: materialy V Mezhdunar. konf. = Problems of modern machinery mechanics: materials of the 5th International conference*. 25–30 July 2012, Ulan-Ude. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management; 2012, vol. 2, pt. 1, p. 53–56. (In Russ.).
11. Liu F., Tao C., Dong Z., Jiang K., Zhou S., Zhang Z., et al. Prediction of welding residual stress and deformation in electro-gas welding using artificial neural net-

- work. *Materials Today Communications*. 2021;29:102786. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102786>.
12. Mathew J., Moat R.J., Paddea S., Fitzpatrick M.E., Bouchard P.J. Prediction of residual stresses in girth welded pipes using an artificial neural network approach. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2017;150:89-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.01.002>.
13. Na M.-G., Kim J.-W., Lim D.-H. Prediction of residual stress for dissimilar metals welding at nuclear power plants using fuzzy neural network models. *Nuclear Engineering and Technology*. 2007;39(4):337-348. <https://doi.org/10.5516/NET.2007.39.4.337>.
14. Makarov A.P. Development of fatigue cracks in excavator metal structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;11:105-109. (In Russ.).
15. Makarchuk A.V., Makarchuk N.V., Startsev V.N. Mathematical model elaboration of multi-pass arc welding. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;1:121-131. (In Russ.).
16. Serenko O.M. Estimation of effects of residual stresses on kinetics of fatigue cracks development in welded joints. Part 1. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2011;22:156-161. (In Russ.).
17. Zavorin A.S., Lyubimova L.L., Buvakov K.V., Kulesh A.S., Tashlykov A.A., Kulesh R.N. Influence of residual stresses on resistance to brittle fracture in weldment zones. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(10):128-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2112>.
18. Avdeev A.N., Khramovskikh V.A. Analysis of failures of excavator basic units operating in the Far North. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2005;1:53-55. (In Russ.).
19. Khramovskikh V.A. Estimating service life of mining excavator basic unit metal structures based on statistical information processing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2005;1:167. (In Russ.).
20. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;198:123-141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
21. Makarov A.P., Shevchenko A.N., Pavlov A.M. Crack critical length determination in mining shovel metal structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;12:57-63. (In Russ.).
22. Serebrennikov A.V., Demchenko I.I., Serebrennikov



V.L. Assessment of the methods and devices for measuring mechanical stresses in the construction materials of the mining machines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Monthly Journal of Research and Production*. 2013;11:56-62. (In Russ.).

23. Panfilova O.R., Dyorina N.V., Velikanov V.S. Substantiation of parameters of metal structure elements of mining transport machines. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2020;2:110-116. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-110-116>.

24. Serebrennikov A.V., Demchenko I.I., Serebrennikov V.L., Levchenko E.A. Way of measurement of local tensions in the steel structures of mining machines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Monthly Journal of Research and Production*. 2016;6:42-46. (In Russ.).

24. Serebrennikov A.V., Demchenko I.I., Serebrennikov V.L., Levchenko E.A. Way of measurement of local tensions in the steel structures of mining machines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Monthly Journal of Research and Production*. 2016;6:42-46. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Макаров Анатолий Павлович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
mak@istu.edu

Anatoly P. Makarov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
mak@istu.edu

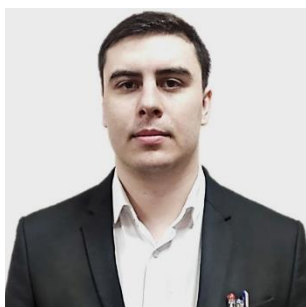


Храмовских Виталий Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ wax@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-0590-0393>

Vitaly A. Khramovskikh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ wax@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-0590-0393>



Непомнящих Кирилл Андреевич,

аспирант,
ассистент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
nka@istu.edu

Kirill A. Nepomnyashchikh,

Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
nka@istu.edu



Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 27.01.2023; принята к публикации 13.02.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 27.01.2023; accepted for publication 13.02.2023.