

УДК 621.791.052: 620.178.5.05

Макеев С.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины),
Макеева А.С., аспирант
(НМетАУ)

К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Макеев С.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. співр.
(ИГТМ НАН України)
Макеева Г.С., аспирант
(НМетАУ)

К УПРАВЛІННЮ ПРОЦЕСОМ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ГОРНОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Makeiev S.Ju., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)
Makeieva G.S., Doctoral Student
(NMetAU)

ON THE ISSUE OF IMPROVING RELIABILITY OF THE WELDED JOINTS IN MINING EQUIPMENT

Аннотация. Целью статьи является обоснование способа повышения надежности горных машин путем снятия напряжений в сварных швах, являющихся наиболее слабым звеном в сварных конструкциях горнотехнического оборудования. Многими исследователями установлено, что на качество сварного шва главным образом влияет его напряженное состояние. Задачей разработки является исследование влияния вибрационной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений в сварных соединениях горнотехнического оборудования, изготавливаемых из конструкционных сталей. Для решения поставленной задачи выполнены экспериментальные работы, в которых исследовались сварные соединения, полученные сваркой ТВЧ (токи высокой частоты); электродуговой сваркой без вибрации и с вибрацией в процессе сварочных работ. Методом магнитной памяти металла выполнены замеры концентрации напряжений в сварных соединениях и получены зависимости изменения напряжений по всей длине исследуемого образца для трех видов сварки: токами высокой частоты (ТВЧ), электродуговой и электродуговой с вибрацией. Из полученных зависимостей установлено, что напряжения в сварном шве минимальны при сварке с вибрацией. В двух других случаях напряжения в среднем выше в 2 раза (сварка ТВЧ) и 4 раза (электродуговая). Проведены исследования структуры поверхности шлифов для швов вышеперечисленных сварных соединений и получены 3D модели их поверхностей. Результаты исследований по снижению остаточных напряжений в сварных соединениях с применением вибрационной обработки позволяют рекомендовать ее для повышения качества и надежности горных машин. При применении вибрационной обработки в 2-4 раза снижаются остаточные напряжения в области сварного шва, в его структуре уменьшается число различных неоднородностей, которые являются очагами разрушения сварного соединения и приводят к преждевременному выходу из строя горного оборудования.

Ключевые слова: остаточные напряжения, вибрационная обработка, сварное соединение.

Введение. В горном деле важную роль играет надежность, износостойкость и ресурс работы горнотехнического оборудования, которое применяется как на карьерах, так и в подземных условиях. Для управления процессом повышения надежности сварных соединений горно - технического оборудования исследуем технологические особенности процесса. Оборудование горнопромышленного комплекса чаще всего эксплуатируется в условиях высоких температур, влажности, больших знакопеременных нагрузок. Наиболее слабым и уязвимым звеном горных машин являются места сварных соединений. Основной проблемой при сварке, является поведение околошовной зоны с точки зрения эксплуатационной надежности сварных соединений. Свойства этой наиболее уязвимой с позиций разрушения зоны связаны с воздействием различных тепловложений при сварке, которые определяют скорость охлаждения сварных соединений и соответственно влияют на процесс структурообразования и образования остаточных напряжений в металле. Для повышения надежности сварного соединения следует особо уделять внимание снижению остаточных напряжений в околошовной зоне и в самом сварном шве. Таким образом, вопрос снижения остаточных напряжений при сварке является весьма актуальным для повышения срока службы горных машин.

Постановка задачи. Целью данных исследований является повышение качества сварного шва с одновременным снижением напряженного состояния в горнотехническом оборудовании.

Задачей разработки является исследование влияния вибрационной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений в сварных соединениях горнотехнического оборудования, изготавливаемого из конструкционных сталей.

Большое количество разрушений на промышленных объектах в горно-металлургическом комплексе происходит из-за коррозии основного металла и сварного шва [1]. Основная причина коррозии наличие локальных остаточных сварочных напряжений. При этом если эти остаточные напряжения накладываются на рабочие напряжения, то идет непрерывный рост коррозионного процесса. Антонов А.А., Стеклов О.И., Сидорин Ю.В. изучали влияние технологических остаточных напряжений в сварных соединениях на их ресурс работы [2]. Штефан В.В., Тентлер А.В., Подольский В.Е. изучали, как управлять уровнем концентраторов механических напряжений деформированного состояния в стальных конструкциях [3].

Состояние вопроса. Одним из сильнейших факторов, влияющих на работоспособность сварных соединений, является остаточное поле напряжений в зоне шва [4]. Вследствие резкого температурного перепада, структурных изменений и упругопластического деформирования в зонах сварных соединений возникают значительные остаточные напряжения, величина которых может достигать и даже существенно превышать предел текучести основного металла [5].

Характерным для остаточных напряжений вообще является то, что они существуют и уравниваются внутри изделия без приложения к нему внешних усилий. Интерес к исследованию остаточных напряжений в сварных конструкциях обуславливается тем, что они существенно влияют на прочность и долговечность сварного соединения [6].

По мнению некоторых исследователей [7] основной причиной возникновения деформаций является объем теплотрат. В заготовке, не подверженной термовоздействию не наблюдается никаких градиентов, и как следствие дополнительных напряжений. Причем величина деформаций пропорциональна объему теплотрат. Однако авторы не учитывают возможность концентрации напряжений, определяемых очертаниями шва, концентрации напряжений вследствие смещения соединяемых деталей. Другие исследователи [8] считают, что сварочные напряжения в конструктивных элементах реализуются в результате локализованных тепловых процессов (нагрева и охлаждения) и структурных превращений.

Напряженное состояние поверхностного слоя имеет свою специфику, которая заключается в том, что максимальные напряжения возникают у поверхности. Кроме этого, у поверхности детали возникают местные концентрации напряжений, которые часто является причиной зарождения процессов усталостного разрушения. Специфической особенностью поверхностного слоя является возникновение внутренних остаточных напряжений.

Разнообразие эпюр остаточных напряжений объясняется одновременным действием различных факторов и в первую очередь сочетанием силовых и температурных воздействий [9].

В результате воздействия на деталь пластической деформации в ее наружном слое появляются, как правило, напряжения сжатия, а в остальной части - напряжения растяжения. Температурный фактор, в зависимости от условий нагрева и охлаждения может вызывать, что происходит наиболее часто, прямо противоположную картину (растягивающие напряжения располагаются на поверхности, а в глубине детали находятся сжимающие напряжения).

Так как оба фактора – температурный и силовой – действуют одновременно, то знак остаточных напряжений в наружном слое зависит от того, какой из этих факторов превалирует.

При этом следует отметить, что напряженное состояние зависит от формы и размеров детали, режимов обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала [9].

Метод вибрационной обработки является привлекательным для исследования стабилизации остаточных напряжений и геометрических параметров металлических конструкций. Его применение к различным по назначению металлическим изделиям, заключается в концентрации вибромеханических колебаний в зоне накопленных остаточных напряжений. Согласно результатам экспериментальных исследований, при использовании вибромеханического метода релаксации происходит существенное сокращение затрат времени и энергии, при более стабильных результатах по геометрическим параметрам изделий [10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

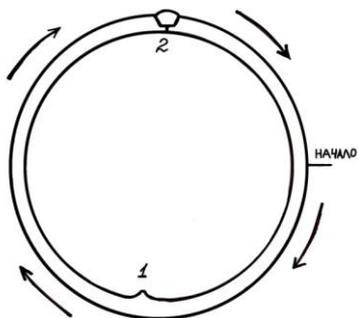
Для проведения исследования использовались образцы, представляющие собой фрагменты труб из низколегированных сталей 20, толщина стенки 4 мм, сваренные в заводских условиях методом ТВЧ (токами высокой частоты).

Эти образцы были разрезаны в зоне, диаметрально противоположной базовому (заводскому) шву. В месте разреза сделана фаска для удобства наложения экспериментального шва ручной дуговой сваркой. Во время сварки использовали специально разработанный стенд, позволяющий выполнять сварку с одновременным наложением на образец вибрационных колебаний различной частоты.

Сварка стыков выполнена ручной дуговой сваркой в 1 слой. Режим сварки: сварочный ток – 110-150 А, напряжение на дуге – 50-53 В. Сварку производили в трёх режимах: без вибрации; при вибрации с частотой 50 Гц; при вибрации с частотой 80 Гц.

Распределение остаточных напряжений исследовалось по длине образующей образцов для сравнения их величин в базовых сварных соединениях, полученных в заводских условиях методом ТВЧ и при ручной дуговой сварке с вибрацией и без неё. Определение напряжений проводилось с помощью прибора неразрушающего контроля – измерителя концентрации напряжений ИКН-1М-4, основанного на использовании метода магнитной памяти металла. Замеры концентрации напряжений и обработка полученных результатов производились совместно с сотрудниками ООО «НПП Машиностроение».

Результаты и их обсуждение. Замеры напряжений в кольцевых образцах проводили по следующей схеме (рис. 1). Ориентировочные места расположения сварных швов: на 0,25 части расстояния измерения кольца расположен шов сваркой ТВЧ, и на 0,75 части расстояния – шов дуговой электросваркой.



1 – шов сваркой ТВЧ, 2 – шов электродуговая сварка

Рисунок 1 – Схема замеров концентрации напряжений

По каждому замеру составлялся протокол контроля. Анализ графиков замеров концентрации напряжений позволяют сделать следующие выводы. В области 280-300 мм, которая соответствует области шва, сваренного электродуговой сваркой без вибрации, наблюдаются экстремальные (max/min) значения поля H_r (А/м) в зоне контроля, которые составляют $-78 H_r$ и $-120 H_r$. Разница напряженности поля $42 H_r$. Это свидетельствует о том, что при дуговой сварке без вибрации, в области сварного

шва в металле возникают значительные остаточные напряжения (рис. 2). Область сварного шва сваркой ТВЧ на графике соответствует зона 90 - 110 мм. Значение поля на этом промежутке изменяется от $-70 H_r$ до $-45 H_r$. Перепад напряжений $25 H_r$.

При электродуговой сварке с вибрацией 50 Гц, в области сварного шва, кото-

рая расположена на промежутке 280-300мм, напряженность поля падает от 10 Нр до 0 Нр. Перепад напряжений 10Нр. Это говорит о том, что повышенных остаточных напряжений нет. В области сварного шва сваркой ТВЧ, которая на графике расположена на отрезке 90-110 мм, напряженность поля возрастает от 5Нр до 28Нр. Перепад напряжений 23Нр. Это говорит о том, что в области сварного шва сваркой ТВЧ присутствуют умеренные остаточные напряжения (рис. 3).

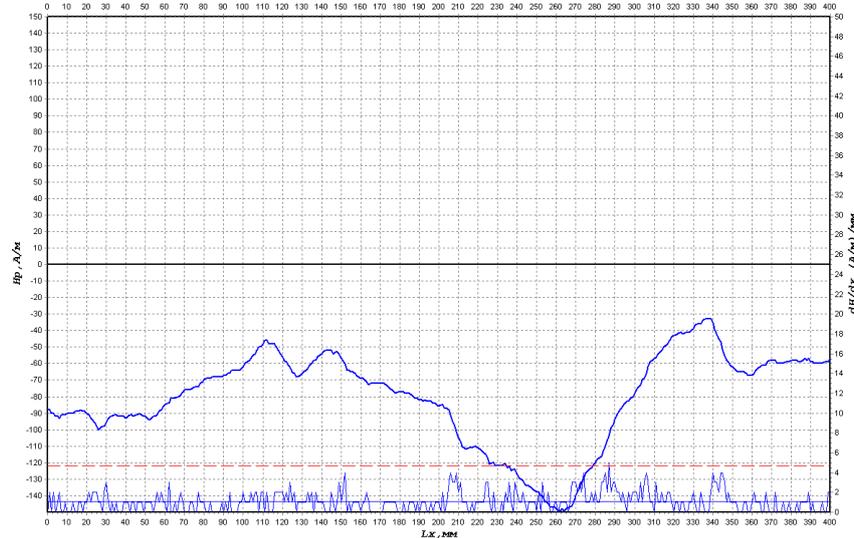


Рисунок 2 – Графики замеров концентрации напряжений при сварке без вибрации

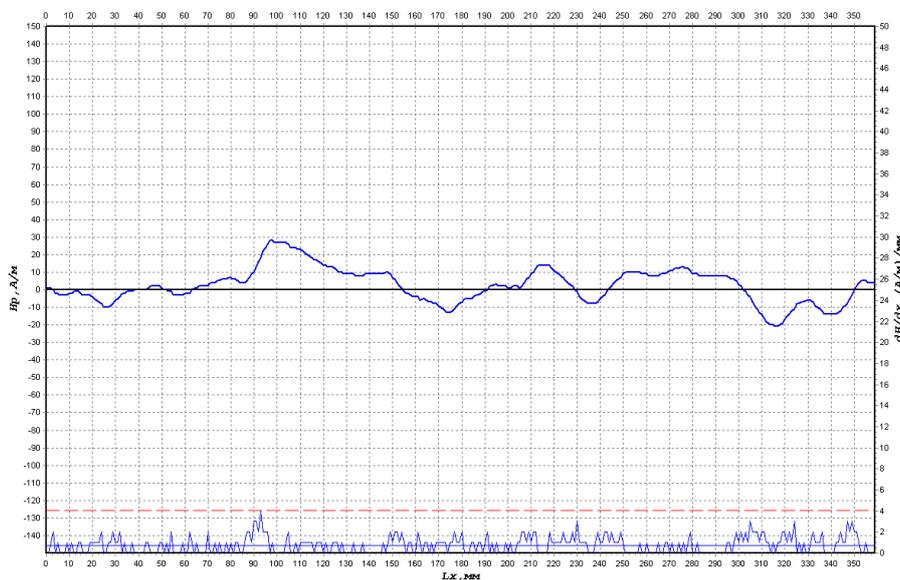


Рисунок 3 – Графики замеров концентрации напряжений при сварке с вибрацией

Таким образом, во всех образцах в области сварки ТВЧ присутствуют остаточные напряжения с градиентом напряженности поля в пределах 23-25Нр. В области сварного шва при электродуговой сварке без вибрации наблюдаются остаточные напряжения с градиентом напряженности поля около 42Нр. При электродуговой сварке с вибрацией в зоне сварного шва наблюдается значительное снижение остаточных напряжений с градиентом напряженности поля

около 10Нр. Следовательно, применение электродуговой сварки с вибрацией приводит к значительному снижению остаточных напряжений в области сварного шва.

В дальнейшем для проведения исследования структуры сварного соединения были изготовлены шлифы. Образец шлифа вырезали из зоны сварного шва. Приготовленные шлифы изучали с помощью интерференционного бесконтактного 3D профилографа «Micron-alpha». Прибор позволяет восстанавливать микрофотографии поверхностей методом обработки последовательности интерференционных картин в белом свете.

Принцип действия заключается в контрастности интерференционной картины при освещении источником белого света. Интерференционная картина максимально контрастна при строгом совпадении разности ходов отраженных световых волн от поверхности образца и подвижного эталонного зеркала.

В большинстве случаев, чем мельче зерно в изломе, тем выше механические свойства металла. По излому можно судить о размере зерна, особенностях литья, сварки, виде обработки, а также выявить отдельные дефекты. Структура сварного шва при различных режимах сварки для кольцевых образцов представлена на рис. 4 (увеличение 400х).

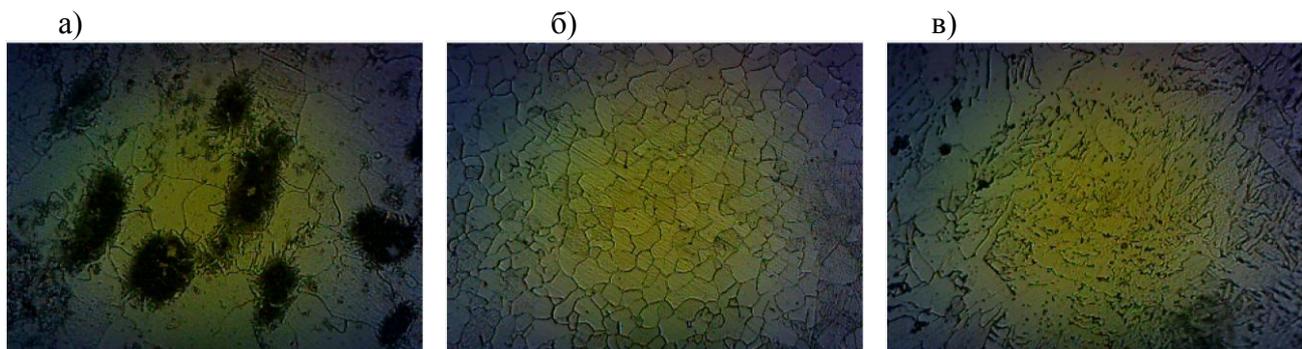


Рисунок 4 – Типичные структуры металла шва сварного соединения при различных режимах сварки: а) сварка ТВЧ; б) дуговая сварка без вибрации; в) дуговая сварка с вибрацией

Как видно из рис. 4а, при сварке ТВЧ в структуре металла присутствуют черные включения. На рис. 4б видно, что при дуговой сварке структура металла приобрела ячеистый вид, без черных включений. Рисунок 4в свидетельствует, что структура металлического шва при дуговой сварке с вибрацией имеет наиболее однородную структуру.

Бесконтактный интерференционный 3D профилограф «Micron-alpha» позволяет также получить 3D модель поверхности (рис. 5) в исследуемой зоне.

Анализируя 3D модели, можно сделать вывод, что наиболее ровная поверхность в образце при дуговой сварке с вибрацией.

Аналогичные исследования проведены на интерференционном бесконтактном 3D профилографе для квадратных образцов. Результаты приведены на рис. 6,7.

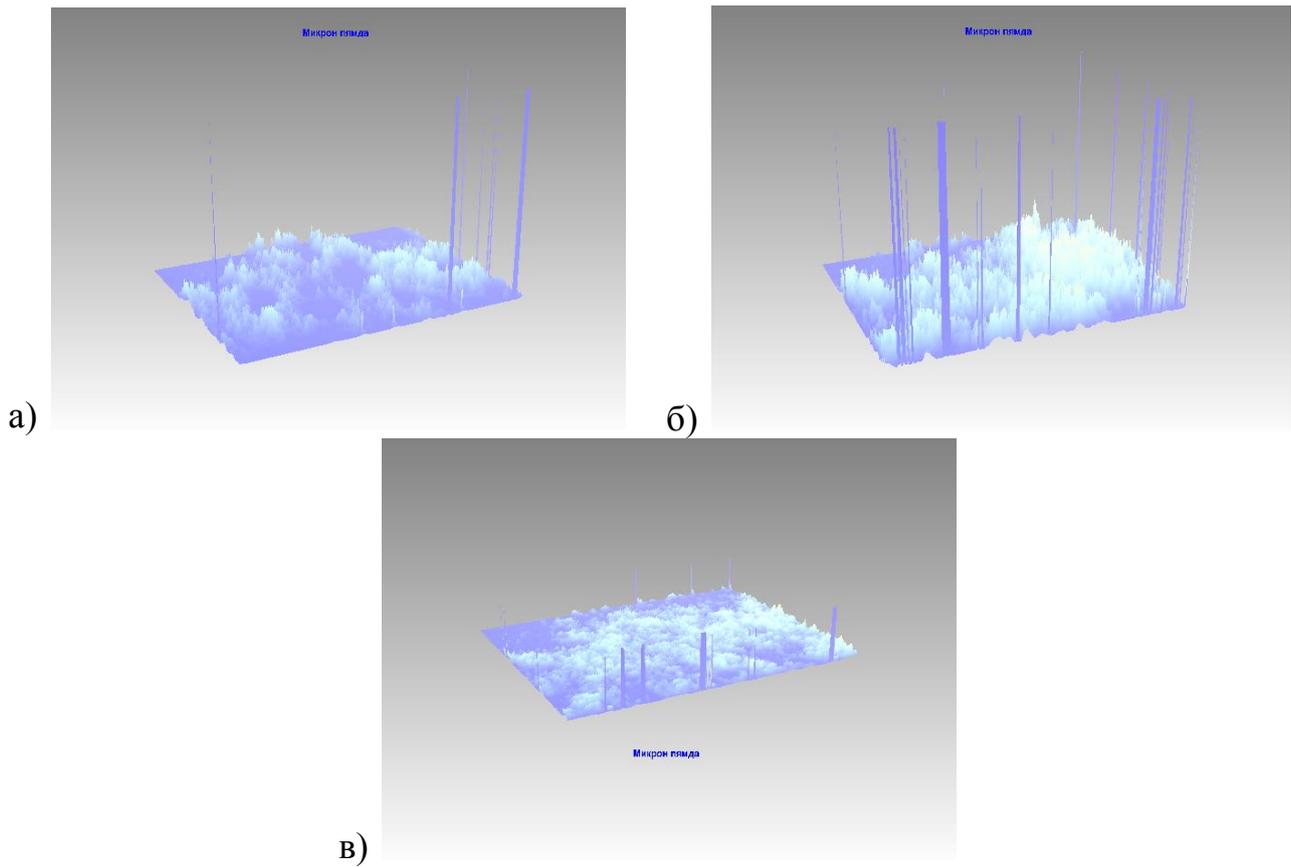


Рисунок 5 – 3D модель структури металла сварного соединения в кольцевом образце: а) сварка ТВЧ; б) дуговая сварка без вибрации; в) дуговая сварка с вибрацией

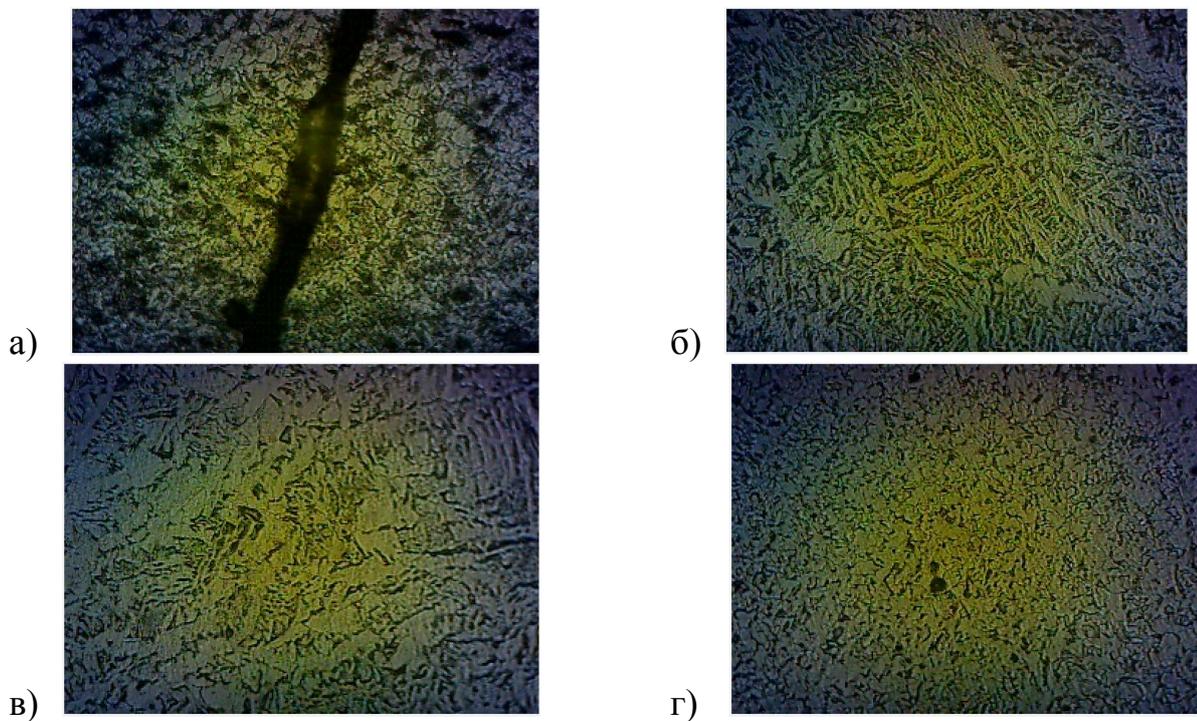


Рисунок 6 – Типичные структуры металла шва сварного соединения в квадратных образцах при различных режимах сварки: а) сварка ТВЧ; б) дуговая сварка без вибрации; в) дуговая сварка с вибрацией 50 Гц; г) дуговая сварка с вибрацией 80 Гц

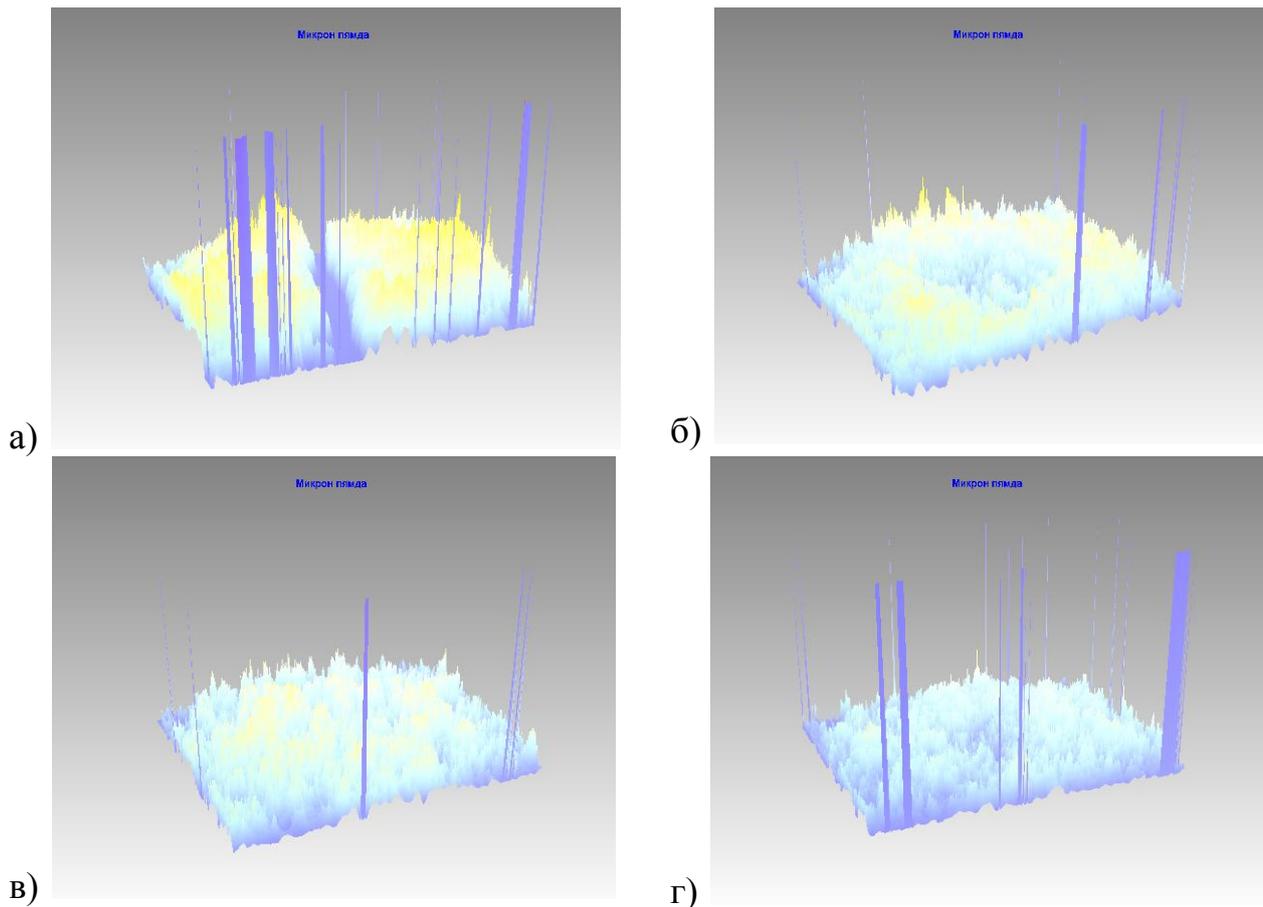


Рисунок 7 – 3D модель структуры металла в сварном соединении квадратного образца: а) сварка ТВЧ; б) дуговая сварка без вибрации; в) дуговая сварка с вибрацией 50 Гц; г) дуговая сварка с вибрацией 80 Гц

Из рисунка 7 видно, что наиболее однородную структуру имеет образец шва, сваренного электродуговой сваркой с вибрацией 80 Гц.

Анализируя 3D модели, можно сделать вывод, что наиболее ровная поверхность получена в образце при дуговой сварке с вибрацией 80 Гц.

Выводы. Анализируя проведенные исследования можно отметить следующее.

В зоне заводской сварки деталей токами высокой частоты присутствуют остаточные напряжения вне зависимости от типа сварки, градиент напряженности поля колеблется в пределах 23-25 Нр. В области сварного шва при электродуговой сварке без вибрации наблюдаются повышенные остаточные напряжения, градиент напряженности поля около 42 Нр. При электродуговой сварке с вибрацией в зоне сварного шва наблюдается снижение остаточных напряжений – градиент напряженности поля составляет до 10 Нр.

Этот вывод подтверждают исследования структуры поверхности шлифов сварных соединений образцов и их 3D модели, которые показывают, что структура металлического шва при дуговой сварке с вибрацией имеет более однородную текстуру в сравнении с базовой или дуговой сварке без вибрации. Повышение частоты вибрации приводит к снижению числа различных неоднородностей в металле и равномерности распределения его структурных характе-

ристик.

Следовательно, применение вибрации при электродуговой сварке ведет к снижению градиентов остаточных напряжений в сварных соединениях, получению более однородной его структуры и может быть рекомендовано для повышения качества и долговечности работы горнотехнического оборудования. На основании данных выводов можно моделировать процесс управления повышения надежности сварных соединений горно-технического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квагинидзе, В.С. Конструктивно-технологические мероприятия по повышению работоспособности сварных соединений металлоконструкций горно-транспортного оборудования / В.С. Квагинидзе, Н.Н. Чупейкина // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2011. – № 12. – С. 185-192.
2. Антонов, А.А. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов / А.А. Антонов, О.И. Стеклов, Ю.В. Сидорин // Заготовительные производства в машиностроении. –2012. – №3.– С.13-18.
3. Штефан, В.В. Управление уровнем концентраторов механических напряжений деформированного состояния в стальных конструкциях / В.В. Штефан, А.В. Тентлер, В.Е. Подольский // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 7. – С. 61-64.
4. Tung, Ryan C. Estimating residual stress, curvature and boundary compliance of doubly clamped MEMS from their vibration response/ Tung, Ryan C.; Garg, Anurag; Kovacs, Andrew; Peroulis, Dimitrios; and Raman, Arvind // Birck and NCN Publications. – 2013. – Vol. 4. – pp. 1-14.
5. Летуновский, А.П. Снятие остаточных сварочных напряжений / А.П. Летуновский, Г.В. Новиков // Сфера Нефтегаз. – 2010. – №1. – С. 156-157.
6. Vibromechanic Way to Remove Residual Stresses / А.А. Korolev, А.V. Korolev, А.А.Fomin [and at]// Trans Tech Publications. – 2015. – Vol. 1064. – pp. 103-107.
7. К разработке концепции снижения остаточных напряжений в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке, обусловленных термоупругими явлениями / Н.Д.Гайденюк, Н.Ю.Серегин, Д.П.Савенков [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 3(49) – С. 169-174.
8. Труфанов, Н.А. Модели формирования полей технологических и остаточных напряжений в условиях релаксационного перехода / Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – № 4(5). – С.2534-2536.
9. Антошина, Т.В. Влияние остаточных напряжений на устойчивость пластин, предварительно напряженных локальным термическим воздействием / Т.В. Антошина // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – 2009.. – №4. – С. 181-186.
10. Калмыков, М.А. Общие принципы описания процесса виброобработки с внешним источником динамического воздействия / М.А. Калмыков, В.Б. Струтинский, В.С. Щелоков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011.– №3(49). – С.45-49.

REFERENCES

1. Kvaginidze, V.S. and Chupeykina, N.N. (2011), “Constructive - technological measures to improve the performance of welded joints of steel structures of mining and transport equipment”, *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mine information - analytical bulletin] , no.12, pp. 185-192.
2. Antonov, A.A., Steklov, O.I. and Sidorin, Yu.V. (2012), “Research of technological residual stresses in welded joints of pipelines”, *Zagotovitelnye proizvodstva v mashynostroenii*, no. 3, pp.13-18.
3. Stefan, V.V., Tentler, A.V. and Podolsky, V.E. (2003), “Level management concentrators of mechanical stress strain state in structural steel”, *Kontrol. Diagnostika*, no.7, pp. 61-64.
4. Tung, Ryan C.; Garg, Anurag; Kovacs, Andrew; Peroulis, Dimitrios; and Raman, Arvind, (2013), "Estimating residual stress, curvature and boundary compliance of doubly clamped MEMS from their vibration response", *Birck and NCN Publications*, vol. 4, pp. 1-14.
5. Letunovskiy, A.P. and Novikov, G.V. (2010), “Removal of residual welding stresses”, *Sfera Neftegas*, no. 1, pp. 156-157.

6. Korolev, A.A., Korolev, A.V., Fomin, A.A., Savran, S.A., Balaev, A.F and Yakovishin, A.S. (2015), "Vibromechanic Way to Remove Residual Stresses", *Trans Tech Publications*, vol. 1064, pp. 103-107.
7. Gaydenyuk, N.D., Seregin, N.Y., Savenkov, D.P. and Maytakova, A.V. (2013), "By developing the concept of reduction of residual stress in welded joints in electron beam welding caused by thermoelastic phenomena", *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerocsmicheskogo universiteta*, no.3(49), pp.169-174.
8. Trufanov, N.A., Smetannikov, O.J. and Trufanov, A.N. (2011), "Models of formation of fields of technology and in terms of residual stresses relaxation transition", *Bulletin Nijnegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, no. 4 (5), pp. 2534-2536.
9. Antoshina, T.V. (2009) "Influence of residual stresses on the stability of the plates, prestressed local thermal effect", *Zbirnik Naukovykh prats Ukrayinskogo naukovо-doslidnogo ta proektnogo instituta stalevykh konstruksiy imeni V.M. Shimanovskogo*, no.4, pp.181-186.
10. Kalmykov, M.A., Strutinskii, V.B. and Schelokov, V.S. (2011), "General principles of describing the process of vibratory processing with an external source of dynamic effects", *Vostochno – evropeysky jurnal peredovuch tehnologiy* [Eastern European Journal of advanced technologies], no.3 (49), pp. 45-49.

Об авторах

Макеев Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С.Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, smakeev@ukr.net.

Макеева Анна Сергеевна, аспирант кафедры управления проектами Национальной металлургической академии Украины (НМетАУ), Днепропетровск, Украина, sunflo@ukr.net.

About the authors

Makeev Sergey Jurievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, smakeev@ukr.net

Makeieva Anna Sergeievna, Doctoral Student, Department of Project Management National metallurgical academy of Ukraine (NMetAU), Dnepropetrovsk, Ukraine, sunflo@ukr.net.

Анотація. Метою статті є обґрунтування способу підвищення надійності гірничих машин шляхом зняття напружень у зварних швах, які є найбільш слабкою ланкою в зварних конструкціях гірничотехнічного обладнання. Багатьма дослідниками встановлено, що на якість зварного шва головним чином впливає його напружений стан. Завданням розробки є дослідження впливу вібраційної обробки на механічні властивості і перерозподіл залишкових напружень у зварних з'єднаннях гірничотехнічного обладнання, що виготовляються з конструкційних сталей. Для вирішення поставленого завдання виконано експериментальні роботи, в яких досліджувалися зварні з'єднання, отримані зварюванням СВЧ (струми високої частоти); електродуговою зварюванням без вібрації і з вібрацією в процесі зварювальних робіт. Методом магнітної пам'яті металу виконані заміри концентрації напружень в зварних з'єднаннях і отримані залежності зміни напружень по всій довжині досліджуваного зразка для трьох видів зварювання: струмами високої частоти (СВЧ), електродуговою і електродуговою з вібрацією. З отриманих залежностей встановлено, що напруги в зварному шві мінімальні при зварюванні з вібрацією. У двох інших випадках напруги в середньому вище в 2 рази (зварювання ТВЧ) і 4 рази (електродугова). Проведено дослідження структури поверхні шліфів для швів вищеперелічених зварних з'єднань і отримані 3D моделі їх поверхонь. Результати досліджень щодо зниження залишкових напружень у зварних з'єднаннях з застосуванням вібраційної обробки дозволяють рекомендувати її для підвищення якості та надійності гірничих машин. При застосуванні вібраційної обробки в 2-4 рази знижуються залишкові напруги в області зварного шва, в його структурі зменшується число різних неоднорідностей, що є осередками руйнування зварного з'єднання і призводять до передчасного виходу з ладу гірничого обладнання.

Ключові слова: залишкові напруги, вібраційна обробка, зварне з'єднання

Abstract. The key issue of the article is a study of ways for improving reliability of the mining equipment by removing the stresses from the welded joints, which are the weakest areas in the welded structures of the mining equipment. Many researchers have found that quality of a welded joint is mainly affected by its stressed state. The objective of the work was to study an impact of vibromechanical treatment on mechanical properties of and redistribution of residual stresses in the welded joints of the mining technical equipment made of structural steel. To solve the assigned task the experiments were performed in order to investigate the welded joints made by: HFC welding (high-frequency currents); and electric-arc welding with and without vibration during the welding operations. Stress concentration in the welded joints were measured by method of metal magnetic memory which showed dependences between the stress changes along the entire length of the test sample and the three types of welding: HFC welding, electric arc welding and electric arc welding with vibration. The obtained dependencies showed that stress in the welded joint was the lowest at welding with vibration. In two other cases, stress was, on average, twice higher at high frequency welding and 4 times higher at electric arc welding. Thin sections of the seam surfaces of the above mentioned types of welding joints were investigated, and 3D models of the joint surfaces were created. Results of the research of reducing the residual stresses in the welded joints have given the grounds to recommend the vibromechanical treatment for improving quality and reliability of the mining machines. Thanks to the vibromechanical treatment, residual stresses in the area of the welded seam reduces by 2-4 times, and number of different irregularities in the seam structure, which are the sites of the weld failure leading to premature failure of the mining equipment, essentially reduces.

Keywords: residual stress, vibromechanical treatment, welded joint.

Статья поступила в редакцию 09.09.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым