Администрация Кемеровской области
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Национальное Агентство Контроля Сварки
Кузбасский центр сварки и контроля
Томский политехнический университет
Ассоциация машиностроителей Кузбасса

ИННОВАЦИИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И МАШИНОСТРОЕНИИ (ТЭК-2022)

III Международная научно–практическая конференция

INNOVATIONS IN FUEL AND ENERGY COMPLEX AND MECHANICAL ENGINEERING (FEC-2022)

III International scientific and practical conference

Сборник трудов

Materials

19-21 апреля / April 2022 г.
Кемерово, Россия / Kemerovo, Russia

УДК 330:621.0(05)
ББК У305.4-551

Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов III Международной научно-практической конференция 19-21 апреля 2022 года / под ред. А. Н. Смирнова. – Кемерово : КузГТУ, 2022. – 235 с.

ISBN 978-5-00137-295-0

В сборнике представлены труды Международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении», отражающие актуальные проблемы ТЭК и машиностроения, вопросы импортозамещения, эксплуатации, ремонта и восстановления деталей и узлов потенциально опасного оборудования, развитию сварочного производства, технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ).

Ответственный редактор
Смирнов А.Н.
Редакционная коллегия
Останин О.А.
Князьков В.Л.
Никитенко С.М.

За содержание предоставленной информации ответственность несут авторы.
Незначительные исправления и дополнительное форматирование было вызвано приведением материалов к требованиям печати

©Кузбасский государственный технический университет имени. Т.Ф. Горбачева, 2022
ISBN 978-5-00137-295-0
©Авторы, 2022

Содержание

Приветственные слова	**10**	**Words of Welcome**
СЕКЦИЯ 1 УГОЛЬНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ	**19**	***SECTION 1 COAL AND POWER ENGINEERING, IMPORT SUBSTITUTION***
Клишин Владимир Иванович Механизированная крепь с управляемым выпуском межслоевой толщи угля	20	*Klishin Vladimir Ivanovich* Mechanized support with controlled release of interlayer coal
Стародубов Алексей Николаевич Пылов Петр Андреевич Модернизация архитектуры скрытой марковской модели как новая основа эффективного решения задачи интеллектуального учета энергопотребления	28	*Starodubov Alexey Nikolaevich Pylov Petr Andreevich* Modernization of Hidden Markov Model Architecture as a New Basis for Efficient Solution of the Problem of Intelligent Energy Metering
Петренко Константин Петрович, Малышкин Дмитрий Александрович Закономерности формирования параметров шероховатости при ППД	37	*Petrenko Konstantin Petrovich, Malyshkin Dmitry Alexandrovich* Patterns of formation of roughness parameters during SPD
СЕКЦИЯ 2 ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭК, ИННОВАЦИИ В СВАРКЕ/НАПЛАВКЕ И УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ	***43***	***SECTION 2 THE RESTORATION OF THE EQUIPMENT OF TEK, INNOVATIONS IN WELDING/CLADDING AND HARDENING TECHNOLOGIES, FUNCTIONAL COATINGS***
Ковтунов Александр Иванович, Хохлов Юрий Юрьевич, Никитин Дмитрий Николаевич Влияние ниобия на жаростойкость алитированных покрытий на титане	44	*Kovtunov Alexander Ivanovich, Khokhlov Yury Yuryevich, Nikitin Dmitry Nikolaevich* Influence of niobium on the heat resistance of aluminized coatings on titanium
Комаров Андрей Андреевич, Киселев Павел Владимирович, Козырев Николай Анатольевич, Михно Алексей Романович, Усольцев Александр Александрович	50	*Komarov Andrey Andreevich, Kiselev Pavel Vladimirovich, Kozyrev Nikolay Anatolievich, Mikhno Alexey Romanovich, Usoltsev Alexander Alexandrovich*

Повышение надежности деталей, работающих в условиях интенсивного износа, путем дуговой наплавки порошковой проволокой, дополнительно содержащей порошок титана		Improving the reliability of parts operating under conditions of intense wear by arc surfacing with flux-cored wire additionally containing titanium powder
Михно Алексей Романович, Козырев Николай Анатольевич, Усольцев Александр Александрович, Жуков Андрей Владимирович Исследования сварочного флюса, изготовленного из техногенного сырья металлургического производства, при проведении ремонтно-восстановительных работ металлургического оборудования	56	*Mikhno Alexey Romanovich, Kozyrev Nikolay Anatolievich, Usoltsev Alexander Alexandrovich, Zhukov Andrey Vladimirovich* Studies of the welding flux made from technogenic raw materials of metallurgical production during the repair and restoration work of metallurgical equipment
Орлов Александр Семенович, Рубцова Елена Григорьевна, Сизинцев Сергей Валерьевич, Власова Екатерина Андреевна Применение наноструктур (УНТ) для модифицирования сварочной ванны	61	*Orlov Alexander Semenovich, Rubtsova Elena Grigorievna, Sizintsev Sergey Valerievich, Vlasova Ekaterina Andreevna* The use of nanostructures (CNTs) for modifying the weld pool
Мандров Борис Иванович, Лебедев Максим Николаевич, Ощепков Алексей Александрович, Маценко Илья Александрович, Хомутов Георгий Станиславович Определение технических характеристик порошковой проволоки марки Е71Т-1 Ø 1,2 мм	66	*Mandrov Boris Ivanovich, Lebedev Maxim Nikolaevich, Oshchepkov Alexey Alexandrovich, Matsenko Ilya Alexandrovich, Khomutov Georgy Stanislavovich* Determination of the technical characteristics of the flux-cored wire grade E71T-1 Ø 1,2 mm
Коротин Владимир Олегович Поверхностное пластическое деформирование образцов с напыленным покрытием	72	*Korotin Vladimir Olegovich* Surface Plastic Deformation of Specimens with a Sputtered Coating
Блюменштейн Валерий Юрьевич, Учайкин Сергей Евгеньевич Анализ процессов ППД переходных поверхностей сложнопрофильными деформирующими инструментами	78	*Blumenstein Valery Yurievich, Uchaikin Sergey Evgenievich* Analysis of SPD processes of transitional surfaces with complex-profile deforming tools

Атрощенко Валерий Владимирович, Кагарманов Эдуард Ильшатович, Логачев Юрий Владимирович, Сафиуллин Равиль Шамилевич, Шугаипов Шамиль Данилевич Влияние параметров режима на формирование сварного соединения при сварке трением с перемешиванием	83	*Atroshchenko Valery Vladimirovich, Kagarmanov Eduard Ilshatovich, Logachev Yury Vladimirovich, Safiullin Ravil Shamilevich, Shugaipov Shamil Danilevich* Influence of mode parameters on the formation of a welded joint in friction stir welding
Атрощенко Валерий Владимирович, Логачев Юрий Владимирович, Садрисламов Артем Радифович, Селиванов Алексей Сергеевич, Лобачев Владислав Сергеевич Особенности формирования соединений меди при сварке трением с перемешиванием	89	*Atroshchenko Valery Vladimirovich, Logachev Yury Vladimirovich, Sadrislamov Artem Radifovich, Selivanov Alexey Sergeevich, Lobachev Vladislav Sergeevich* Peculiarities of Formation of Copper Joints in Friction Stir Welding
Атрощенко Валерий Владимирович, Логачев Юрий Владимирович, Садрисламов Артем Радифович, Селиванов Алексей Сергеевич, Лобачев Владислав Сергеевич Особенности формирования соединений стали при сварке трением с перемешиванием	95	*Atroshchenko Valery Vladimirovich, Logachev Yury Vladimirovich, Sadrislamov Artem Radifovich, Selivanov Alexey Sergeevich, Lobachev Vladislav Sergeevich* Features of the formation of steel joints in friction stir welding
Собачкин Алексей Викторович, Попова Анастасия Александровна Газодетонационное напыление порошковых СВС-материалов на основе алюминидов титана	100	*Sobachkin Alexey Viktorovich, Popova Anastasia Alexandrovna* Gas Detonation Spraying of SHS Powder Materials Based on Titanium Aluminides
Князьков Константин Викторович, Князьков Виктор Леонидович Исследование влияния модификации наноразмерными частицами Al_2O_3 на формирование наплавленного слоя бронзы БРаЖ9-4 плазменно-порошковой наплавкой	105	*Knyazkov Konstantin Viktorovich, Knyazkov Viktor Leonidovich* Investigation of the influence of modification with Al_2O_3 nanoparticles on the formation of the deposited layer of bronze BRaZh9-4 by plasma-powder surfacing
Малушин Николай Николаевич, Громов Виктор Евгеньевич, Романов Денис Анатольевич, Бащенко Людмила Петровна, Ковалев Андрей Петрович	111	*Malushin Nikolai Nikolaevich, Gromov Viktor Evgenievich, Romanov Denis Anatolyevich, Bashchenko Lyudmila Petrovna, Kovalev Andrey Petrovich* Application of a complex of hardening technologies to increase the efficiency of

Применение комплекса упрочняющих технологий для повышения эффективности плазменной наплавки теплостойкими сплавами — plasma surfacing with heat-resistant alloys

Атрощенко Валерий Владимирович, Сафиуллин Равиль Шамилевич, Кагарманов Эдуард Илшатович, Никитин Владислав Валерьевич, Бачаев Денис Александрович — 117 — *Atroshchenko Valery Vladimirovich, Safiullin Ravil Shamilevich, Kagarmanov Eduard Ilshatovich, Nikitin Vladislav Valerievich, Bachaev Denis Aleksandrovich*
Исследование свариваемости плакированных сталей — Investigation of the weldability of clad steels

Киселев Вадим Сергеевич, Радченко Михаил Васильевич, Шевцов Юрий Олегович — 123 — *Kiselev Vadim Sergeevich, Radchenko Mikhail Vasilievich, Shevtsov Yuri Olegovich*
Система контроля и измерения температуры нагрева сверхзвуковых газовых струй — Development of a system for measuring the velocity of powder alloy particles during SGP surfacing by an integral correlation method

Киселев Вадим Сергеевич, Радченко Михаил Васильевич — 129 — *Kiselev Vadim Sergeevich, Radchenko Mikhail Vasilievich*
Разработка системы измерения скорости частиц порошкового сплава при СГП-наплавке интегральным корреляционным методом — Development of a system for measuring the speed of particles of a powder alloy during SGP surfacing by the integral correlation method

СЕКЦИЯ 3 НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭК — 135 — ***SECTION 3 NDT, TECHNICAL DIAGNOSTICS AND EXAMINATION OF INDUSTRIAL SAFETY OF EQUIPMENT OF FEC***

Сясько Владимир Александрович, Галкин Денис Игоревич — 136 — *Syasko Vladimir Aleksandrovich, Galkin Denis Igorevich*
Перспективы развития приборостроения в неразрушающем контроле — Prospects for the development of instrumentation in non-destructive testing

Алёшин Николай Павлович, Крысько Николай Владимирович, Щипаков Никита Андреевич, Кусый Андрей Геннадьевич — 141 — *Aleshin Nikolai Pavlovich, Krysko Nikolay Vladimirovich, Shchipakov Nikita Andreyevich, Kusyi Andrey Gennadievich*

Подходы на основе цифровых технологий при комплексной диагностике различными физическими методами неразрушающего контроля

Approaches based on digital technologies for complex diagnostics by various physical methods of non-destructive testing

Шубочкин Андрей Евгеньевич 146
Универсальные шаблоны ВИК

Shubochkin Andrey Evgenievich
Universal VIC Templates

Ефимов Алексей Геннадьевич 152
Возможность применения метода магнитной структуроскопии для контроля напряженно-деформированного состояния конструкционных сталей и сплавов

Efimov Alexey Gennadievich
The possibility of using the method of magnetic structuroscopy to control the stress-strain state of structural steels and alloys

Батенков Кирилл Александрович 157
Расчет амплитудно-частотной характеристики аналоговых окончаний телекоммуникационных сетей

Batenkov Kirill Alexandrovich
Calculation of the amplitude-frequency characteristic of analog terminations of telecommunication networks

Каташинский Сергей Иванович, Лось Андрей Владимирович, Лютарь Виталий Станиславович, Гаркаев Евгений Александрович 162
Оценка остаточного ресурса вертикальных резервуаров

Katashinsky Sergey Ivanovich, Los Andrey Vladimirovich, Lyutar Vitaly Stanislavovich, Garkaev Evgeny Alexandrovich
Estimation of the residual life of vertical tanks

Каташинский Сергей Иванович, Лось Андрей Владимирович, Лютарь Виталий Станиславович, Гаркаев Евгений Александрович 167
Техника и технология неразрушающей диагностики состояния металла элементов сварных конструкций

Katashinsky Sergey Ivanovich, Los Andrey Vladimirovich, Lyutar Vitaly Stanislavovich, Garkaev Evgeny Alexandrovich
Technique and technology for non-destructive diagnostics of the state of the metal of elements of welded structures

Артемьев Руслан Евгеньевич, Атрощенко Валерий Владимирович, Савичев Максим Павлович 172
Разработка методики неразрушающего контроля сварных соединений газопроводов с выполнением совместного анализа данных визуально-измерительного, радиографического и ультразвукового методов

Artemiev Ruslan Evgenievich, Atroshchenko Valery Vladimirovich, Savichev Maxim Pavlovich
Development of a method for non-destructive testing of welded joints of gas pipelines with the implementation of a joint analysis of data from visual-measuring, radiographic and ultrasonic methods

Бобров Алексей Леонидович, Кутень Мария Михайловна
Анализ эффективности систем мониторинга трубопроводов в условиях эксплуатации
178
Bobrov Alexey Leonidovich, Kuten Maria Mikhailovna
Analysis of the effectiveness of pipeline monitoring systems in operation

Абабков Николай Викторович, Смирнов Александр Николаевич, Фольмер Сергей Владимирович, Пимонов Максим Владимирович
Инновационные подходы к оценке работоспособности металла длительно работающего энергетического оборудования
183
Ababkov Nikolay Viktorovich, Smirnov Alexander Nikolaevich, Volmer Sergey Vladimirovich, Pimonov Maxim Vladimirovich
New approaches to assessing the performance of the metal of long-term power equipment

Тюрин Сергей Иванович, Гильманшина Татьяна Ренатовна, Ковалева Ангелина Адольфовна, Крицкий Дмитрий Юрьевич, Кашубский Иван Николаевич, Баланев Руслан Олегович
Исследование структуры аустенитных сталей, применяемых в горном машиностроении
193
Tyurin Sergey Ivanovich, Gilmanshina Tatyana Renatovna, Kovaleva Angelina Adolfovna, Kritsky Dmitry Yurievich, Kashubsky Ivan Nikolaevich, Balanev Ruslan Olegovich
Study of the structure of austenitic steels used in mining engineering

Герике Борис Людвигович, Швыдкин Сергей Анатольевич
Оценка технического состояния несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов
199
Gerike Boris Lyudvigovich, Shvydkin Sergey Anatolyevich
Assessment of the technical condition of the supporting metal structures of mining dump trucks

Герике Павел Борисович, Герике Борис Людвигович
Разработка системы единых диагностических критериев для оценки технического состояния горных машин и оборудования по параметрам механических колебаний
206
Gerike Pavel Borisovich, Gerike Boris Ludwigovich
Development of a system of unified diagnostic criteria for assessing the technical condition of mining machines and equipment according to the parameters of mechanical vibrations

Ожиганов Евгений Анатольевич
Оценка остаточного ресурса трубопроводов из конструкционных сталей при проведении стресс-испытаний
214
Ozhiganov Evgeny Anatolievich
Estimation of the residual life of pipelines made of structural steels during stress testing

Абабков Николай Викторович, Пимонов Максим Владимирович, Левашова Елена Евгеньевна Исследование микроструктуры и механических характеристик поверхностного слоя образцов после наплавки и механической обработки	218	*Ababkov Nikolai Viktorovich, Pimonov Maxim Vladimirovich, Levashova Elena Evgenievna* Study of the microstructure and mechanical characteristics of the surface layer of specimens after surfacing and machining
СЕКЦИЯ 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЭК	225	***SECTION 4 IMPROVEMENT OF EDUCATION IN THE FIELD OF TRAINING FOR ENERGY COMPANIES***
Стерлигов Владислав Викторович, Михайличенко Татьяна Алексеевна Образование должно быть прогностическим	226	*Sterligov Vladislav Viktorovich, Mikhailichenko Tatyana Alekseevna* Education must be predictive
Белкин Денис Сергеевич, Першина Анна Александровна, Скрипко Степан Игоревич Трансформация подходов в образовании	232	*Belkin Denis Sergeevich, Pershina Anna Aleksandrovna, Skripko Stepan Igorevich* Transformation of approaches in education

Уважаемые коллеги!

От имени многотысячного коллектива организаций, входящих в Саморегулируемую организацию Ассоциация «Национальное Агентство Контроля Сварки» (НАКС) приветствую участников III Международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022)», посвященной 30-летию НАКС.

Поддержка, которую оказывает руководство НАКС мероприятиям такого уровня, вполне обоснована – невозможно представить ни одного предприятия топливно-энергетического комплекса, машиностроительной и целого ряда других отраслей промышленности без сварки. Сварка и родственные технологии являются базой для создания валового национального продукта промышленно развитых стран – по оценке экспертов, их доля в ВНП превышает сегодня 50 %.

Ассоциация «НАКС» – союз профессионалов в области сварки с мировым уровнем известности и признания. Основной целью и областью деятельности НАКС с момента его основания явилось создание в Российской Федерации системы аттестации сварочного производства (САСв), включающее объединение, координацию и организацию работ по аттестации, подготовке и переподготовке специалистов в области сварочного

производства. По решению Национального совета при Президенте РФ по профессиональным квалификациям с 2014 года НАКС осуществляет функции Совета по профессиональным квалификациям в области сварки. В 2021 году в России заработала новая система аттестации персонала и лабораторий НК опасных производственных объектов, созданная Российским обществом неразрушающего контроля и технической диагностики (РОНКТД) при участии Национального агентства контроля сварки (НАКС) и поддержке Ростехнадзора. Таким образом, в настоящее время НАКС обеспечивает решение всего круга вопросов сварочного производства и родственных технологий, осуществляя, помимо аттестационной деятельности, взаимодействие с учебными заведениями, промышленными предприятиями, производителями сварочных материалов и оборудования, что, несомненно, работает на нашу главную, магистральную задачу – повышение уровня промышленной безопасности на предприятиях России.

В сложившихся непростых международных условиях необходимость импортозамещения в стратегических отраслях экономики, особенно в сфере наукоемких технологий становится очевидной. И развитие в данном направлении немыслимо без участия научного сообщества, создающего новые инновационные технологии. Именно на решение этих задач и нацелена сегодняшняя конференция. Она традиционно проходит в регионе, бюджетообразующей отраслью которого является топливно-энергетический комплекс. По разным оценкам, доля импортного оборудования на угледобывающих предприятиях Кузбасса по отдельным позициям достигает 80–90 %. Убежден, что проведение международной конференции с участием ученых и специалистов-практиков, безусловно, имеет большое значение и для данного региона, и в целом для промышленного комплекса России благодаря открытому и взаимовыгодному обмену самыми современными идеями, наработками, практиками.

От души желаю участникам конференции плодотворной творческой работы, конструктивных дискуссий, установления взаимообогащающих контактов – на благо укрепления экономической независимости России.

Президент СРО Ассоциация «НАКС»,
академик РАН, доктор
технических наук,
профессор Н. П. Алёшин

Уважаемые Коллеги!

От имени Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностики (РОНКТД) приветствую Вас на III Международной научно-практической Конференции «ИННОВАЦИИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И МАШИНОСТРОЕНИИ» (ТЭК-2022).

РОНКТД – одно из крупнейших в мире национальных обществ по неразрушающему контролю, ведущее свою историю с 1956 г., объединяет ведущих учёных, преподавателей ВУЗов, производителей и потребителей средств и технологий НК, МС и ТД, а также специалистов в области подготовки, оценки квалификации, сертификации и аттестации персонала.

Ежегодно РОНКТД инициирует и развивает новые проекты, такие как: Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ «Новая Генерация», Всероссийский конкурс по неразрушающему контролю «Дефектоскопист», Гильдия Российских предприятий–производителей

оборудования и технологий неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния.

Все проекты и инициативы РОНКТД направлены на развитие отрасли, объединение ведущих компаний, вузов, ученых, специалистов, студентов, на организацию взаимодействия как внутри профессионального сообщества, так и с государственными органами, международными структурами и объединениями, с самым широким кругом потребителей.

Уверен, что объединение потенциала РОНКТД с энтузиазмом, научными и практическими достижениями участников Конференции позволит вывести вопросы неразрушающего контроля на объектах топливно-энергетического комплекса и машиностроения на новый уровень!

Желаю Вам удачного проведения Конференции, установления новых научных и деловых контактов, здоровья и успехов в деятельности, связанной с неразрушающим контролем качества!

Президент РОНКТД,
д.т.н., профессор В.А. Сясько

Уважаемые участники и гости конференции!

Для интенсивного развития экономики России – особенно в наше сложное время – необходимы инновационные подходы. Это в полной мере относится и к экономике Кузбасса, ориентированной главным образом на угледобывающую отрасль. В условиях жестких международных санкций вопрос импортозамещения встал особенно остро. Более 80 % оборудования ТЭК изготовлено за рубежом, а потому создание и развитие в Кузбассе инновационного машиностроения представляется особенно актуальным. Здесь важнейшее внимание должно быть уделено сварке – будучи междисциплинарной, она присутствует практически во всех отраслях промышленности, выступая в качестве стержневого процесса.

Сварка – это электроника и электротехника, химия и физическая химия, металлургия, машиностроение и металловедение, физика, разрушающие и неразрушающие испытания, сопромат и др. Именно такая ее многогранность и обусловливает стимулирующую роль инноваций в области сварки и родственных процессов в развитии многих отраслей промышленности.

В этом году мы отмечаем 30-летие Национального агентства контроля сварки. Не будет преувеличением сказать, что наша саморегулируемая организация – настоящее содружество высококвалифицированных профессионалов. Помимо аттестации и сертификации сварочного

производства, НК и ТД работа ученых и специалистов САСв в широком смысле нацелена на инновационное развитие промышленности России.

В Кемеровской области все эти вопросы поручено решать Кузбасскому центру сварки и контроля (КЦСК), который занимается научно-практическими работами по импортозамещению оборудования ТЭК, разработками перспективных технологий восстановления и упрочнения деталей горнодобывающего оборудования, новыми технологиями НК, диагностики и оценки ресурса длительно работающих технических устройств. Приглашаем все заинтересованные организации и предприятия к совместной деятельности.

Благодарим всех коллег – ученых и специалистов-практиков – за участие в работе настоящей конференции. Надеемся, что результаты ваших (и наших) исследований найдут практическое применение на предприятиях ТЭК. Желаем вам и вашим семьям, вашим коллегам и ученикам здоровья, успехов и удачи!

Директор ООО «Кузбасский центр
сварки и контроля»,
доктор технических наук, профессор А. Н. Смирнов

НАЦИОНАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО КОНТРОЛЯ СВАРКИ (СРО Ассоциация «НАКС»)

В настоящее время невозможно представить операции по изготовлению, монтажу, ремонту, строительству и реконструкции любых объектов без выполнения сварочных работ. Качественная сварка является одним из основных факторов, способствующих повышению надежной и безаварийной эксплуатации различных конструкций, промышленного оборудования, трубопроводов, особенно технических устройств опасных производственных объектов, подконтрольных Ростехнадзору, и является залогом безопасности общества.

В конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века начали существенно расширяться международные связи России со странами Западной Европы по многим направлениям, особенно в области научно-технического сотрудничества по машиностроительному (сварочному) направлению. Работа с зарубежными партнерами потребовала адаптации к российским условиям принятых в ведущих европейских странах нормативных документов.

Многочисленные деловые контакты российских специалистов-сварщиков с европейскими коллегами показали, что несмотря на наличие правил аттестации сварщиков (в редакциях 1940-го, 1955-го, 1971-го и 1993 годов), Россия существенно отстала в области аттестации (сертификации) специалистов по сварочному производству и требуется гармонизация подходов к процедурам аттестации.

Инициатором создания в России современной независимой системы аттестации персонала сварочного производства выступила группа ведущих специалистов, возглавляемая заведующим кафедрой сварки и диагностики МВТУ им. Н. Э. Баумана **Николаем Павловичем Алёшиным.** При его непосредственном участии в 1992 году было подготовлено совместное постановление Госгортехнадзора, Госатомнадзора, Госстандарта, Министерства науки, высшей школы и технической политики и Президиума Академии Наук России о создании в России специальной организации по обеспечению аттестации персонала сварочного производства – НАКС.

С момента создания НАКС и до середины 2000-х годов велась совместная с Ростехнадзором работа по формированию нормативной правовой базы аттестации различных элементов сварочного производства (персонала, сварочных материалов и оборудования, технологий сварки) которая завершилась созданием Системы аттестации сварочного производства на объектах, подконтрольных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (САСв Ростехнадзора).

Центральным органом системы является Саморегулируемая организация Ассоциация «Национальное Агентство Контроля Сварки» (СРО Ассоциация «НАКС»), Президентом которой с момента создания НАКС является академик РАН Н. П. Алёшин.

Исполнительными органами САСв Ростехнадзора являются независимые юридические лица - **аттестационные центры (АЦ)**, которые оказывают услуги по проведению аттестации элементов сварочного производства. АЦ созданы на всей территории России, а область их деятельности соответствует видам сварочных работ, выполняемых при изготовлении и ремонте технических устройств опасных производственных объектов, используемых на промышленных предприятиях РФ.

В настоящее время в 76 субъектах Российской Федерации в составе НАКС действует более 100 организаций – аттестационных центров. Аттестационные структуры НАКС созданы в Республике Беларусь, Донецкой Народной Республике, Республике Казахстан, Турции, Китайской Народной Республике.

Основной целью и областью деятельности НАКС явилось создание системы аттестации сварочного производства, включающей объединение, координацию и организацию работ по аттестации, подготовке и переподготовке специалистов в области сварочного производства в РФ.

Особенностью НАКС является то, что, будучи негосударственной организацией, оно участвует в решении государственных вопросов, связанных с обеспечением требуемого качества сварочных работ и, как следствие, безопасной работы важных промышленных и гражданских объектов путем использования при их изготовлении квалифицированных специалистов, качественных сварочных материалов, сварочного оборудования и применением аттестованных технологий сварки. Построение САСв осуществлялось в тесном сотрудничестве с представителями органов государственной власти, государственного надзора и системой образования, в первую очередь с высшей школой.

Учитывая громадный опыт формирования систем аттестации (сертификации) и оценки квалификаций работников, Н. П. Алёшин включен в состав Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям, созданный Указом Президента Российской Федерации от 16 апреля 2014 г. № 249.

Логичным развитием деятельности НАКС стало решение Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям от 29 июля 2014 г. об утверждении НАКС в качестве **Совета по профессиональным квалификациям в области сварки** (СПКС). Сферой деятельности СПКС являются вопросы развития национальной системы профессиональных квалификаций персонала по профессиям и специальностям в области сварки и родственных процессов, неразрушающего контроля и разрушающих испытаний сварных соединений. Отличительной особенностью

является то, что указанные профессии и специальности являются межотраслевыми, и наряду с основополагающими квалификационными требованиями, применимыми во всех отраслях, необходимо учитывать специфические отраслевые требования к работникам.

Не менее важным направлением деятельности НАКС является сфера технического регулирования и стандартизации. С 2007 года НАКС является базовой организацией Технического комитета по стандартизации Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии «Сварка и родственные процессы» ТК 364. За последние годы ТК 364 существенно обновил фонд национальных и межгосударственных стандартов в области сварки (более 100 гармонизированных с международными стандартов), обеспечивает взаимодействие с Международной организацией по стандартизации (ISO), а с 2016 года стал членом Международного института сварки.

В 2021 году в связи с необходимостью повышения качества контроля сварных соединений на технических устройствах опасных производственных объектов Российским обществом неразрушающего контроля и технической диагностики (РОНКТД) совместно с НАКС и поддержке Ростехнадзора была создана новая система аттестации персонала и лабораторий НК опасных промышленных объектов (СНК ОПО РОНКТД). Главным отличием новой системы является то, что в числе ее создателей и руководителей – ведущие российские ученые и специалисты в сфере НК. Разработанные ими современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики (ТД), новые приборы и оборудование, инновационные технологии широко известны и востребованы как среди отечественных специалистов, так и за рубежом. Новая система соответствует всем международным требованиям и призвана поднять качество НК и ТД в России. Еще одно существенное преимущество системы заключается в том, что ее базовыми единицами в территориях стали действующие центры Системы аттестации сварочного производства (САСв), что позволяет комплексно решать задачи повышения качества сварки на объектах и оборудовании.

В Кемеровской области представителем НАКС является ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» (ООО «КЦСК»), созданный в 1999 году при поддержке Кузнецкого управления Госгортехнадзора России и крупнейших промышленных предприятий области.

Сегодня ООО «КЦСК» осуществляет деятельность как АЦ в САСв Ростехнадзора, как центр оценки квалификаций в Национальной системе профессиональных квалификаций и АЦ в системе неразрушающего контроля опасных производственных объектов РОНКТД.

СЕКЦИЯ 1

УГОЛЬНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ

SECTION 1

COAL AND POWER ENGINEERING, IMPORT SUBSTITUTION

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ С УПРАВЛЯЕМЫМ ВЫПУСКОМ МЕЖСЛОЕВОЙ ТОЛЩИ УГЛЯ

DEVELOPMENT OF POWERED SUPPORT WITH CONTROLLED RELEASE OF INTERLAYER COAL

Клишин Владимир Иванович[1]
Klishin V.I.

[1] Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10
[1] Institute of Coal for Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS 650065, Kemerovo, Leningradskiy Ave., 10
e-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru

Аннотация: *Обосновано новое направление конструирования механизированный крепей для подземной разработки мощных угольных пластов с управляемым выпуском подкровельной толщи. Приведены новые технические решения создания механизированных комплексов с установкой в перекрытие секции крепи питателя. Выполнены лабораторные исследования взаимодействия крепи с выпускаемым углем, численное и имитационное моделирование процесса гравитационного движения раздробленного угля.*

Ключевые слова: *подземная добыча угля, механизированная крепь, технология с выпуском, стендовые испытания, численное и имитационное моделирование.*

Abstract: A new direction in the design of powered roof supports for underground mining of thick coal seams with controlled release of the under-roofing strata is substantiated. New technical solutions for the creation of mechanized complexes with the installation of a feeder support section in the ceiling are given. Laboratory studies of the interaction of the support with the produced coal, numerical and simulation modeling of the process of gravitational movement of crushed coal were carried out.

Key words: underground coal mining, powered roof support, LTCC, bench tests, numerical and simulation modeling.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают технологии разработки мощных угольных пластов на полную мощность с применением механизированных крепей, обеспечивающих выпуск угля из подкровельной или межслоевой толщи. В них заложен физический эффект разрушения угольной толщи, основанный на использовании сил горного давления. Этот факт позволил придать механизированным комплексам дополнительные функции, связанные с управлением процессом извлечения угля, находящегося над крепью или обрушающегося позади нее. Впервые этот способ был осуществлен в 1940-х годах в России и Казахстане, на шахтах с применением комплексов типа КТУ и выпуском угля на забойный конвейер отрабатываемого слоя [1-4]. Затем во Франции, бывшей Югославии, Венгрии, Румынии, бывшей Чехословакии, Турции, Ирана и Индии [5-12].

Механизированные комплексы с выпуском подкровельной (межслоевой) толщи отличались системами выпуска: на забойный скребковый конвейер отрабатываемого слоя,

примененный в комплексах КТУ, КНКМ (Россия), VHP-731 (Венгрия) и др., и на дополнительный завальный скребковый конвейер, расположенный в завальной части лавы (например, комплексы ОКПВ-70, КМ81В (Россия), ZFS (Китай) и др. Особенностями первого типа крепей является расположение выпускного отверстия в перекрытии вблизи от забоя, что позволяет иметь небольшой размер секции крепи по длине, но не обеспечивает необходимой подготовки угля к самообрушению из-за малого расстояния от верхняка до люка. При применении второго типа крепей с выпуском угля на завальный конвейер создаются благоприятные условия деформирования и разрушения подкровельной толщи. Однако это приводит к значительному увеличению размеров секции крепи, а введение дополнительного завального конвейера усложняет конструкцию.

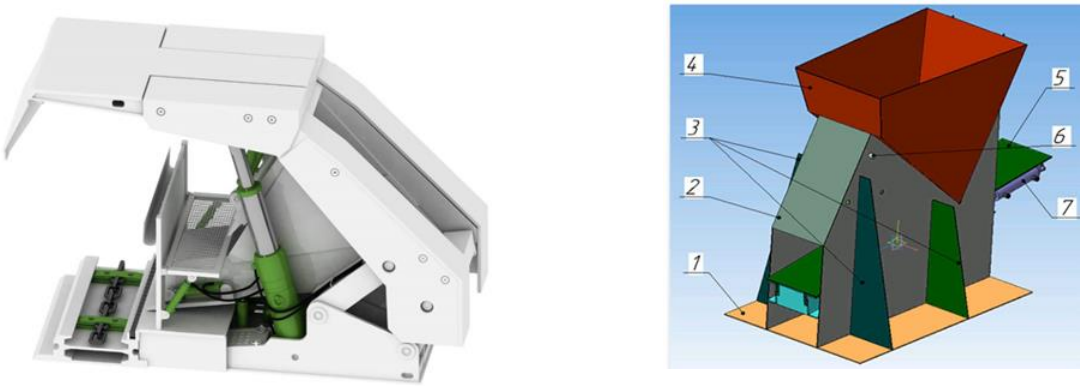
В настоящее время крепи второго типа очень популярны в Китае и Австралии, где они применяются в угольных пластах мощностью до 12 м на пластах переменной мощности, и обеспечивают более высокую производительность по сравнению с многослойным методом длинных забоев [13-17]. В Китайских шахтах такая технология применяется на протяжении 40 лет. Появилось большое количество угольных шахт мощностью 10 миллионов тонн в год с одной лавы на механизированный комплекс собственного производства и в 2013 году общая добыча из мощных угольных пластов достигла 730 миллионов тонн, что составляет 19,8% от общего объема добычи угля в Китае [18].

Материалы и экспериментальные процедуры

Очевидно, что в данной технологии основным элементом является особая крепь. Обоснование и создание такой крепи основано на изучении механизма движения выпускаемого угля через крепь. В настоящее время Институтом угля ФИЦ УУХ СО РАН разработаны и предлагаются технологии и конструкции механизированных крепей для подземной отработки мощных пологих угольных пластов с управляемым выпуском подкровельной толщи, объединенные общей идеей управления процессом перемещения предварительно разрушенной горной породы за счет установки питателя в перекрытие крепи для принудительно-управляемого выпуска на забойный конвейер, что открывает новое направление конструирования крепей. Предложенная новая конструкция механизированной крепи с устройством регулируемого выпуска угля на забойный конвейер содержит достоинства известных вариантов и исключает их недостатки (рисунок 1а) [19,20].

Применение питателей при выпуске подкровельной (межслоевой) толщи в механизированных крепях с выпуском самообрушающегося угля позволяет управлять и равномерно выпускать уголь по всей площади проема перекрытия, выполненного в секции механизированной крепи. Кроме того, производительность питателя должна регулироваться в широком диапазоне. Предусматриваться одновременная работа группы питателей на один забойный конвейер. Количество питателей, работающих в группе, определяется технической возможностью забойного скребкового конвейера. В этом случае контактная граница «уголь-порода» опускается одновременно и достигается площадно-управляемый выпуск. Конструкция питателя рассчитана для работы в тяжелых условиях под завалом угля (рисунок 1б), что открывает новое направление конструирования крепей. Предложенная новая конструкция механизированной крепи с устройством регулируемого выпуска угля на забойный конвейер содержит достоинства известных вариантов и исключает их недостатки.

Предлагаемая технология отработки мощных угольных пластов требует изучения процесса выпуска угля в подсечной слой, обоснования параметров технических решений и разработку принципиально новой конструкции всего добычного комплекса. В представленной работе приведены результаты и лабораторного моделирования процесса выпуска предварительно раздробленной горной массы через выпускное окно в секции механизированной крепи, численные расчеты и имитационное моделирование.

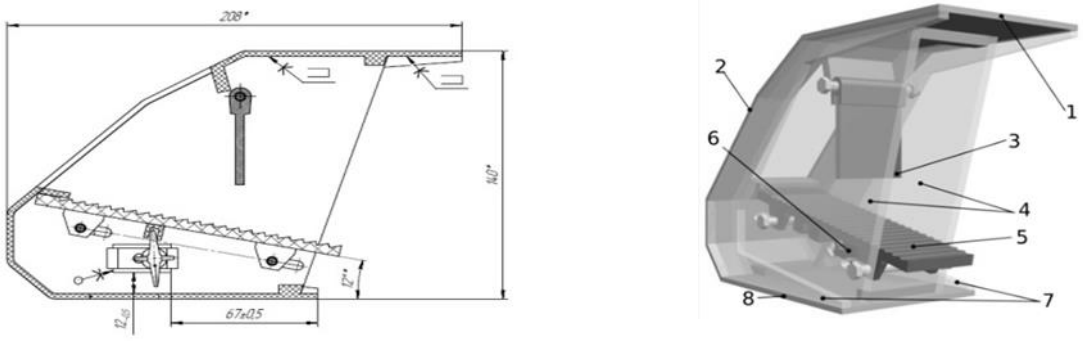


а) б)

Рисунок 1 – внешний вид механизированной крепи (а) и лабораторной установки (питателя в крепи) (б) для определения объёма породы:
1 - основание, 2 - корпус, 3 - ребро жесткости, 4 - загрузочный бак, 5 - питатель, 6 - регулируемая заслонка, 7 – гидроцилиндр

Результаты и обсуждение

Для лабораторных исследований процесса выпуска были разработаны и созданы в масштабе 1:25 модели секции механизированной крепи с устройствами передвижки (рисунок 2). Макеты секции крепи в количестве 20 штук были установлены в корпусе лабораторного стенда. Ширина короба по внутренним поверхностям прозрачных боковых стенок равна 1600 мм. Устройством удаления выпущенного угля из забойной зоны служит конвейерная лента шириной 65 мм и толщиной 4 мм, монтируемая перед основанием макетов секций. Приводом ленты служит мотор-редуктор, установленный под основанием лабораторной установки. Регулировка производительности ленты осуществляется преобразователем частоты вращения мотора. Натяжение конвейерной ленты осуществляется натяжным устройством, смонтированным с противоположной стороны короба, включающего в себя натяжной барабан и натяжные винты [21,22].



а) б)

Рисунок 2 – Эскиз (*а*) и трехмерная модель (*б*) макетного образца секции механизированной крепи с выпуском горной массы на забойный конвейер:
1 – перекрытие; 2 – завальное ограждение; 3 – заслон; 4 – внутренние боковины (ограждающие стенки); 5 – автоматизированное устройство выпуска (питатель); 6 – сервомотор питателя; 7 – внешние боковины; 8 – основания

Система управления выпуском представляет собой аппаратно-программные средства, позволяющие осуществлять изменение параметров питателя (чистота, амплитуда) и режимов работы (индивидуальный, групповой). Лабораторная установка оснащена

регистрирующей аппаратурой, обеспечивающей фото и видео фиксацию процесса управляемого выпуска. Данная установка позволяет проводить эксперименты по выпуску угля на макетных образцах секций механизированной крепи в различных режимах работы: индивидуальном, групповом, волновом, площадном.

В качестве выпускной массы, имитирующей уголь, используется щебень, окрашенный в черный цвет, фракция 5÷15 мм, породу – мраморная крошка серо-розового цвета, фракция 13÷25 мм. Для визуализации потока выпускной массы, материал, имитирующий угольную массу, разделён слоями белого щебня фракцией 5÷10 мм. Кроме волнового и площадного режимов выпуска, программа и методика лабораторных исследований включает индивидуальный (процесс выпуска осуществляется поочередно на каждой секции) и групповой (процесс выпуска осуществляется одновременно на группе секций из 3–5 штук) режимы (рисунок 3).

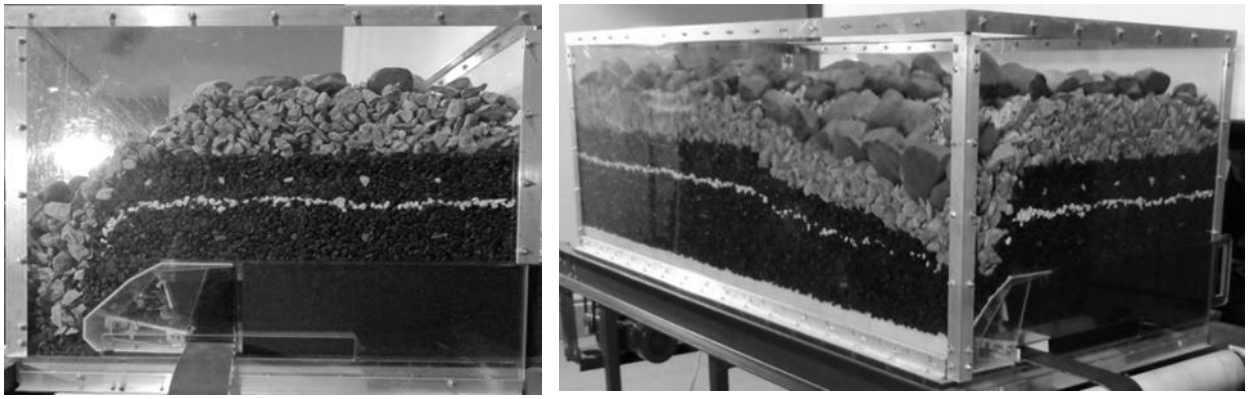


Рисунок 3 – Лабораторные исследования процесса выпуска в различных режимах

Численное моделирование процесса гравитационного движения раздробленной горной массы методом дискретных элементов

Метод дискретных элементов (МДЭ) весьма эффективно описывает поведение гранулированных сред, состоящих из частиц произвольного размера и формы. Суть МДЭ состоит в том, что реальная среда заменяется набором дискретных частиц, между которыми постулируются определенные законы взаимодействия. Располагая данными о законе движения и контактного взаимодействия между частицами, а также начальными и краевыми условиями, можно численно строить решения уравнений движения и определять эволюцию напряженно-деформированного состояния среды.

Численный эксперимент методом дискретных элементов

Пусть в пространстве *Oxyz* задана область — параллелепипед, ограниченный плоскостями, ориентированными вдоль координатных осей; верхняя граница свободна от напряжений (рисунок 4). Длина области составляет 10 м, ширина 2 м, а высота засыпки 12.5 м. Вектор силы тяжести $\boldsymbol{g} = (0; 0; -9.81)$ направлен вдоль оси *Oz* вертикально вниз. Передняя и задняя стенки абсолютно гладкие, т.е. выполняется условие, близкое к условию плоской деформации в направлении оси *Oy*. Мощность угольного пласта составляет 3 м. Цифрами представлены основные элементы модели секции механизированной крепи высотой 3.5 м: верхняк 1 длиной 2.5 м; неподвижная вертикальная заслонка 2 высотой 1.75 м, ограничивающая скорость и объем потока сыпучего материала; питатель 3 длиной 3.575 м, расположенный под углом 12^0 к горизонтальной плоскости; выпускное отверстие 4 шириной 1 м, боковые ограждения 5, расстояние между которыми составляет 1 м [23].

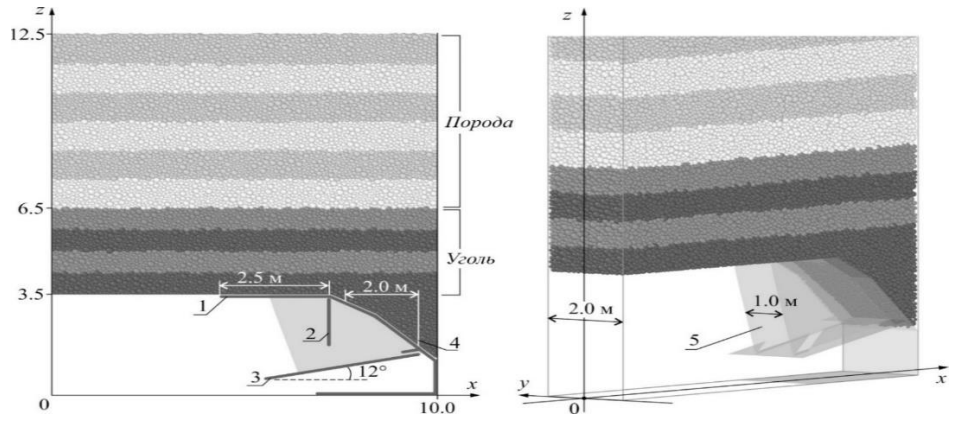
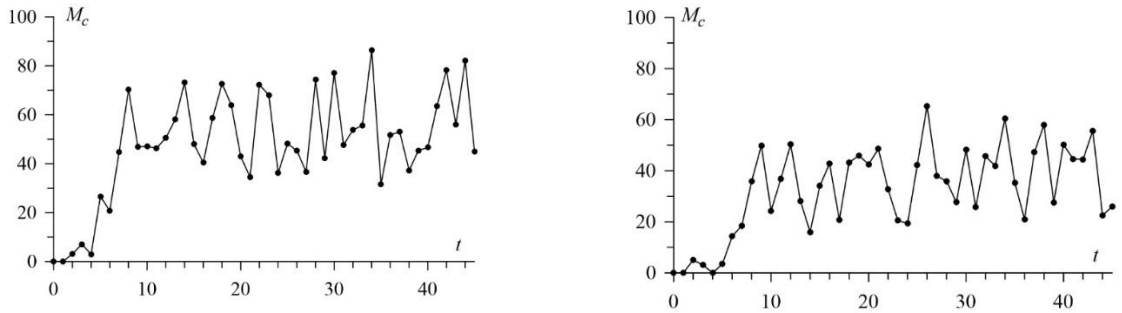


Рисунок 4 – Схема численного эксперимента

Выпуск раздробленной горной массы с помощью работающего питателя, когда за счет трения на контактах между частицами и питателем сыпучий материал вовлекается в движение. В эксперименте поверхность питателя задавалась гладкой, и рифлениями в виде ступенек длиной 0.15 м, ориентированные параллельно горизонтальной плоскости Массовый расход угля M_c (кг/с) при таком режиме выпуска за 45 секунд эксперимента продемонстрирован на рисунок 5. В случае гладкого питателя среднее значение показателя M_c составило 47 кг/с, общая масса выпущенного угля – 2 193 кг (рисунок 5а). В случае, когда питатель имеет на поверхности рифления, данные показатели составили 32 кг/с и 1 500 кг соответственно (рисунок 5б).



а) б)

Рисунок 5 – Массовый расход (кг/с) угля при выпуске с работающим гладким (а) и рифленым (б) питателем

Имитационное моделирование процесса выпуска угля

Выпуск угля подкровельной толщи при отработке мощных угольных пластов является ключевым фактором, влияющим на эффективность добычи, и обеспечивающим полноту выпуска. Наличия в технологии большого количества случайных факторов (большая динамичность процесса, непостоянство и стохастичность объема и скорости выпуска угля и проч.) в реальных условиях обуславливает необходимость применения цифрового моделирования. Нами разработана программное обеспечение, позволяющее моделирования четыре основных режима выпуска: индивидуальный, волновой, групповой, площадной (рисунок 6 а-г) [24].

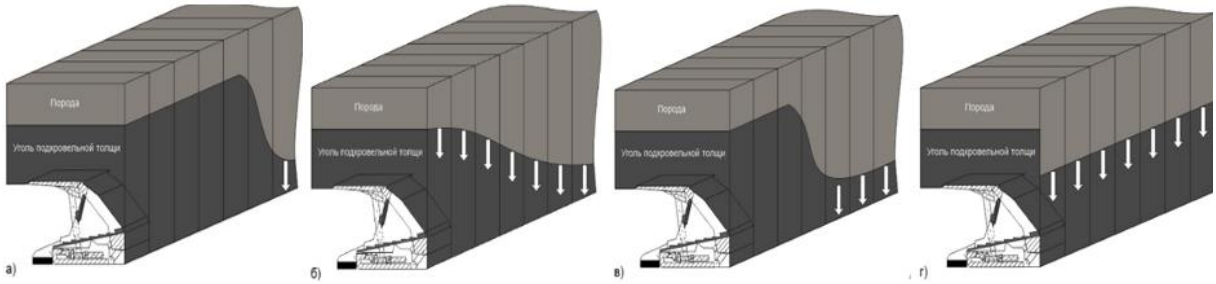


Рисунок 6 – Возможные режимы выпуска угля подкровельной толщи
а) индивидуальный, б) волновой, в) групповой, г) площадной

Разработанное специализированное программное обеспечение позволит горному инженеру на стадии проектирования автоматизировать процесс выбора из любого возможного режима работы комплекса с роботизированным управляемым выпуском угля подкровельной толщи для разных горно-геологических условий.

Выводы

Для подземной отработки мощных угольных пластов рекомендуется технология выемки с выпуском подкровельной толщи на базе современной механизированной крепи с регулируемым управляемым выпуском. В основу конструкции положено использование питателей в секциях крепи, обеспечивающих управляемый площадной выпуск по длине лавы, позволяющий получить повышенные технико-экономических показателей очистных работ. Параметры механизированной крепи зависимы между собой и технологическими операциями передвижки секции крепи, и выбор рационального шага передвижки производится с учетом ширины зоны потока, кратной шагам передвижки секции крепи или ширины вынимаемой лавы.

Разработана лабораторная модель механизированной крепи, а также система управления выпуском, позволяющая изменять параметры как питателя (частоту, амплитуду), так и режимы выпуска (индивидуальный, групповой). Создана лабораторная установка, оснащенная регистрирующей аппаратурой, обеспечивающей фото и видео фиксацию процесса управляемого выпуска. Выполнены тестовые лабораторные исследования процесса выпуска, показано соответствие теоретических представлений и экспериментальных исследований.

Представленная на основе метода дискретных элементов модель гравитационного движения раздробленной горной массы при добыче полезных ископаемых с выпуском подкровельной толщи учитывает основные технологические этапы: создание начального равновесного состояния горной массы; выпуск полезного ископаемого на питатель секции механизированной крепи; функционирование питателя и дальнейший выпуск в соответствии с технологической схемой функционирования крепи. Численные эксперименты показали, что периодический характер функционирования питателя вызывает периодическое изменение как массового расхода полезного ископаемого, так и нагрузки со стороны движущейся горной массы на элементы механизированной крепи в процессе выпуска. При этом конфигурация поверхности питателя оказывает существенное влияние на исследуемые характеристики.

Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс выбора оптимального режима работы очистного комбайна с роботизированным управляемым выпуском угля механизированным комплексом.

Список литературы

1. Коровкин Ю. А., Савченко П. Ф. Теория и практика длиннолавных систем. – М.: Горн. дело, 2012. – 808 с.

2. Клишин В. И., Шундулиди И. А., Ермаков А. Ю., Соловьев А. С. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля. – Новосибирск: Наука, 2013. – 248 с.

3. Шундулиди И.А., Марков А.С., Калинин С.И., Егоров П.В. Выбор параметров технологии отработки мощных угольных пластов с выпуском межслоевых и подкровельных пачек угля. – Кемерово: Кемер. отд-ние Акад. горн. наук, 1999. – 258 с.

4. Калинин С. И., Новосельцев С. А., Галимарданов Р. Х., Ренев А. А., Филимонов К. А., Тимошенко А. М., Федорович А. П. Отработка мощного угольного пласта механизированным комплексом с выпуском подкровельной пачки. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 224 с.

5. Singh R. Mining methods to overcome geotechnical problems during underground working of thick coal seams-case studies. Trans Inst Min Metall (Sec A: Min Indus) 1999;108:A121–31.

6. Atkinson T. Thick, steep and irregular coal seam mining. The Min Eng 1979; 421–41.

7. Schweitzer R. Thick seam winning methods in French coal mines. Proceedings of the international symposium on thick seam mining, Dhanbad, India, 1977, paper no. 3.

8. Ahcan R. Mechanization and concentration of thick coal seams mining in SFR Yugoslavia. Proceedings of the international symposium on thick seam mining, Dhanbad, India, 1977, paper no. 4.

9. Garg PC, Nath PD. Choice of methods for mining thick coal seams in India. Proceedings of the international symposium on thick seam mining, Dhanbad, India, 1977, paper no. 10.

10.Yasitli NE. Numerical modeling of longwall with top coal caving. M.Sc. thesis, Hacettepe University, Ankara, 2002. p. 148 (in Turkish).

11. Unver B., Yasitli N.E. Modelling of strata movement with a special reference to caving mechanism in thick seam coal mining. International Journal of Coal Geology, 2006, Volume 66, Is-sue 4, pp 227–252.

12. Alireza Jabinpoura, Alireza Yarahmadi Bafghib, Javad Gholamnejad Application of Vibra-tion in Longwall Top Coal Caving Method. International Academic Journal of Science and Engineer-ing. 2016, Vol. 3, No. 2, pp. 102–109.

13. Kumar R., Singh A. K., Mishra A. K. and Singh R. Underground mining of thick coal seams. International Journal of Mining Science and Technology. 2015, Vol. 25, Issue 6, pp. 885–896.

14. Hebblewhite B.K. Status and Prospects of Underground Thick Coal Seam Mining Methods. The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, IMCET2005, Izmir, Turkey, June 09–12, 2005.

15. Guo J., Ma L., Wang Ye, Wang F. Hanging Wall Pressure Relief Mechanism of Horizontal Section Top-Coal Caving Face and Its Application – A Case Study of the Urumqi Coalfield, China. Energies, 2017, 10 (9), 1371.

16. Simsir F. and Ozfirat M. K. Determination of the most effective longwall equipment com-bination in longwall top coal caving (LTCC) method by simulation modelling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2008, Vol. 45, No. 6. – P. 1015-1023.

17. Vakili A. and Hebblewhite B. K. A new cavability assessment criterion for Longwall Top Coal Caving, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2010, Vol. 47, No. 8. – P. 1317-1329. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.08.010

18. Wang J. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines, Int. J. Coal Sci. Technol., 2014, Vol. 1, No. 3. – P. 253-260.

19. Клишин В.И., Фокин Ю.С., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля. Новосибирск: Наука, 2007. – 135 с.

20. Клишин, В.И. Обоснование технологий разработки мощных пологих и крутых угольных пластов с выпуском / В.И. Клишин // Ин-т угля Сибирского отделения РАН: отдельный вып. ГИАБ. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – № ОВ 6. – С.36-48.

21. Клишин В.И., Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л., Малахов Ю.В. Обоснование программы и методики лабораторных исследований управляемого выпуска угля подкровельной толщи // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – №. 4. – С. 196–199.

22. Клишин В.И., Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л., Кокоулин Д.И., Худынцев Е.А. Разработка макетного образца механизированной крепи и лабораторной установки для моделирования управляемого выпуска угля // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 199–203.

23. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направления развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском // Вестник ТулПИ, Тула, 2019. С.

24.Starodubov, A., Sinoviev, V., Totskiy, A., Klishin, V. Review of Mining Equipment with Controlled Robotized Subvel Caving with Spe-cialized Software //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 174. – С. 03012.

МОДЕРНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ СКРЫТОЙ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ КАК НОВАЯ ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УЧЕТА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

MODERNIZATION OF HIDDEN MARKOV MODEL ARCHITECTURE AS A NEW BASIS FOR EFFECTIVE SOLUTION OF THE PROBLEM OF INTELLIGENT METERING OF ENERGY CONSUMPTION

Стародубов Алексей Николаевич[1,2]
Starodubov A.N.
Пылов Петр Андреевич[2]
Pylov P.A.

[1]Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН,
650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[1]Institute of Coal for Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS
650065, Kemerovo, Leningradskiy Ave., 10
[2]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
650000, Kemerovo, Vesennya str., 28
e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Аннотация: *Современное горное производство характеризуется постоянным увеличением объемов выполняемых работ и темпов их ведения, что приводит к росту объемов потребляемой электроэнергии. Возникает задача контроля электропотребления энергоемкими электроустановками и шахтными сетями. В данной статье описаны способы решения поставленной задачи, изучена особенность широко применяемого алгоритма скрытой марковской модели для решения данной задачи в других отраслях. Предложена методология модернизации алгоритма скрытой марковской модели искусственного интеллекта, которая существенно повышает его практическую эффективность.*

Ключевые слова: *искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение, скрытые слои, интеллектуальный учёт электроэнергии.*

Abstract: Modern mining production is characterized by a constant increase in the volume of work performed and the pace of their maintenance, which leads to an increase in the volume of electricity consumed. There is a problem of control of power consumption by energy-intensive electrical installations and mine networks. This article describes how to solve the problem, studied the feature of the widely used hidden Markov model algorithm for solving this problem in other industries. A methodology for upgrading the algorithm of the hidden Markov model of artificial intelligence is proposed, which significantly increases its practical efficiency.

Key words: artificial intelligence, machine learning, deep learning, hidden layers, smart electricity metering.

Введение

Интенсивное развитие проходческих и очистных работы в условиях современного горного производства приводит к увеличению объемов выполняемых работ и темпов их ведения, что обуславливает рост энергоемкости процессов и объемов потребляемой электроэнергии. При этом для некоторых технологических процессов ограничена возможность контроля электропотребления энергоемкими электроустановками (электродвигатели конвейерных, вентиляторных, компрессорных, подъемных, водоотливных установок, осветительные установки, электровозы) а так же шахтных сетей. Для подземных работ характерны неравномерность и неопределенность режима электропотребления по разным причинам (затупившийся инструмент, нерациональные режимы работы, чрезмерный износ отдельных узлов, потери и подсосы воздуха), а также значительное влияние технологических факторов на эффективность ведения горных работ. С учётом специфических особенностей (технологической схемы, механизации, вентиляции и т.д.) на каждой шахте разрабатываются конкретные мероприятия по экономии электрической энергии. Проводится анализ режимов работы электрической сети шахты, наиболее энергоемких электроустановок и групп установок с целью определения возможности снижения реактивных нагрузок путём рационализации режимов электропотребления и режимов работы оборудования (например, ограничение холостого хода). Поэтому существует потребность в определении элементов энергосистемы, имеющих повышенный расход энергии, с целью минимизации потерь и, соответственно, финансовых затрат.

Материалы и экспериментальные процедуры

Для исключения организационных трудностей, связанных с проведением исследований в условиях действующего угольного предприятия, отработки и обеспечения наглядности предлагаемого подхода указанная задача контроля и учета электроэнергии решена на основе открытых данных. В подавляющем большинстве предприятий установлен единый счетчик учета потребляемой электроэнергии. Однако, из общего счета электрозатрат не возможности определить, какая его часть имеет отношение к конкретному потребителю. В простейшем случае, для того чтобы точно понимать сколько энергии понадобилось каждому прибору, достаточно подключать каждый прибор через «умную» розетку – устройство, которое является посредником между точкой и электроприбором, фиксирующее значение потребленной им энергии. Такой метод, при своей очевидности, имеет множество недостатков, например: каждое отдельное устройство должно подключаться только к своей розетке; для каждого устройства нужна своя «умная» розетка. Всё это приводит к серьезным неудобствам использования электросети, а также жёстко ограничивает масштабируемость устройств. Реализовать данный подход в условиях горного предприятия представляется куда более сложным.

Таким образом, появляется потребность в поиске универсального решения, способного детектировать энергопотребление отдельных устройств на уровне общего электропотребления, при этом не снижая удобство использования точек подключения в помещении. Например в быту этим универсальным решением стало внедрение интеллектуальной системы в общий счётчик [1].

Главной задачей интеллектуальной системы является извлечение сигнала электроприбора из общего потока потребляемой электроэнергии. С точки зрения искусственного интеллекта задача становится сопоставима с проблемой распознавания речи по следующим значительным сходствам:

- в качестве главного объекта имеется сигнал, который состоит из последовательности сэмплов информации;

- от сэмплов информации в последовательности можно уверенно ожидать корреляции (как в большинстве случаев слова формируют логически связанное предложение, так и в энергопотреблении формируются упорядоченные тенденции).

На основании этих факторов для решения задачи были широко применены интеллектуальные системы, в основе которых лежали различные модели [2 – 5]:

- модели машинного обучения (Machine Learning – ML) [6 – 10];
- модели глубокого обучения (Deep Learning – DL) [6, 8 – 10].

Модели машинного обучения успешно решают рассматриваемую задачу, но имеют существенный недостаток: при добавлении нового электроприбора в обязательном порядке потребуется программное написание новой алгоритмической модели. Учитывая такое отсутствие гибкости в алгоритмах машинного обучения, далее будут рассматриваться исключительно алгоритмы глубокого обучения.

Такие алгоритмы позволяют адаптивно подстраиваться под новые подключения в автоматическом режиме, не требуя никаких вмешательств со стороны людей. Из алгоритмов глубокого обучения при решении данной задачи своей эффективностью зарекомендовала себя байессовская сеть доверия и марковская модель. Следует понимать, что в общем виде байесовскую сеть доверия можно рассматривать как простейшую скрытую марковскую модель [11].

Современные решения, основанные на скрытой марковской модели, углубляются в настройку параметров модели, её конкатенации с другими алгоритмами.

Следует выделить очень важный аспект: электрический ток, потребляемый приборами и рассматриваемый нами как сигнал, зачастую одновременно используется несколькими электрическими приборами. В таком случае, каждое включенное устройство генерирует свой выходной сигнал, присутствующий в общем сигнале.

Описанный выше аспект учитывается в широко распространенной на сегодняшний день скрытой марковской модели через увеличение исследуемых гиперпараметров модели. Разумеется, что при увеличении числа гиперпараметров увеличиваются требования к вычислительным ресурсам и общему времени на регистрацию результатов [12], что, однако, не может гарантировать высокой точности полученных результатов.

Принимая во внимание данный тезис, представляется возможным коренная модернизация архитектуры алгоритма канонической скрытой марковской модели. Поскольку каноническая модель отлично контролирует один процесс, который может иметь несколько состояний (в предлагаемом подходе – для одного электроприбора), то для контроля над несколькими приборами рациональным решением станет реконструкция архитектуры скрытой марковской модели, расширение которой можно точно охарактеризовать следующей однозначной формулировкой: расширяем скрытую модель на X независимых марковских цепей скрытых переменных, притом каждая из которых может находиться в Y состояниях (достаточно только двух: работает или нет). Таким образом получается своего рода факториальная скрытая марковская модель.

В качестве языка программирования был выбран Python версии 3.9.2. Для этого языка программирования выпускаются и постоянно обновляются вспомогательные высокопроизводительные библиотеки машинного и глубокого обучения на основе низкоуровневых языков программирования, поддерживается актуальность библиотек и добавляются новые методы. Благодаря своей гибкости и удобству написания кода, Python возглавил рейтинг самых популярных языков программирования 2021 года [13].

Для проверки результатов выдвинутой гипотезы было принято решение сопоставить общепринятый алгоритм с модифицированным алгоритмом, представленным в данной статье.

Общие критерии алгоритмов:

- В качестве исходных данных было принято использовать данные об энергопотреблении из открытых датасетов, предназначенных для построения интеллектуальных систем учета, включающего в себя данные реального потребления устройств[1];
- Так как алгоритм должен точно определять включено ли устройство или нет, а также определить количество затраченной им энергии за определенный участок времени, то критериями оценки точности алгоритма становятся среднее абсолютное отклонение (САО). САО позволит определить, насколько оценка отклоняется от действительных замеров.

Программная модернизация скрытой марковской модели отражается в нескольких пунктах:

1. Внедряется новая функция для вычисления факторизованных параметров скрытой марковской модели (начальные вероятности или матрицы перехода от первоначальных параметров), представленная на рисунке 1.

```
def factorized_prmts(nd_parameters_list):

    UseFactorizationPrms = nd_parameters_list[0]
    for idr in xrange(1,len(nd_parameters_list)):
        Factorizeden = np.kron(UseFactorizationPrms,nd_parameters_list[idr])

    return UseFactorizationPrms
```

Рисунок 1 – Функция для вычисления факторизованных параметров

2. После предварительной подготовки модель текущей версии обучается только на первом фрагменте данных на каждом скрытом слое (рисунок 2).

```
def training(self, instr, number={}, **load_kwargs):

        learnt_model = OrderedDict()
        num_meters = len(instr)
        if num_meters > 12:
            max_num_clusters = 2
        else:
            max_num_clusters = 3

        for i, network in enumerate(instr):
            power_data = network.power_data.fillna(value = 0,inplace = False)
            X = power_data.values.reshape((-1, 1))
            assert X.ndim == 2
            self.X = X

            if number.get(network.name) is not None:
                num_total_states = number.get(network.name)

            else:
                print "Количество скрытых состояний {}".format(network.name)
                states = cluster(X, max_num_clusters)
                num_total_states = len(states)
                print "Номер скрытого состояния {}: {}".format(network.name, num_total_states)

            print("Тренировка модели {} с {} скрытыми состояниями".format(network.name, num_total_states))
            learnt_model[network.name] = GaussianHMM(num_total_states, "full")

            learnt_model[network.name].fit(X)
```

Рисунок 2 – Обучение модели

3. Определение электроприборов в модернизированном алгоритме организовано через отражение данных из сохраненного словаря (рисунок 3), что, в сравнение с общепринятой методикой, позволяет гораздо быстрее получать итоговый результат, а также

[1] https://www.nature.com/articles/sdata20157

значительно экономит вычислительные ресурсы системы в целом (не пересчитываются из значений гиперпараметров вновь и вновь при каждом обращении к сектору памяти).

```
def detection(self, test_mains):

        learnt_states_array = []
        test_mains = test_mains.dropna()
        length = len(test_mains.index)
        temp = test_mains.values.reshape(length, 1)
        learnt_states_array.append(self.model.predict(temp))

        # модель
        means = OrderedDict()
        for izmer, model in self.individual.iteritems():
            means[izmer] = (
                model.means_.round().astype(int).flatten().tolist())
            means[izmer].sort()

        decoded_power_array = []
        decoded_states_array = []

        for learnt_states in learnt_states_array:
            [decoded_states, decoded_power] = decode_hmm(
                len(learnt_states), means, means.keys(), learnt_states)
            decoded_states_array.append(decoded_states)
            decoded_power_array.append(decoded_power)

        prediction = pd.DataFrame(
            decoded_power_array[0], index=test_mains.index)

        return prediction
```

Рисунок 3 – Организация определения электроприборов

Результаты и обсуждение

Как было упомянуто ранее, наиболее правильным аналитическим критерием точности алгоритмов в данной задаче является величина САО (в англоязычной литературе mean absolute deviation – MAD), при которой наименьшее, близкое к нулю значение, будет характеризовать большую точность модели.

Исходные условия эксперимента: в наборе исходных данных содержится информация об энергопотреблении 10 объектов на протяжении одного календарного месяца. Для каждого объекта, кроме общей энергопотребности, измеряется уровень потребления энергии с частотой в 6 секунд (то есть за каждый период в 6 секунд записываются результаты потребления энергии). Задача алгоритма искусственного интеллекта состоит в анализе общего энергопотребления и формировании возможности оценки определения активности конкретного прибора и его уровня электропотребления в общей сети.

Сравнение моделей на основе предложенного критерия MAD (рисунки 4 – 5) доказывают, что применение модернизированного алгоритма позволяет существенно увеличить эффективность скрытой марковской модели в условиях задачи интеллектуального учета. Возрастание точности критерия precision характеризует наиболее точное определение включен прибор или нет (соответствующие значения точности у состояний 0 и 1, где 1 – прибор работает), а также САО уменьшилось более, чем в три раза.

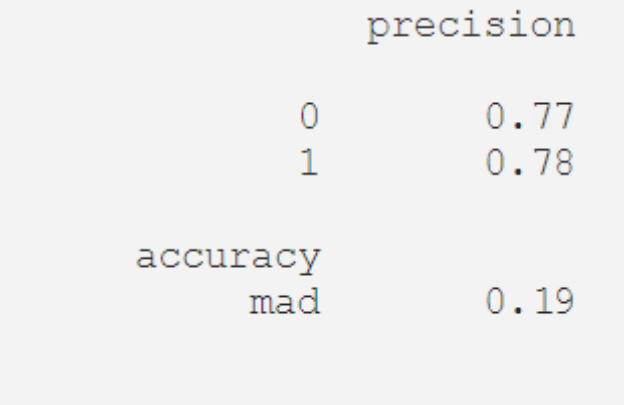


Рисунок 4 – Алгоритм скрытой марковской модели

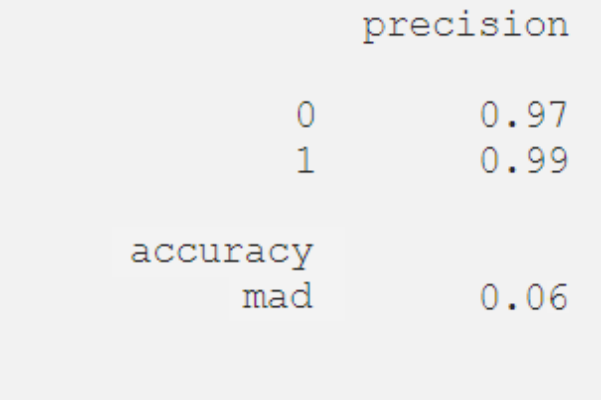


Рисунок 5 – Модернизированный алгоритм скрытой марковской модели

На рисунке 6 представлены результаты интерпретации работы скрытой марковской модели для разных конечных электроприборов, одновременно работавших в сети в данный период времени. В исходном наборе данных присутствуют истинные значения потребления каждого прибора в отдельности (на результирующем графике обозначены зелёной пунктирной линией – baseline), благодаря этому на примере конкретного электроприбора появляется возможность наглядно просмотреть точность реализованной модели (сплошная синяя линия – model).

Линия baseline отражает прецизионные значения потребления электроэнергии конкретным электроприбором. Поскольку результаты интерпретации модели представлены на основании тестовой выборки, то практический смысл линии baseline, например, на рисунке 6 – это графическая характеристика энергопотребления прибора, отделенная от общего энергопотребления сети в одном из объектов. Соответственно, линия model трактуется как предсказанная величина энергопотребления прибора, которая была отделена алгоритмом из общих энергозатрат объекта.

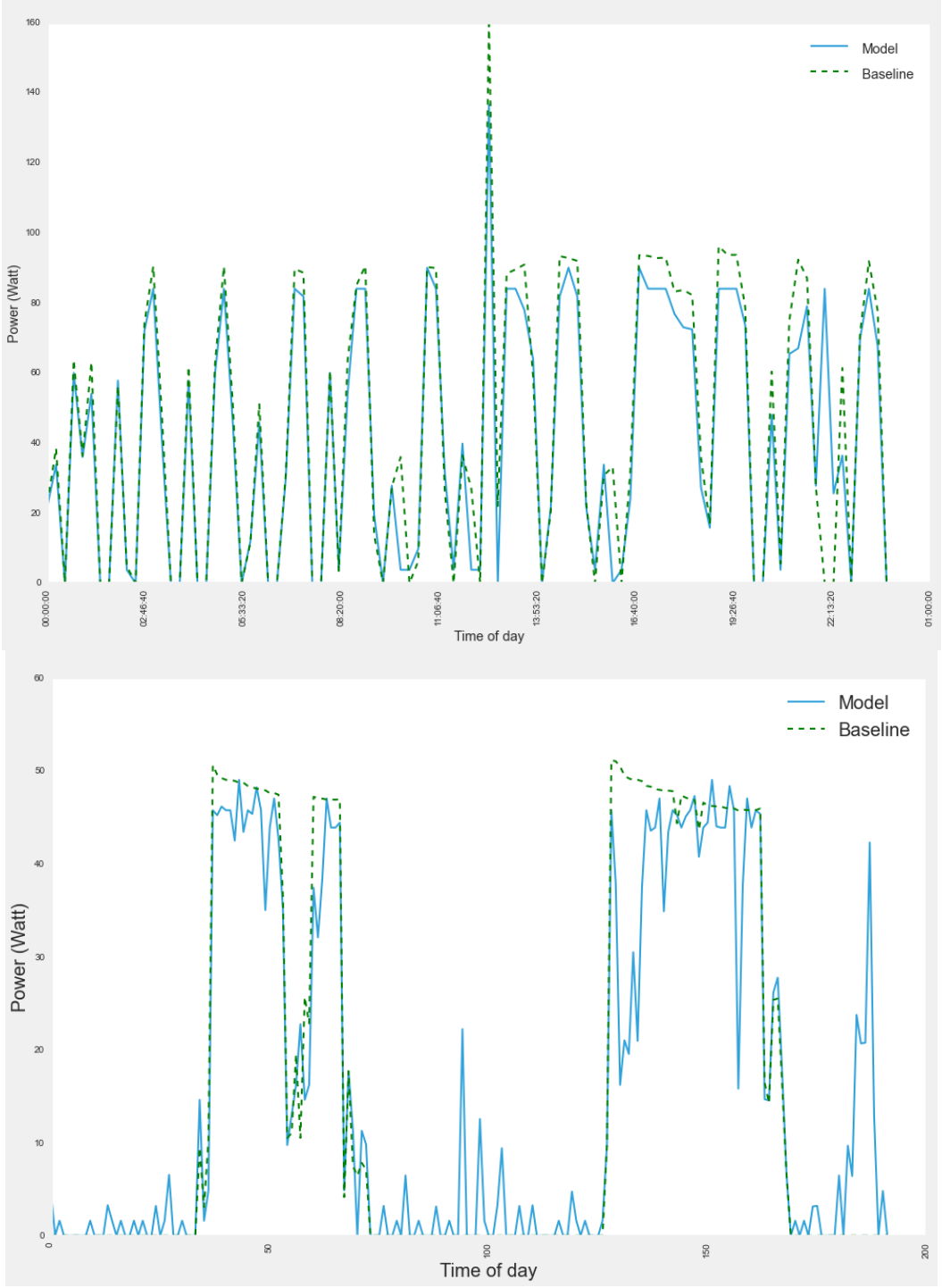


Рисунок 6 – Фиксирование данных модернизированным алгоритмом для электропотребления разных конечных электроприборов

Выводы

Изменение архитектуры скрытой марковской модели позволило сделать предположение о её эффективности ещё на этапе гипотезы. Оценка результатов точности модели по критерию MAD подтверждает обоснованность выдвинутой гипотезы, а также подчёркивает практическую ценность модернизации архитектуры алгоритма.

Параллельная работа нескольких электроприборов в сети не позволяет алгоритму правильным образом отслеживать тенденцию энергопотребления отдельно взятого прибора

(на рисунке 6 отражена неравномерная регистрация энергопотребления моделью, по сравнению с действительными значениями), однако эту проблему можно нивелировать, путём предварительного обучения алгоритма тенденциям энергопотребления каждого прибора в отдельности.

Таким образом показано, что модернизация архитектуры скрытой марковской модели при должной подготовке может служить основой эффективного решения задачи интеллектуального учета энергопотребления в условиях горнодобывающего предприятия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0017 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. № 121121000036-1).

Список литературы

1. Государственная Дума Российской Федерации приняла закон об интеллектуальных системах учета электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tass.ru/ekonomika/5930173
2. Non-intrusive load disaggregation solutions for very low-rate smart meter data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626192030461X
3. Disaggregation of household solar energy generation using censored smart meter data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/347799760_Disaggregation_of_household_solar_energy_generation_using_censored_smart_meter_data
4. Energy disaggregation based on smart metering data via semi-binary nonnegative matrix factorization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/328784164_Energy_Disaggregation_Based_on_Smart_Metering_Data_via_Semi-Binary_Nonnegative_Matrix_Factorization
5. Test System for Disaggregation Algorithms for use in Smart Meters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211044122
6. Disaggregation of Electric Appliance's Consumption Using Collected Data by Smart Metering System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215013648
7. Electric Load Disaggregation in Smart Metering Using a Novel Feature Extraction Method and Supervised Classification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/241122968_Electric_Load_Disaggregation_in_Smart_Metering_Using_a_Novel_Feature_Extraction_Method_and_Supervised_Classification
8. Smart meter data classification using optimized random forest algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019057821004195
9. Cooling load disaggregation using a NILM method based on random forest for smart buildings [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/353448490_Cooling_Load_Disaggregation_Using_a_NILM_Method_Based_on_Random_Forest_for_Smart_Buildings
10. Predicting winners and losers under time-of-use tariffs using smart meter data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/353308193_Predicting_Winners_and_Losers_under_Time-Of-Use_Tariffs_Using_Smart_Meter_Data

11. Лекция (слайды) №7 курса «Вероятностное обучение» Сергея Николенко, посвященная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/mlbayes/07-hmm2.pdf

12. Serge Kruk. Practical Python Al Projects. – Apress. 2018. – 271 с.

13. Top Programming Languages 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://spectrum.ieee.org/top-programming-languages/#toggle-gdpr

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ППД

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTIC OF THE SURFACE LAYER OF SPECIMENS AFTER SURFACE AND MECHANICAL TREATMENT

Петренко Константин Петрович[1]
Petrenko K.P.
Малышкин Дмитрий Александрович[2]
Malyshkin D.A.

[1]ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]Филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 653049, Кемеровская область, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а
[1]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya str., Kemerovo, 650000
[2]Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Prokop'evsk town, 19a, Nogradskaya str., Kemerovo region, Prokop'evsk, 653049
e-mail: konst.petr@mail.ru

Аннотация: *Известно, что поверхностное пластическое деформирование (ППД) в существенной степени повышает качество и долговечность деталей машин. Эффективность процессов ППД значительно возрастает при учете явления технологического наследования (ТН). В работе представлено исследование шероховатости поверхности при обкатывании роликом. Полученные результаты позволили установить закономерности формирования шероховатости поверхности в зависимости от накопленной поверхностным слоем металла деформации.*

Ключевые слова: *Шероховатость поверхности, поверхностное пластическое деформирование, накопленная деформация, программа нагружения, поверхностный слой, технологическое наследование.*

Abstract: It is well known that roller burnishing process considerably increases surface quality and service life of machine parts. Performance of roller burnishing rises greatly when technological inheritance (TI) is taken into account. In this paper results of surface roughness research in processes of roller burnishing are presented. Results obtained made it possible to establish mechanisms of surface roughness forming depending on the degree of surface layer deformation.

Key words: Surface roughness, roller burnishing, degree of deformation, stressing program, surface layer, technological inheritance.

Введение

Шероховатость является одной из важнейших характеристик поверхностного слоя, влияющей на эксплуатационные свойства и долговечность деталей машин. При поверхностном пластическом деформировании (ППД) выступы микронеровностей

сминаются, и металл заполняет впадины между выступами. Гладкая поверхность после обработки ППД формируется за счет пластического течения металла и снижения шероховатости. Методы ППД за счет снижения шероховатости и формирования благоприятного профиля микронеровностей обработанной поверхности позволяют повысить износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление контактной усталости деталей и др.

В условиях современного машиностроительного производства важно количественно оценить накопление деформаций и формирование свойств поверхностного слоя с позиций технологического наследования (ТН). Исследования показали, что указанный подход возможен на основе механики технологического наследования [1].

Согласно ее основным положениям, в процессах обработки и эксплуатации деталей машин происходит непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя. В качестве основных параметров механического состояния используются накопленная степень деформации сдвига Λ, показатель напряженного состояния Π, степень исчерпания запаса пластичности Ψ. Внедрение и перемещение режущего или деформирующего инструмента (резца, ролика) приводит к возникновению очага деформации (ОД) – локальной области пластического течения в поверхностном слое (рисунок 1).

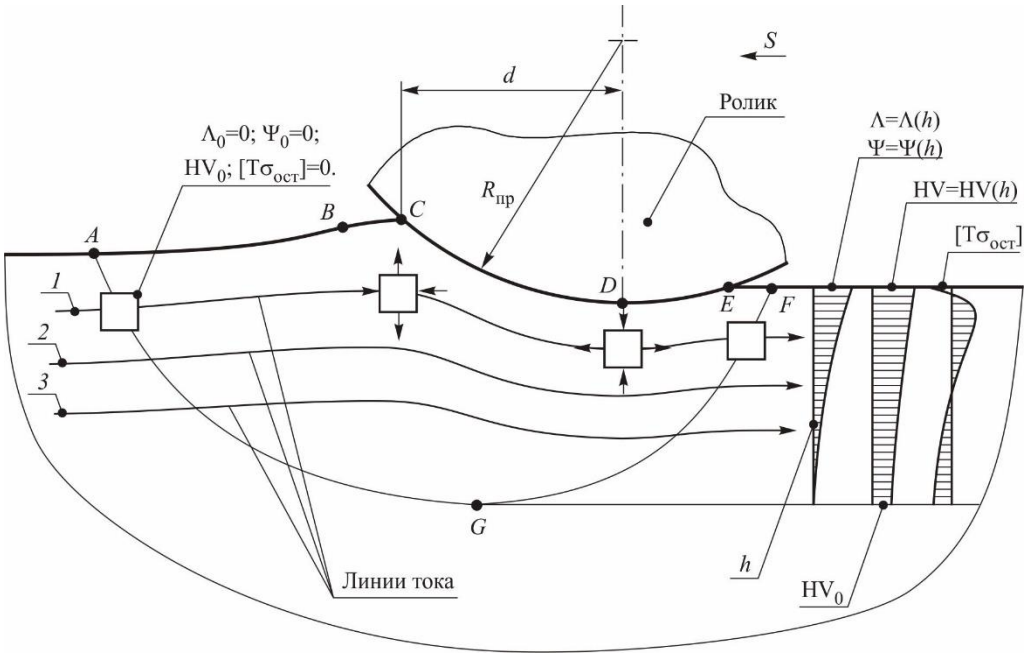


Рисунок 1 – Схема процесса ППД с характерными точками: S – подача; $R_{пр}$ – профильный радиус деформирующего инструмента (ролика)

В ОД вдоль линий тока происходит накопление деформации, исчерпание запаса пластичности и формирование свойств поверхностного слоя. При последующих операциях механической обработки накопление деформации происходит с учетом свойств поверхностного слоя, сформированных на предыдущих операциях.

Одним из главных элементов механики ТН является программа нагружения (ПН), которая представляет собой зависимость накопленной степени деформации сдвига Λ от показателя напряженного состояния Π.

ПН состоит из трех участков квазимонотонной деформации, на каждом из которых происходит непрерывное накопление деформации в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния. В точках смены знака деформации происходит частичное

залечивание дефектов и восстановление запаса пластичности металла. Программа нагружения описывает напряженно-деформированное состояние металла, определяется режимами обработки и формирует свойства поверхностного слоя. Под действием ПН в очаге деформации происходит исчерпание запаса пластичности, что приводит к определенному механизму формирования состояния поверхностного слоя.

Материалы и экспериментальные процедуры

С целью оценки влияния накопленной поверхностным слоем деформации на шероховатость поверхности были проведены экспериментальные исследования по обкатыванию роликами из стали ШХ 15 гладких цилиндрических образцов из стали 45. Сталь 45 является одной из самых распространенных материалов в машиностроении для изготовления изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, ее пластические и прочностные свойства хорошо изучены.

Для исследований использовались цилиндрические образцы диаметром 30 – 120 мм. На каждом образце имелось три шейки длиной 80 мм, отделенных друг от друга поперечными канавками, служащими для выхода инструмента и позволяющими выполнять исследование нескольких режимов на одном образце.

Установка образцов в передний и задний центры станка осуществлялась с помощью центровых отверстий. Поверхностный слой образцов последовательно обкатывался вплоть до полного исчерпания запаса пластичности и появления следов разрушения.

Режимы экспериментальных исследований приведены в таблице.

Таблица 1 – Условия проведения экспериментальных исследований

Номер образца	Количество рабочих ходов до разрушения металла	Режимы обкатывания				
		Диаметр ролика D_p, мм	Подача S, мм/об	Частота вращения шпинделя n, об/мин	Профильный радиус ролика $R_{пр}$, мм	Усилие обкатывания P, Н
51	3	95	0,07	630	2,5	2500
52	4				5,0	
54	3	64			8,5	2000
56	4				5,0	1500

Результаты и обсуждение

Определение размеров полученных очагов деформации производилось на профилографе-профилометре «Talysurf 5M». Геометрические параметры ОД использовались в качестве граничных условий при моделировании методом конечных элементов (МКЭ) [2]. Для этого создавались конечно-элементные модели ролика и обрабатываемой детали.

Нижняя граница детали жестко закреплялась, в нее внедрялся абсолютно жесткий индентор и перемещался на величину подачи в горизонтальном направлении. В вертикальном направлении перемещение отсутствовало. При этом принималась схема плоского деформированного состояния в плоскости подачи ролика. Начальными условиями моделирования являлись модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность обрабатываемого материала, коэффициент трения на контактной поверхности ролика и заготовки, а также кривая течения материала.

В рамках описанной модели осуществлялся расчет параметров напряженно-деформированного состояния в узлах конечных элементов с помощью специальной

программной системы [3]. Далее производился их перерасчет в точках линий тока, определялись интегральные показатели механического состояния и программы нагружения.

Шероховатость поверхности определялась по профилограмме поверхности с помощью профилографа-профилометра «Talysurf 5M». Формировался массив координат точек профилограммы, координаты пересчитывались в реальные путем деления соответственно на горизонтальное и вертикальное увеличение. Далее по методу наименьших квадратов определялось положение средней линии, после чего оценивались отклонения точек профиля от средней линии. Затем рассчитывался параметр *Ra* – среднее арифметическое отклонений точек профиля от средней линии и параметр t_{50} – относительная опорная длина профиля для уровня сечения профиля 50 %. Анализ показал, что зависимость среднего арифметического отклонения профиля от накопленной деформации носит экстремальный характер и может быть описана многочленом третьей степени.

Для очагов деформации образцов №№ 54 и 56 (рисунок 2):

$$\mathrm{Ra} = -4{,}446\Lambda^3 + 7{,}401\Lambda^2 - 3{,}604\Lambda + 0{,}606 \quad (1)$$

Для очагов деформации образцов №№ 51 и 52 (рисунок 3):

$$\mathrm{Ra} = 1{,}884\Lambda^3 - 2{,}44\Lambda^2 + 0{,}333\Lambda + 0{,}599 \quad (2)$$

Зависимость t_{50} от степени деформации сдвига для всех очагов деформации выражается в виде (рис. 4):

$$t_p = -131{,}33\Lambda^3 + 193{,}242\Lambda^2 - 9{,}341\Lambda + 10{,}043 \quad (3)$$

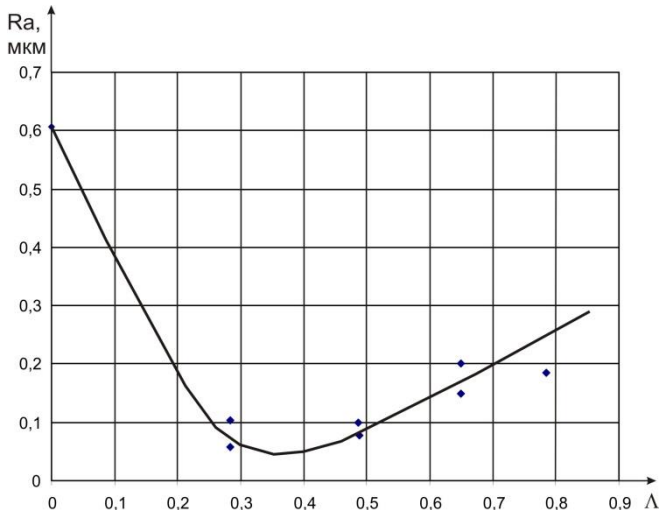


Рисунок 2 – Зависимость среднего арифметического отклонения профиля *Ra* от накопленной степени деформации сдвига для образцов №54 и №56

В ОД с незначительным пластическим течением (№ 54 и № 56) минимальное значение шероховатости (0,05 мкм) достигается при Λ= 0,35, в очагах деформации с интенсивным пластическим течением (№ 51 и № 52) минимум (0,27 мкм) приходится на Λ= 0,81. При этом само значение параметра *Ra* больше. Эти обстоятельства объясняются сложным характером формирования микрорельефа поверхности при ППД: шероховатость поверхности определяется не только накопленной деформации, но и кинетикой деформирования. С увеличением накопленной степени деформации сдвига относительная опорная длина профиля возрастает, достигает максимума при Λ=0,94, и затем, при дальнейшем увеличении степени деформации сдвига, уменьшается.

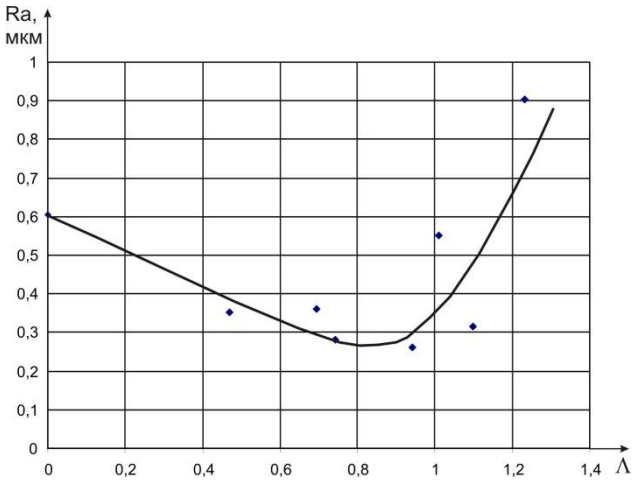


Рисунок 3 – Зависимость среднего арифметического отклонения профиля *Ra* от накопленной степени деформации сдвига для образцов №51 и №52

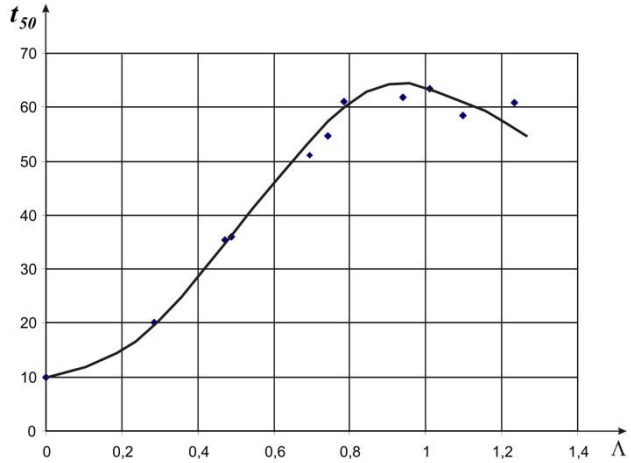


Рисунок 4 – Зависимость относительной опорной длины профиля t_{50} от степени деформации сдвига для всех образцов

Выводы

1. В ходе проведения экспериментальных исследований по обкатыванию роликами цилиндрических образцов из стали 45 профили наследственных ОД были использованы в качестве граничных условий при моделировании методом конечных элементов.

2. Рассчитаны параметры напряженно-деформированного состояния, накопленная степень деформации сдвига, программы нагружения, среднее арифметическое отклонения профиля и относительная опорная длина профиля.

3. Установлено, что в ОД с малым пластическим течением минимальное значение параметра *Ra* достигается при относительно небольших значениях накопленной степени деформации сдвига. В очагах с интенсивным пластическим течением минимальное значение *Ra* формируется при больших значениях накопленной степени деформации сдвига.

4. Относительная опорная длина профиля не зависит от интенсивности пластического течения в ОД и определяется накопленной поверхностным слоем деформацией.

Список литературы

1. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

2. Петренко К. П. Определение параметров наследственных очагов деформации в процессах резания и поверхностного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия, 2012. – № 6. С. 3 – 7.

3. Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А. Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610758. Заявка № 2002610463, дата поступления 29 марта 2002 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2002 г.

СЕКЦИЯ 2
ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭК, ИННОВАЦИИ В СВАРКЕ/НАПЛАВКЕ И УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

SECTION 2
THE RESTORATION OF THE EQUIPMENT OF TEK, INNOVATIONS IN WELDING/CLADDING AND HARDENING TECHNOLOGIES, FUNCTIONAL COATINGS

ВЛИЯНИЕ НИОБИЯ НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ АЛИТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНЕ

INFLUENCE OF NIOBIUM ON THE HEAT RESISTANCE OF ALUMINIZED COATINGS ON TITANIUM

Ковтунов Александр Иванович[1]
Kovtunov A.I.
Хохлов Юрий Юрьевич[1]
Khokhlov Y.Y.
Никитин Дмитрий Николаевич[1]
Nikitin D.N.

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет»
445020, г. Тольятти, ул.Белорусская, 14
[1] Togliatti State University
14, Belorusskaya St., Togliatti, 445020, Russia
e-mail: akovtunov@rambler.ru, y.y.khokhlov@rambler.ru

Аннотация: *Проведены исследования влияния легирования ниобием на жаростойкость титановых образцов алитированных в жидкометаллических расплавах А7 и АК12. Показано, что легирование ниобием и совместное легирование ниобием и кремнием значительно повышает жаростойкость покрытий на основе алюминидов титана.*

Ключевые слова: *Титан, алюминиевый расплав, алитирование, интерметаллидная фаза, ниобий, жаростойкость, силумин, скорость окисления.*

Abstract: The influence of alloying with niobium on the heat resistance of titanium samples aluminized in A7 and AK12 liquid metal melts has been studied. It is shown that doping with niobium and joint doping with niobium and silicon significantly increases the heat resistance of coatings based on titanium aluminides.

Key words: Titanium, aluminum melt, aluminizing, intermetallic phase, niobium, heat resistance, silumin, oxidation rate.

Введение

Титан и титановые сплавы широко применяются в промышленности благодаря малой плотности, высокой удельной прочности, необычно высокой коррозионной стойкости [1-3]. Однако жаростойкость титана и большинства титановых сплавов ограничена температурой 600 ºС. Для повышения жаростойкости для титановых сплавов широко применяются защитные покрытия на основе алюминидов титана[4,5].

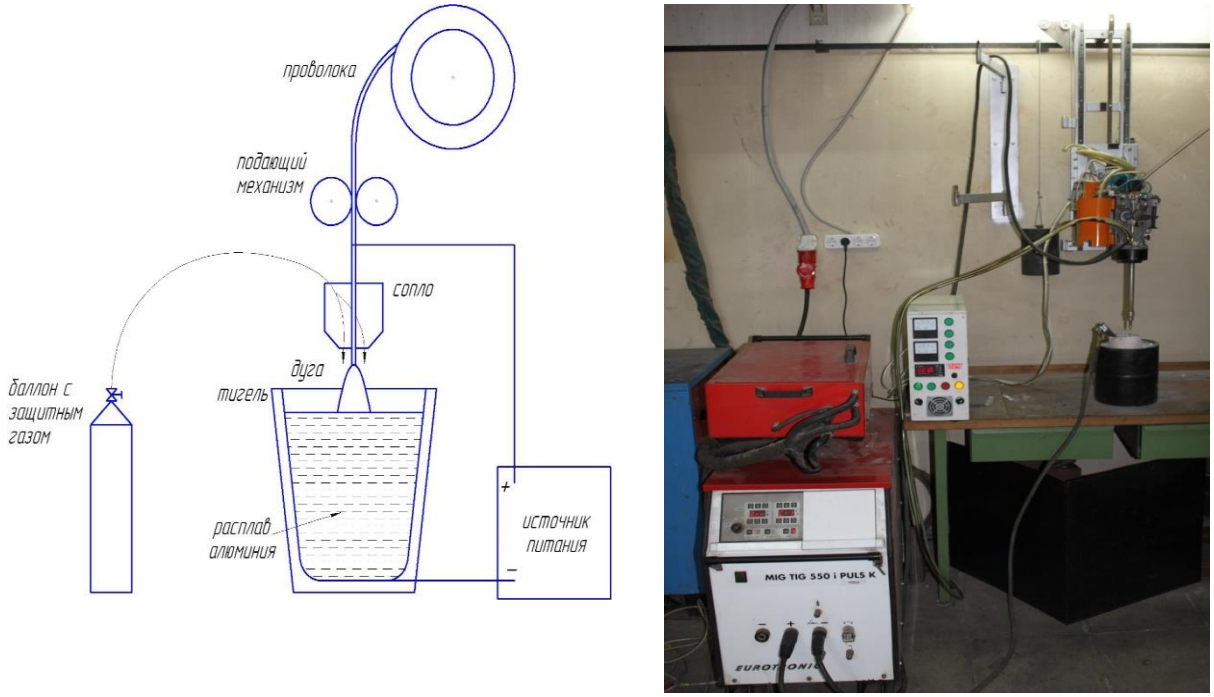
Наиболее простым, универсальным и производительным способом формирования жаростойких покрытий является алитирование в жидком алюминиевом расплаве [6,7]. При жидкофазном алитировании с последующим диффузионным отжигом на поверхности титана формируется многослойное жаростойкое покрытие на основе алюминидных фаз: Ti_3Al; TiAl; $TiAl_2$; $TiAl_3$ [7].

Однако жаростойкость алитированных покрытий на титане весьма ограничена и может быть повышена легированием алюминидов титана. В качестве легирующих элементов для повышения жаростойкости алюминидных покрытий весьма перспективно применение ниобия или ниобия с кремнием [8,9].

Целью работы является исследование влияния ниобия на жаростойкость титана с покрытием на основе алюминидов титана, полученными жидкофазным способом.

Материалы и экспериментальные процедуры

Алитирование титана марки ВТ 1-0 ГОСТ 22178-76 толщиной 1 мм проводилось жидкофазным способом в расплавах алюминия марки А7 ГОСТ 11069-01 и сплава АК12, легированных ниобием в количестве 1,5% и 3% при температурах расплава 850 - 900ºС. Плавку вели в лабораторной печи сопротивления в графитовом тигле под слоем защитного флюса. Ниобий вводили в алюминиевый расплав при помощи дугового переплава ниобиевой проволоки в среде аргона на зеркале алюминиевого расплава (рис.2) [10].



а) б)

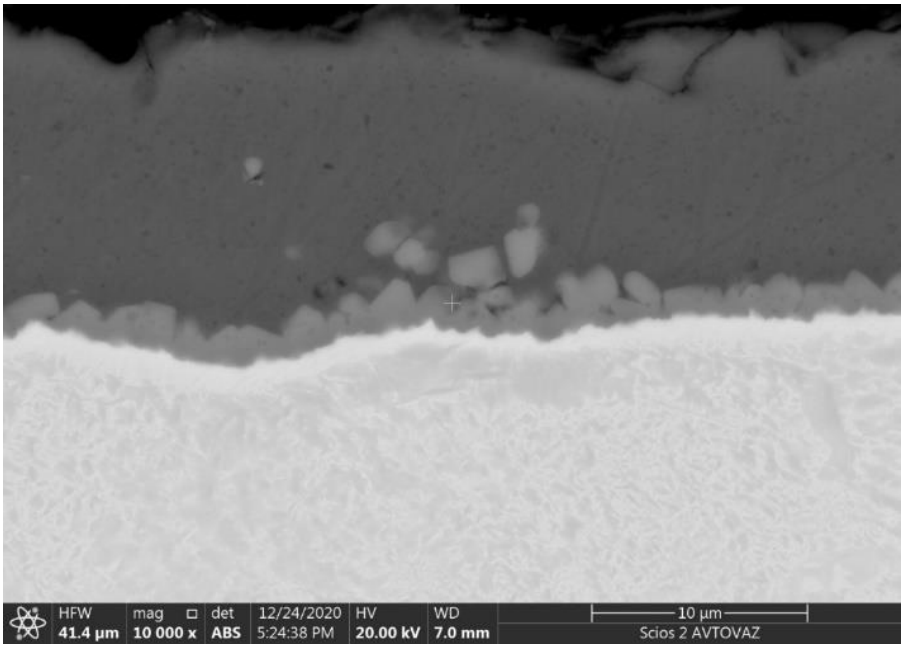
Рисунок 1 – Схема процесса (а), установка для получения алюминиевых лигатур (б) при использовании легирующего компонента в виде плавящегося электрода (проволоки)

Образцы титана размером 50х25мм предварительно травили в растворе, состоящем из 20-30 мл HNO_3, 30-40 мл HCl на 1 л воды [11]. Для получения адгезионной связи между алюминием и титаном при алитировании поверхность образцов активировали флюсом на основе системы $KF\text{-}AlF_3$ эвтектической концентрации (флюс Nocoloc) [12]. Время выдержки образцов в алюминиевом расплаве составляло 5-10сек.

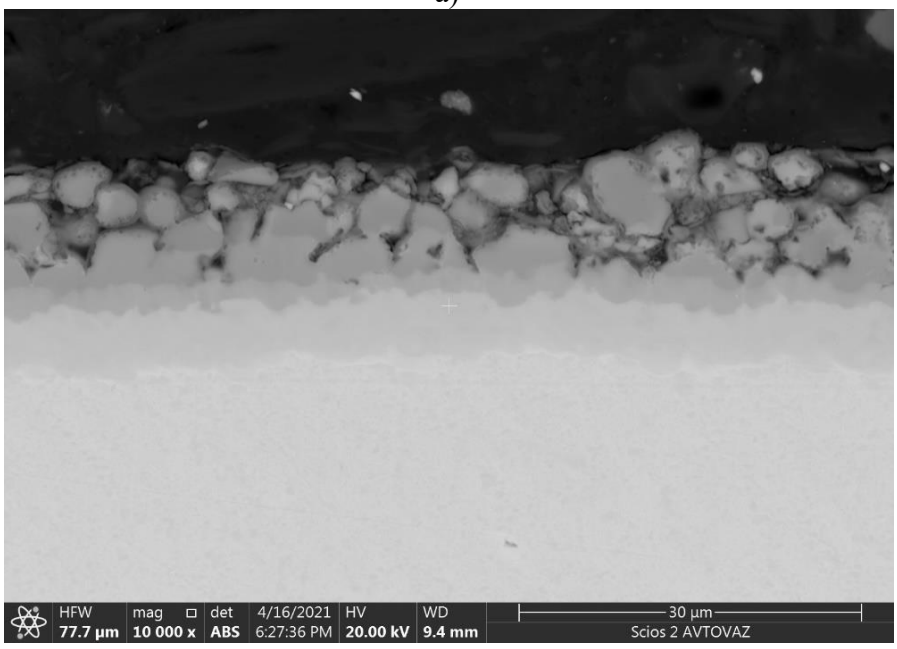
Жаростойкость алитированных образцов оценивали по увеличению их веса при выдержке в атмосфере печи сопротивления в течении 5, 25, 50, 75 часов при температуре 950 ºС. Жаростойкость алитированных образцов сравнивалась с жаростойкостью образцов титана марки ВТ 1-0, испытываемых одновременно с алитированными.

Результаты и обсуждение

При жидкофазном алитировании в расплаве А7 и АК12 на поверхности титана формируется алюминиевый слой, а между алюминием и титаном переходный интерметаллидный алитированный слой (рисунок 2а). При последующей высокотемпературной выдержки в результате взаимной диффузии титана и алюминия формируется многослойное покрытие на основе алюминидов, алюминидов и силицидов титана, легированных ниобием, которое и обеспечивает высокую жаростойкость образцов [7] (рисунок 2б).



а)



б)

Рисунок 2 – Структура покрытия на титановых образцах: а) после алитирования в алюминиевом расплаве А7; б) после алитирования с диффузионным отжигом

Потеря массы образцов при испытаниях жаростойкости определялась химическим составом алитированной ванны и, следовательно, химическим составом покрытий, а также временем выдержки (рисунок 3).

Изменение массы при испытаниях при 950°С составляла для образцов алитированных в А7 около 400 г/м^2, для образцов алитированных в расплаве АК12 -130 г/м^2, а для неалитированных около 1500 г/м^2 (рисунок 3). Наличие покрытия на основе алюминидов титана при алитировании в расплаве А7 и алюминидов и силицидов титана при легировании в расплаве силумина обеспечивало высокую жаростойкость титановых образцов

Легирование ниобием расплава при алитировании позволило значительно уменьшить увеличение массы образцов по сравнению с алитированием в чистом алюминии. Увеличение концентрации ниобия так же способствовало повышению жаростойкости алитированных образцов. Совместное легирование алюминидов титана кремнием и ниобием еще в большей степени повысило жаростойкость покрытий. Изменение массы образцов алитированных в легированном расплаве А7+ 3%Nb при выдержке в течение 75 часов составила не более 112 г/м^2, а в расплаве АК12 + 3%Nb не более 80 г/м^2 (рисунок 3).

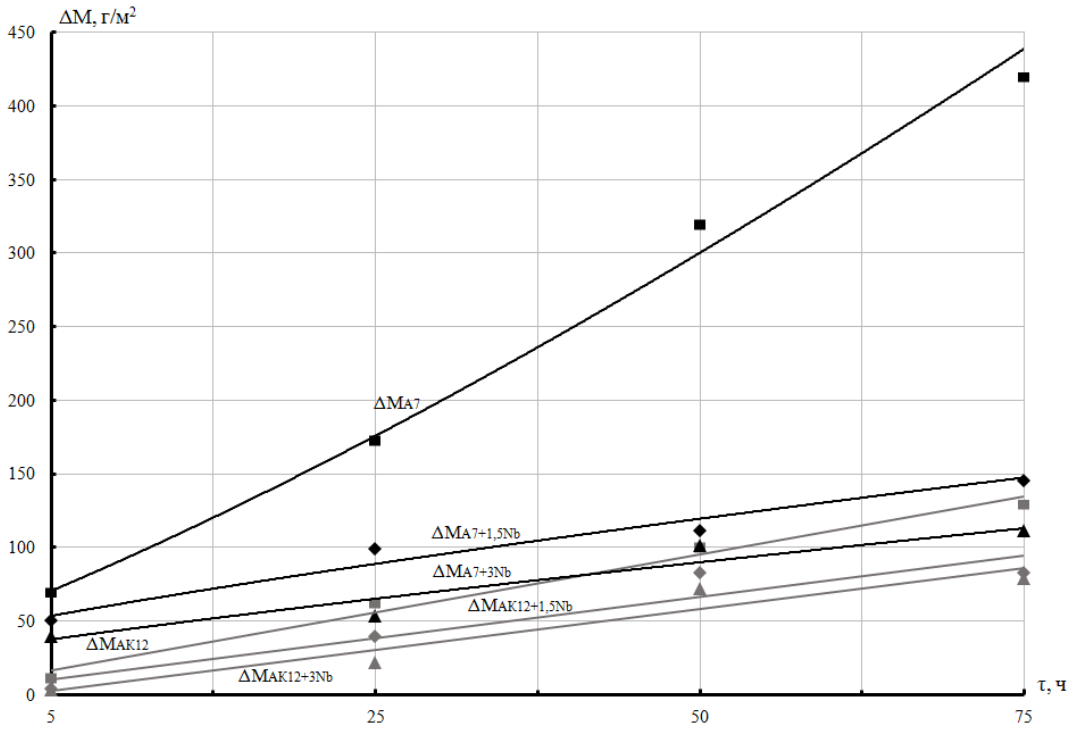


Рисунок 3 – Зависимость изменения массы при испытаниях жаростойкости при 950°С алитированных титановых образцов от времени выдержки

Скорость окисления неалитированных образцов из титана ВТ1-0 в процессе испытаний при 950°С уменьшалась с 87 до 19 г/(м^{2}ч), а алитированных в расплаве А7 (ΔV_{A7}) с 12,8 до 5,6 г/(м^{2}ч) (рисунок 4). Легирование ниобием алюминиевого расплава обеспечило значительное снижение скорости окисления. При концентрации ниобия 1,5% скорость окисления ($\Delta V_{A7+1,5Nb}$) изменялась при испытаниях с 10 до 2 г/(м^{2}ч), а при содержании ниобия 3% (ΔV_{A7+3Nb}) уменьшалась с 8 до 1,5 г/(м^{2}ч) (рисунок 4).

Алитирование в расплаве силумина АК12 значительно снижает скорость окисления образцов. В ходе испытаний значение скорости окисления при этом изменяются не так значительно, как при испытаниях образцов алитированных в расплаве А7. Легирование

расплава силумина ниобием позволили снизить скорость окисления поверхности образцов в 2-3 раза в зависимости от содержания легирующего элемента (рисунок 4).

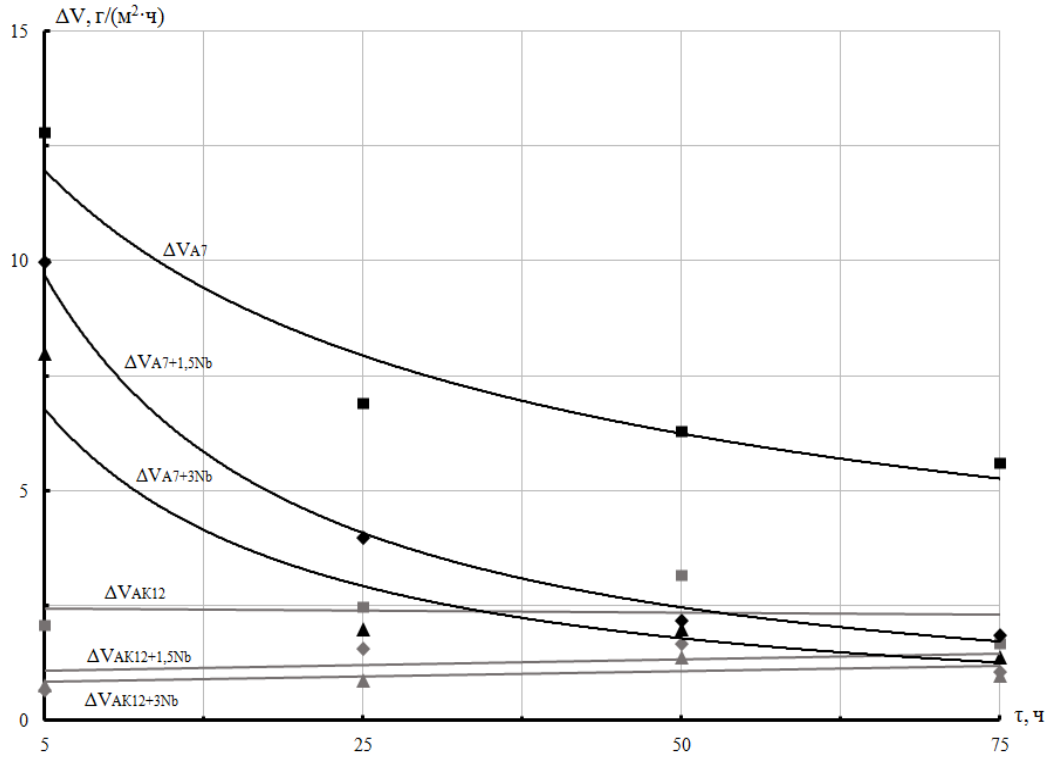


Рисунок 4 – Зависимость скорости окисления образцов от времени выдержки

Выводы

Испытания жаростойкости при 950°С в течение 75 часов показало, что легирование ниобием при жидкофазном алитировании титана в алюминиевых расплавах марки А7 и АК12 позволяет в 1,5-6 раз уменьшить увеличение массы образцов. Скорость окисления при этом снижается в 1,5-4 раза в зависимости от химического состава жидкометаллического расплава для алитирования.

Список литературы

1. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов/ Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 2005 – 432 с.
2. Титановые сплавы для автомобилестроения. Ю.Б.Егорова.
3. Полькин И.С., Гребенюк О.Н., Саленко В.С. Интерметаллиды на основе титана. Технология легких славовю №2 .-2010г. С. 5-15.
4. Пячин С.А. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана/ С.А.Пячин, А.А.Бурков, В.С.Комарова // Поверхностные, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013, №6, с.16-24.
5. Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И. Исследование структуры и свойств наплавленных интерметаллидных сплавов на основе титана// Материаловедение. 2021. № 5. С. 13-18.
6. Ильин В.А., Панарин А.В. Алюминиевые покрытия и способы их получения// Авиационные материалы и технологии.2014. №4. С.37-42.
7. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю. Структура покрытий при жидкофазном алитировании титана//Технология металлов. 2021. № 9. С. 22-26.

8. Даутов С.С. Деградация поверхности лопаток авиационных двигателей ГТД из интерметаллидного сплава TNM-B1 и разработка способов их защиты: дис. ... кандидата технических наук 05.07.05 / Даутов Станислав Сагитович. Уфа, 2017. - 135 с.

9. Yang M.-R., Wu S.-K. Oxidation Resistance Improvement of TiAl Intermetallics Using Surface Modification // Bulletin of the College of Engineering, 2003. Vol. 89. P. 3–19.

10. Ковтунов, А.И. Технология приготовления алюминиево-титановых лигатур/ А.И.Ковтунов, Ю.П.Чернышева, Ю.Ю.Хохлов//Литейщик России.-2010 №10.-С.29-30.

11. Шашкин О.В. Вакуумная контейнерная пайка титановых и титано - алюминиевых конструкций припоями на основе алюминия: дис. канд. тех. наук: (27.10.2006)/ Шашкин Олег Валентинович; ТГУ – Тольятти., 2006. – 164 с.

12. Ковтунов, А.И. Исследование процессов смачивания и растекания алюминия по титану при формировании композиционных материалов пеноалюминий–титан/ А.И.Ковтунов, Ю.Ю.Хохлов, С.В.Мямин // Цветные металлы.-2017 №6.-С.74-78.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА ПУТЕМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНО СОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОШОК ТИТАНА

IMPROVING THE RELIABILITY OF PARTS WORKING UNDER CONDITIONS OF INTENSE WEAR BY ARC SURFACING WITH FLUX-CORED WIRE ADDITIONALLY CONTAINING TITANIUM POWDER

Комаров Андрей Андреевич.[1]
Komarov A.A.
Киселев Павел Владимирович[1]
Kiselev P.V.
Козырев Николай Анатольевич[1]
Kozyrev N.A.
Михно Алексей Романович[1]
Mikhno A.R.
Усольцев Александр Александрович[1]
Usoltsev A.A.

[1] ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
[1] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Industrial University"
e-mail: torg_123@mail.ru

Аннотация: *На основе анализа опыта эксплуатации механизмов машин горношахтного оборудования в горнорудной промышленности показано, что в сложных условиях быстро развиваются процессы деградации поверхностных слоев контактирующих деталей. Это приводит к выводу из строя механизмов машин горношахтного оборудования. В работе рассмотрены некоторые структурные особенности наплавленного слоя и их связь с износостойкостью при проведении восстановительных работ.*

Ключевые слова: *наплавка; порошковая проволока; порошок титана; микроструктура; твердость, износостойкость.*

Abstract: Based on the analysis of the operating experience of the mechanisms of mining equipment machines in the mining industry, it is shown that in difficult conditions, the processes of degradation of the surface layers of contacting parts develop rapidly. This leads to the failure of the mechanisms of mining equipment machines. The paper considers some structural features of the deposited layer and their relationship with wear resistance during restoration work.

Key words: surfacing; flux cored wire; titanium powder; microstructure; hardness, wear resistance.

Введение

Механизмы машин горношахтного оборудования, испытывающие абразивное и ударное изнашивание при эксплуатации, преждевременно выходят из строя. Износ их

рабочих поверхностей вызывает необходимость в проведении восстановления. Поэтому разработка материалов для ремонтных работ, значительно повышающих износостойкость таких деталей и использование технологии их восстановления, является важной и актуальной задачей [1-3].

Важным вопросом при разработке нового наплавочного материала является выбор системы легирования сплава [4-6]. При выборе системы легирования следует учитывать условия работы детали, стоимость наплавочного материала, результаты испытания различных материалов в лабораторных и натурных условиях, а также характер и твердость различных фаз, их количество и т.д. Благодаря оптимально подобранному химическому составу порошковой проволоки и полученному при наплавке покрытию возможно получение наплавленного слоя, обладающего высокими значениями твёрдости, абразивной и ударно-абразивной износостойкости.

Наиболее перспективным для ремонтно восстановительных работ является использование наплавки порошковой проволокой на изнашивающиеся поверхности деталей [7-8]. Для этих целей в нашей стране и за рубежом ведётся разработка и изготовление специальных наплавочных порошковых проволок. Широкое распространение для наплавки абразивно-изнашивающихся изделий получили наплавочные проволоки систем Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo типа А и В по классификации МИС. В настоящее время порошковые проволоки такой системы фирмы DRATEC (Германия) марки DT-SG 600 F и порошковые проволоки фирмы ESAB марок OK Tubrodur 15.52, OK Tubrodur 58 O/G M широко используются для ремонтных работ на горно - шахтном оборудовании в нашей стране.

Данная работа продолжает исследования по разработке новых составов порошковых проволок используемых для наплавки изделий, работающих в условиях абразивного износа в горнорудной промышленности, в частности изучение влияния введения в порошковые проволоки углеродфторсодержащих компонентов, а также введения в состав порошка титана на степень износа и твердость наплавленного слоя.

Целью настоящей работы является исследование закономерности влияния введения в состав порошковых проволок для восстановительной наплавки изделий, работающих в условиях абразивного износа в горнорудной промышленности.

Материалы и экспериментальные процедуры

Изготовление новых составов порошковых проволок проводилось путем расчета и подготовки шихтовых материалов, их перемешивания, сушки в печи в течение 4-х часов и засыпки в бункер стана по производству порошковых проволок. В качестве шихтовых материалов использовались следующие порошковые материалы: углеродфторсодержащий материал – пыль газоочистки алюминиевого производства (в замен углерода аморфного) [9], порошок титана ПТС по ТУ 14-22-57-92, железный порошок ПЖВ-1 по ГОСТ 9849-86, никеля ПНК 1Л5 по ГОСТ 9722-97, хрома ПХ-1С по ТУ 14-1-1474-75, марганца МР-0 по ГОСТ 6008-82, кремния КР-1 по ГОСТ 2169-69. В качестве оболочки порошковой проволоки использовалась лента из Ст3. Диаметр получаемой порошковой проволоки составлял 5 мм.

Наплавка исследуемых образов выполнялась с использованием оборудования НПЦ «Сварочные процессы и технологии» на подложку из стали 09Г2С методом автоматической наплавки под слоем флюса на следую режимах: сила тока 500А, напряжение 28В, скорость наплавки 15 см/мин. В качестве флюса использовался ранее разработанный флюс, изготовленный из техногенного сырья производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода, флюс марки НФП по ТУ 20.59.56.120-001-14796818-2020 [10].

Исследование химического состава исследуемых наплавленных слоев проводили с использованием оборудования центра коллективного пользования «Материаловедение»

рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС -71.

Металлографические исследования наплавленных слоев проводилось с использование металлографического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от ×100 до ×1000 с использованием пакета прикладных программ для металлографических исследований Siams Photolab 700. Оценка уровня загрязненности неметаллическими включениями проводилась по ГОСТ 1778-70. Подготовка к исследованиям микроструктуры наплавленного слоя проводилось путем химического травления полированных образцов 4-х % раствором азотной кислоты. Величину зерна и характеристики структур определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении ×100 и по ГОСТ 8233-56 при увеличении ×1000 методом сравнения с эталонными шкалами.

Измерение твердости наплавленных слоев выполняли по методам Бринелля и Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59 и ГОСТ 9013-59.

Трибологические испытания проводились на испытательной машине 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка по режиму: нагрузка 30 мА (78,4Н), частота 20 об/мин. в течение 4-х часов.

Результаты и обсуждение

Результат исследования химического состава наплавленных образцов порошковыми проволоками представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав наплавленного слоя

№ образца	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Nb	S	P
1T	0,18	0,38	1,10	2,40	0,05	0,05	0,005	0,006	0,06	0,028	0,001	0,094	0,013
2T	0,15	0,36	1,01	2,25	0,04	0,06	0,005	0,004	0,04	0,021	0,002	0,089	0,012
3T	0,35	0,29	0,96	2,65	0,04	0,06	0,017	0,004	0,05	0,020	0,002	0,101	0,015
4T	0,38	0,65	1,40	2,45	0,05	0,06	0,053	0,005	0,06	0,011	0,003	0,085	0,014
5T	0,41	0,79	1,50	2,23	0,05	0,06	0,075	0,002	0,04	0,017	0,003	0,077	0,015

Коэффициент извлечения титана составил 6,2-8,6%. Результаты проведения испытаний наплавленного слоя на твердость и износ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты проведения испытаний на твердость и износ

№ образца	Твердость HRC (Среднее значение)	Твердость НВ (Среднее значение)	Интенсивность изнашивания, г/об
1T	35,61	348,32	$7{,}8 \cdot 10^{-5}$
2T	37,16	310,16	$10{,}2 \cdot 10^{-5}$
3T	42,46	391,4	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$
4T	52,73	531,7	$3{,}4 \cdot 10^{-5}$
5T	53,11	555,94	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$

Исследование образцов наплавленного слоя на загрязненность неметаллическими включениями показало, что в образцах преимущественно наблюдаются оксиды точечные балл 1а, 2а, представляющие собой включения в виде отдельных частиц, а также во всех исследуемых образцах присутствуют силикаты недеформирующиеся в виде отдельных включений балла 1а, 2а.

Таблица 3 – Неметаллические включения наплавленных образцов

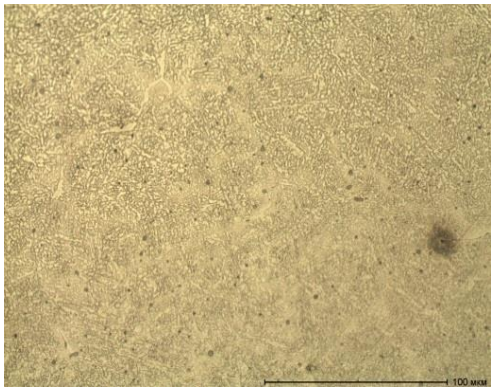
№ образца	Загрязненность неметаллическими включениями, балл	
	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
1Т	1а	1а
2Т	1а, 2а	1а
3Т	1а, 2а	1а, 2а
4Т	1а, 2а	1а, 2а
5Т	1а, 2а	1а

Установлено, что повышение содержания титана в составе порошковой проволоки при одинаковом содержания остальных химических элементов в составе наплавленного слоя незначительно влияет на степень загрязненности неметаллическими включениями.

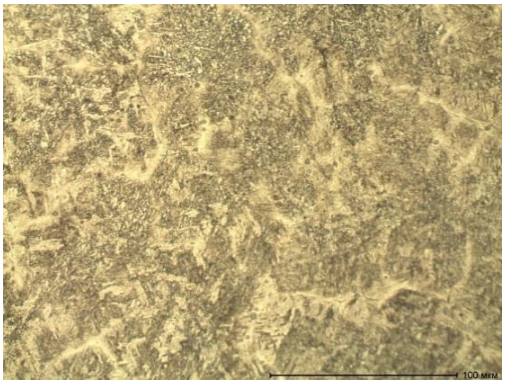
Для всех исследуемых образцов отмечена незначительная загрязненность неметаллическими включениями, не оказывающая негативное влияние на свойства наплавленного слоя и допустима для использования исследуемой порошковой проволоки.

Микроструктура наплавленного металла (рис. 1.) имеет в основном дендритное строение и представляет собой мелкоигольчатый и среднеигольчатый мартенсит (балл 3-7) с размером игл (3 – 7) мкм, сформировавшийся внутри границ бывшего зерна аустенита, небольшое количество аустенита остаточного в виде отдельных участков и тонкие прослойки δ-феррита.

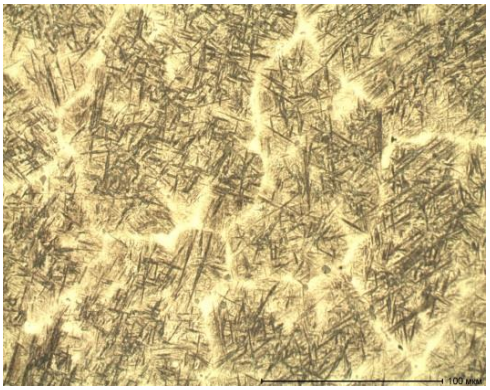
а



б



в



г

д

Рисунок 1 – Микроструктура наплавленного металла в зависимости от содержания титана в порошковой проволоке, ×500.
а – образец 1Т, б – образец 2Т, в – образец 3Т, г – образец 4Т, д – образец 5Т

Регрессионные модели, описывающие влияние концентрации массовой доли химических элементов, входящих в наплавленный слой металла на степень износа и твердость наплавленного слоя:

- скорость износа (г/об·10-5): 0,000257+0,003031·C+ 0,006191·Si - 0,00265·Mn - 0,03179·Ti (ошибка аппроксимации составляет 0,00012%);
- HRC = 47,4078+1344,28·C+2358,56·Si-989,44·Mn-12327,4·Ti (ошибка аппроксимации составляет 0,00011%).

Выводы

1. Полученные результаты исследования влияния введения в состав порошковых проволок порошка титана указывают на небольшое изменение микроструктуры наплавленного слоя, снижается размер игл мартенсита и величина зерна.
2. Увеличение содержания в наплавленном слое титана способствует увеличению твердости и снижению степени износа исследуемых образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания: 0809-2021-0013

Список литературы

1. D.B. Slinko, R.Yu.Solovev, A.B.Kaveshnik. Experience in the use of plasmapowder surfacing in the reduction of the semi-axes stages subway escalators. Trudy GOSNITI – Moscow . 2015 Vol. 121. p. 243 – 249.
2. Дураков В.Г., Гнюсов С.Ф., Дампилон Б.В., Дехонова С.З. Влияние технологических параметров электронно-лучевой наплавки на структуру медно-хромовых композитов // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 80–86.
3. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF / A. I. Gusev, N. V. Kibko, N. A. Kozyrev, M. V. Popova, I. V. Osetkovsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1–7 (012033).
4. Особенности фазового состава и строение слоев на основе диборида TiB2, сформированных в поверхностных слоях углеродистых сталей при воздействии интенсивных электронных пучков в вакууме / З.М. Халтаров, А.С. Милонов, Н.Н. Смирнягина, В.М. Халтанова // ВЕСТНИК БУРЯТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА. – 2011. – С. 203-209.

5. Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Осетковский И.В. Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 10. С. 6–10

6. Громов В.Е., Капралов Е.В., Райков С.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками // Успехи физики металлов. – 2014. – Т.15. – С. 211–232.

7. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Райков С.В., Иванов Ю.Ф. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали // Наноинженерия. – 2015. – №4(46). – С. 14–23.

8. Влияние введения вольфрама и хрома на свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co / А. И. Гусев, Н. А. Козырев, Н. В. Кибко, Р. Е. Крюков, И. В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении (Литейное и сварочное производства). – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 56–60.

9. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Наноструктурные состояния и свойства наплавки, сформированной на стали порошковой проволокой // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т.58, №4. – С. 39–45.

10. Влияние введения в шихту для производства порошковой проволоки системы C-Si-Mn-Cr-V-Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля / Н. А. Козырев, Д. А. Титов, С. Н. Старовацкая, О. Е. Козырева, В. М. Шурупов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 4. – С. 34–37.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРОЧНОГО ФЛЮСА ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

STUDIES OF THE WELDING FLUX MADE FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALS OF METALLURGICAL PRODUCTION DURING THE REPAIR AND RESTORATION WORK OF METALLURGICAL EQUIPMENT

Михно Алексей Романович[1]
Mikhno A.R.
Козырев Николай Анатольевич[1]
Kozyrev N.A.
Усольцев Александр Александрович[1]
Usoltsev A.A.
Жуков Андрей Владимирович[1]
Zhukov A.V.

[1]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Industrial University"
e-mail: mikno-mm131@mail.ru

Аннотация: *В работе представлены результаты исследования сварочного флюса, изготовленного из шлака от производства ферросиликомарганца и флюса марки АН-148А при проведении ремонтное восстановительных работ деталей металлургического оборудования путем наплавки порошковой проволокой ПП-Нп-35В9Х3СФ.*

Ключевые слова: *наплавка; порошковая проволока; сварочный флюс; шлак силикомарганца; АН-348А; микроструктура; неметаллические включения; твердость; износостойкость.*

Abstract: The paper presents the results of a study of welding flux made from slag from the production of ferrosilicomanganese and flux brand AN-148A during repair and restoration work of parts of metallurgical equipment by surfacing with flux-cored wire PP-Np-35V9X3SF.

Key words: hardfacing; flux-cored wire; welding flux; silicomanganese slag; AN-348A; microstructure; non-metallic inclusions; hardness; wear resistance.

Введение

Прокат металла – это очень сложная и энергозатратная операция. Для обжатия материала, достижения определённых размеров обрабатываемого профиля используются прокатные валки. Валки в процессе своей работы берут на себя внушительное усилие, которое возникает непосредственно в процессе работы всей прокатной линии. Именно поэтому прокатный валок – наиболее изнашивающаяся часть любого прокатного стана [1-4]. Вопрос восстановления прокатных валков является очень актуальным [5-10], и он требует постоянного развития технологии его проведения. Ремонт и наплавка поверхности

бочки прокатного валка является очень трудоемким процессом, на который затрачивается довольно большой временной ресурс, поэтому появление новых материалов [11-13], усовершенствование имеющихся технологий восстановления, а также поддержка работоспособности валков является одной из самых значимых задач в прокатном производстве.

Целью данной работы является исследование новых материалов применяемых для восстановления прокатных валков в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также исследование свойств наплавленного металла порошковой проволокой 35В9Х3СФ под разработанным флюсом на основе шлака силикомарганца [14-15] и флюса марки АН-148А.

Материалы и экспериментальные процедуры

Для проведения исследования были предоставлены образцы проволоки марки 35В9Х3СФ диаметром 3,6 мм. Изготовленные ООО «ОФЗ Новокузнецк» с сертификатом качества представленным в таблица 1.

Таблица 1 – Данные сертификата качества.

Условное обозначение продукции						Марка оболочки			Коэффициент заполнения, %	Твердость HRC
ПП-Нп-35В9Х3СФ						08Ю 0,6×14				
Химический состав наплавленного металла, %										
C	Cr	Si	Mn	W	V	P	S	Mo	41	48÷52
0,362	3,10	0,61	0,06	7,4	0,092	0,014	0,013	≤0,05		

Первые опыты по наплавке образцов производилась под флюсом марки АН-348А и флюсом на основе обогащённого шлакового щебня производства силикомарганца с химическим составом, представленным в таблице 2. Маркировка исследуемых образцов по используемому флюсу: АН-348А - 1.1, Шлак SiMn - 1.2.

Таблица 2 – Химический состав используемого флюса

Массовая доля элементов, %													
Флюс	**FeO**	**MnO**	**CaO**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**MgO**	**S**	**P**	**ZnO**	**C**	**F**	**TiO_2**	**Cr_2O_3**
АН-348А	2,38	4,81	15,25	22,41	13,99	23,58	0,041	0,031	0,012	0,020	10,46	2,56	0,14
Шлак SiMn	0,50	15,95	28,15	41,07	6,95	1,78	0,21	0,02	0,011	0,029	0,21	0,16	0,049

Режим наплавки образцов выбран исходя из ранее используемого режима наплавки: сила тока 410А, напряжение 29В, скорость наплавки 30 см/мин.

После наплавки образцов изучался химический состав наплавленного слоя, проводились металлографические исследования, осуществлялся замер твердости наплавленного слоя, проводились механические испытания на потерю массы образца при трении металл-металл, а также статистическая обработка полученных данных.

Результаты и обсуждение

Химический состав полученных образцов представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав наплавленного металла

Используемый флюс	**Массовая доля элементов, %**												
	C	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**Cu**	**Ti**	**W**	**V**	**Mo**	**Al**	**Nb**	**S**	**P**
АН-348А	0,34	0,76	1,75	4,04	0,07	0,09	0,016	9,62	0,10	0,28	0,063	0,05	0,014	0,018
Шлак SiMn	0,38	0,79	1,78	3,94	0,07	0,08	0,005	9,40	0,09	0,32	0,025	0,05	0,04	0,013

Как видно из таблицы 3 усвоение основных элементов находится примерно на одном уровне и более высокого угара основных элементов под исследуемым флюсом не наблюдается, при этом отмечается повышенное содержание серы и пониженное фосфора.

Измерение твердости наплавленного слоя (таблица 4) исследуемых образцов выполняли по методу Бринелля с помощью ультразвукового твердомера УЗИТ–3 в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59.

Механические испытания на потерю массы образца при трении металл-металл, наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1. Результаты износостойкости исследуемых образцов представлены в таблице 5. Пониженные значения твердости и износостойкости под исследуемым флюсом могут быть связаны с несколько более низкими значениями вольфрама и хрома в наплавленном слое.

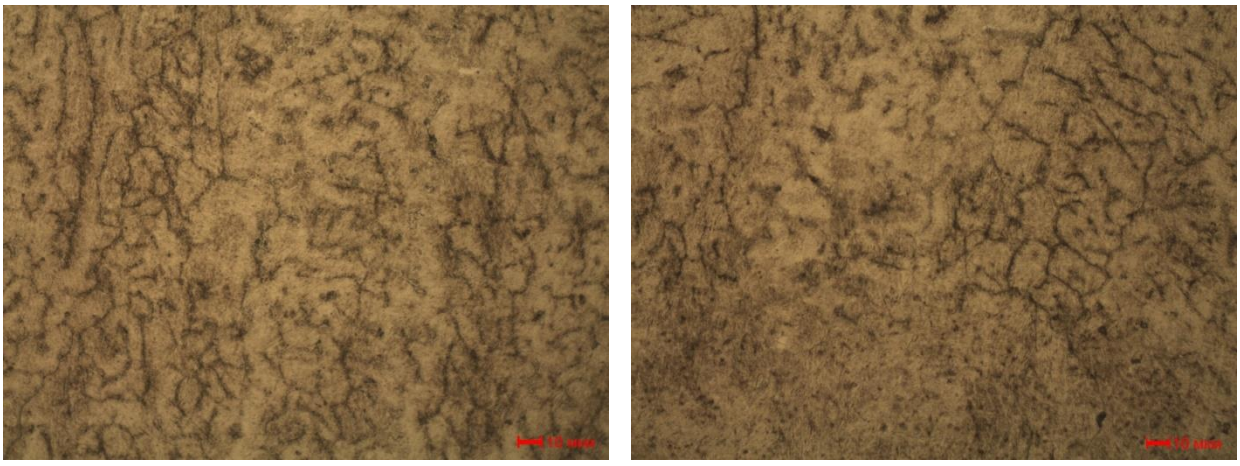
Таблица 4 –Твердость наплавленного слоя исследуемых образцов

Используемый флюс	**Твердость НВ**										**Твердость HRC**				
АН-348А	614	535	475	576	610	614	553	523	518	596	52,4	49,4	53,7	52,4	50,5
Шлак SiMn	527	530	544	601	588	632	475	572	616	555	51,7	54,2	47,4	51,3	51,4

Таблица 5 – Основные показатели твердости и износостойкости исследуемых образцов

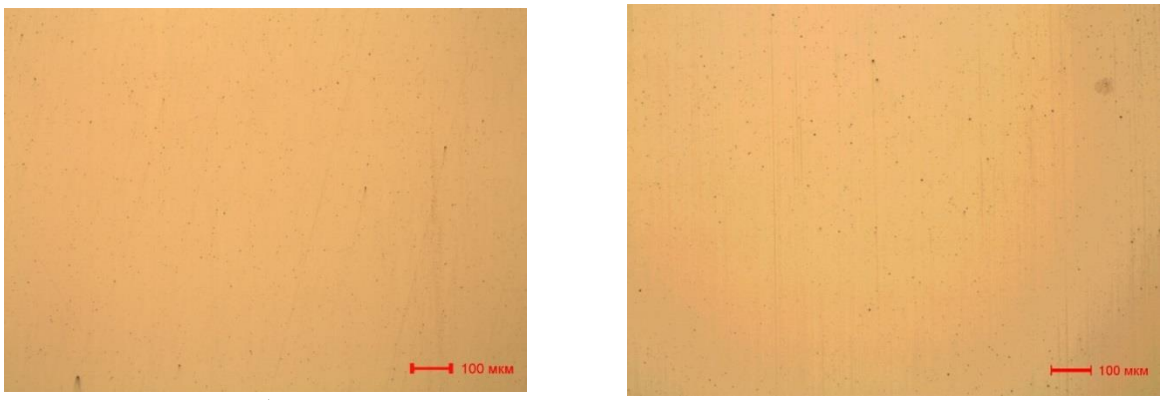
Используемый флюс	**Пределы твердости по НВ**	**Пределы твердости по HRC**	**Средняя твердость НВ**	**Средняя твердость HRC**	**Износ гр/оборот**
АН-348А	475-614	49,4-53,7	515	51,7	1,24273E-05
Шлак SiMn	475-632	47,4-54,2	517	51,2	1,40295E-05

Металлографические исследования полированных микрошлифов проводились с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от ×100 до ×1000. Микроструктуру (рисунок 1) выявляли путем травления образцов в растворе 4 % HNO_3 в этиловом спирте. Исследование образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений (рисунок 2, таблица 6) проводили по ГОСТ 1778-70. Полированную поверхность изучали при увеличении ×100.



а) б)

Рисунок 1 – Структура наплавленных образцов, ×500
а – образец, наплавленный с использованием флюса АН-348А; б – образец, наплавленный с использованием флюса на основе шлака силикомарганца



а) б)

Рисунок 2 – Неметаллические включения в наплавленном слое, ×100
а – образец, наплавленный с использованием флюса АН-348А; б – образец, наплавленный с использованием флюса на основе шлака силикомарганца

Таблица 6 – Оценка неметаллических включений в наплавленном слое

№ образца	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
1.1	2а	1а,2а
1.2	2а	2б,2а

Никаких особых изменений при наплавке под опытным флюсом порошковой проволокой 35В9Х3СФ не выявлено. Отличительной особенностью исследуемого флюса является повышенное содержание серы и пониженное фосфора, микроструктура без особых отличий (рисунок 1), загрязненность неметаллическими включениями без особых отличий (рисунок 2, таблица 6). Внешний вид срезов исследуемых образцов, наплавленных под исследуемыми флюсами, указывает на то, что укрывные свойства рассматриваемых флюсов одинаковы.

Выводы

1. Показана возможность использования флюса, изготовленного из шлака силикомарганца для наплавки с использованием наплавочных, проволок типа 35В9Х3СФ с наплавочными флюсами на основе обогащённого шлакового щебня.

2. Разработаны и оптимизированы режимы наплавки с использованием порошковой проволокой диаметром 3,6 мм 35В9Х3СФ под флюсами, изготовленными из шлака силикомарганца. Выбор энерготехнологических режимов осуществлялся исходя из рекомендованных режимов наплавки по ГОСТ 26101-84.

3. Установлено, что при использовании флюса на основе шлака от производства ферросиликомарганца в сравнении с флюсом марки АН-348А, никаких особых изменений при наплавке порошковой проволокой 35В9Х3СФ не выявлено. Микроструктура и загрязнённость наплавленного слоя неметаллическими включениями без особых отличий.

Список литературы

1. Быстров В.А., Дьяков П.К., Уманец А.Г. Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла. Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2014;57(5):24-29. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-5-24-29

2. Сидоров В.А. Закономерность износа вкладышей универсальных шпинделей прокатных станов / В.А. Сидоров, Н.В. Нижник // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005, №3. – С. 94-96.

3. Рябцев И. А. Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами / И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – с. 36 –41

4. Матвиенко В.Н. Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом / В.Н. Матвиенко, В.А. Мазур, Л. К. Лещинский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – с. 30–33.

5. Расчет зоны проплавления при широкослойной наплавке прокатных валков / Матвиенко В.Н., Лещинский Л.К., Мазур В.А. // Металлург. – 2016. – №1. – с.80–83.

6. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 160 с.

7. Громов В.Е., Капралов Е.В., Райков С.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками // Успехи физики металлов. – 2014. – Т.15. – С. 211–232.

8. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Райков С.В., Иванов Ю.Ф. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали // Наноинженерия. – 2015. – №4(46). – С. 14–23.

9. Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А. и др Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность, стали порошковыми проволоками // Изв. РАН. Сер. физ. – 2014. – Т.78, №10. – С. 1266–1272.

10. Вострецов, Г. Н. Порошковая проволока для плазменной наплавки прокатных валков в среде азота / Г. Н. Вострецов, Т. А. Бич, Л. П. Бащенко // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 3 (9). – С. 36–40.

11. Исследование влияния состава порошковых проволок на характеристики наплавленного слоя прокатных валков / Н. А. Козырев, Н. В. Кибко, А. А. Уманский, Д. А. Титов, П. Д. Соколов // Вестник Российской Академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Новокузнецк, 2016. – Вып. 19. – С. 149–154.

12. Влияние введения вольфрама и хрома на свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co / А. И. Гусев, Н. А. Козырев, Н. В. Кибко, Р. Е. Крюков, И. В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении (Литейное и сварочное производства). – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 56–60.

13. Козырев, Н. А. Экспериментальные исследования и обоснование новых составов порошковых проволок для наплавки прокатных валков / Н. А. Козырев, А. А. Уманский, Д. А. Титов // Технологии реновации машин и оборудования : материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XI промышленного салона и специализированных выставок "Промэкспо, станки и инструмент" "Сварка, контроль, диагностика", 25-26 февраля 2016 г. – Уфа : Башкирский ГАУ, 2016. – С. 115–119

14. Выбор энерго-технологических режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца для деталей горношахтного оборудования / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, Р. А. Михно // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. – 2020. – № 6. – С. 175–180.

15. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н. А. Козырев, Р. Е. Крюков, А. А. Усольцев, А. Р. Михно, Л. П. Бащенко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 6 (1422). – С. 55–66.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ НАПЛАВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

APPLICATION OF NANOSTRUCTURES (CNTs) FOR MODIFICATION OF THE WELDING BATH

Орлов Александр Семенович[1]
Orlov A.S.
Рубцова Елена Григорьевна[1]
Rubtsova E.G.
Сизинцев Сергей Валерьевич[1]
Sizintsev S.V.
Власова Екатерина Андреевна[1]
Vlasova E.A.

[1] ФГБОУ ВО «ВГТУ» 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84
[1] FGBOU VO "VSTU" 394006, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84
e-mail: alex@mk.vrn.ru

Аннотация: *В работе рассматривается возможность применения углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве наномодификаторов для измельчения структуры металла шва. Приводятся основные характеристики УНТ «Таунит» и «Таунит-М».*

Ключевые слова: *модифицирование, наноструктуры, «Таунит»*

Abstract: The paper considers the possibility of using carbon nanotubes (CNTs) as nanomodifiers for grinding the structure of the seam metal. The main characteristics of CNTs "Taunit" and "Taunit-M" are given.

Key words: modification, nanostructures, "Taunit"

Введение

Процесс получения мелкозернистой структуры металла шва вызывает интерес многих исследователей в сварочном производстве, поскольку является единственным способом повышения пластичности металла, без существенного снижения его прочности, что в свою очередь повышает эксплуатационные и служебные характеристики сварных металлоконструкций [1]. На данный момент существует много способов получения указанной структуры металла шва, основными из которых являются: реверсивные колебания потоков в сварочной ванне [2], ультразвуковая обработка [3], импульсные воздействия (наложение импульсов на сварочную дугу, импульсная подача сварочной проволоки, защитного газа и т.д.) [4, 5], введение в сварочную ванну модификаторов и т.д. [6]. Все большее внимание в последние годы уделяют процессу модифицирования, как одному из самых эффективных способов получения измельченного зерна, поскольку вводимые в сварочную ванну тугоплавкие модификаторы являются готовыми центрами кристаллизации. Такой интерес вызван тем, что в передовых научных направлениях появились способы и оборудования для получения и изучения материалов наноразмерного

порядка. Применение наноразмерных тугоплавких частиц в качестве модификатора второго рода сформировало целое направление модифицирования сварных швов – наномодифицирование. У таких частиц имеются определенные преимущества и недостатки, в случае использования их в качестве тугоплавких модификаторов. Преимуществом является высокая поверхностная энергия и реакционная способность, которая повышает модифицирующую способность частицы. Но высокий уровень энергии является и причиной агломерированности частиц между собой. Поэтому необходимо применять специальные меры против образования агломератов наночастиц, перед процессом ввода их в сварочную ванну. Время расплавления тугоплавкой частицы в расплаве сварочной ванны называется временем дезактивации. Температура плавления частицы в наноразмерном состоянии зависит от её радиуса: чем меньше радиус, тем ниже температура плавления, вследствие эффекта Гиббса-Томсона [7]. В этом случае важную роль играет материал наномодификатора и его физические характеристики (температура плавления, теплоемкость, коэффициент теплопроводности). В последнее время объектом пристального внимания для многих ученых стали фуллереновые наноструктуры, в частности, углеродные нанотрубки (УНТ), которые обладают определенными уникальными свойствами. В зависимости от способа получения различают однослойные и многослойные углеродные нанотрубки [8]. В сварочном производстве применение УНТ в качестве материала для наномодификатора второго рода только начинается и вызывает большой интерес своими следующими свойствами – высокие показатели поверхностной энергии, механической прочности, температуры плавления и др.

Целью работы является теоретическое обоснование целесообразности и возможности использования углеродистых нанотрубок (УНТ) в качестве модификаторов второго рода в сварочной ванне.

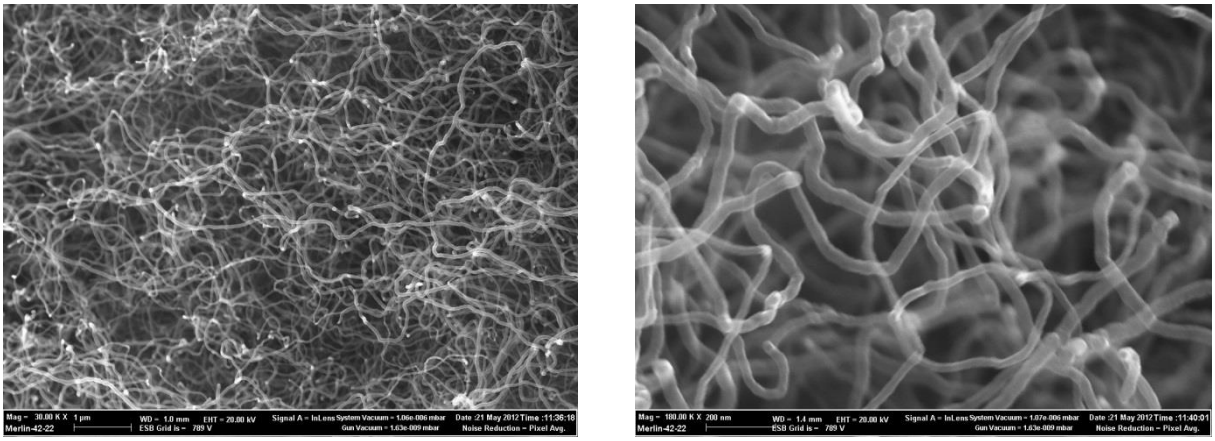
Результаты и обсуждение

В качестве тугоплавких модификаторов в сварочном производстве применяют большое количество оксидов, нитридов, карбидов, которые являются либо самостоятельными готовыми центрами кристаллизации, либо необходимыми химическими составляющими для них [9, 10, 11, 12]. Модифицирующая способность тугоплавких частиц зависит от многих факторов, например, теплофизические характеристики модификатора, его размерность, способ ввода в сварочную ванную и др. Все они известны и в достаточной мере изучены. Тугоплавкие модификаторы вводят через покрытие электрода для ручной дуговой сварки [13], через железный порошок в составе шихты порошковой проволоки [12], через защитный газ для механизированной сварки [14], через специальную суспензию или лигатуру [10], через сварочный флюс [15], металлохимическую присадку (МХП) [9] или через дополнительную горячую проволоку (ДПГ) [16] для автоматической сварки под слоем флюса. Все способы ввода имеют свои преимущества и недостатки и нашли определенное применение в сварочном производстве.

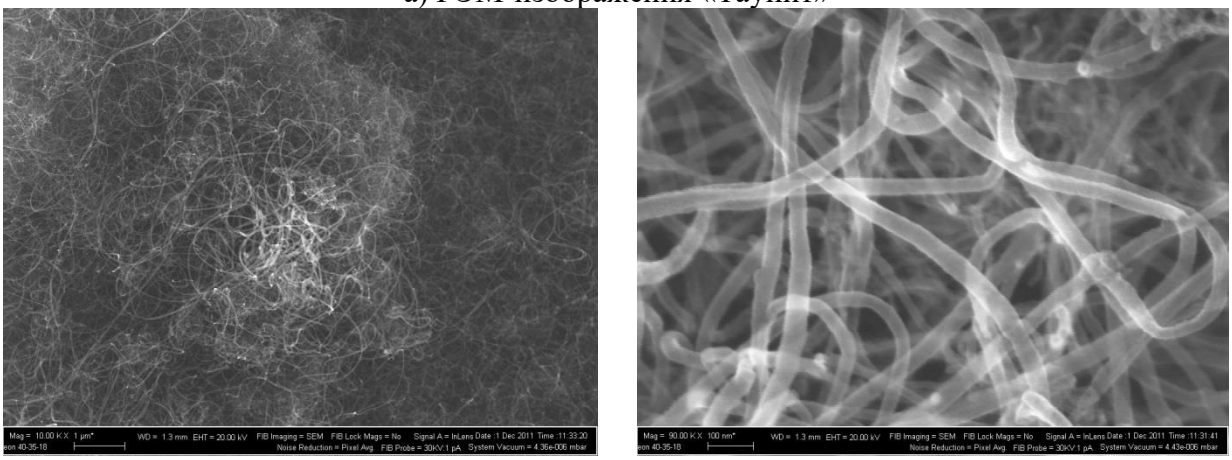
Важным шагом в модифицировании металлошва является применение модификаторов наноразмерного порядка, что повышает эффективность модифицирования в целом. На сегодняшний день ряд предприятий реализуют готовые наноразмерные тугоплавкие оксиды, нитриды, карбиды, зачастую полученные методом взрыва. Усовершенствовалось и оборудование микроскопии, лазерного анализа для исследования и регистрации наночастиц. Наряду с этим появились также высокоэнергетические установки для тонких помолов частиц, в которых можно измельчать до наноразмеров [17].

На сегодняшний день для того, чтобы повысить эффективность модифицирования, совершенствование методов ввода и измельчения тугоплавких частиц не достаточно. Необходим поиск новых материалов для модифицирования, обладающих повышенными характеристиками, которые оказывали бы положительных эффект на процесс измельчения

зерна. Одними из таких новых материалов являются фуллереновые наноструктуры. К ним относятся углеродные нанотрубки (УНТ) серии «Таунит» и «Таунит-М», производимые компанией ООО "НаноТехЦентр" г. Тамбов. Углеродные нанотрубки (УНТ) серии «Таунит» представляют собой - квазиодномерные, наномасштабные, нитевидные образования поликристаллического графита преимущественно цилиндрической формы с внутренним каналом в виде сыпучего порошка черного цвета (рис.1). Гранулы углеродных наноматериалов (УНМ) микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных трубок, способ получения - газофазное химическое осаждение на металлическом катализаторе (ГФХО) или CVD-процесс. «Таунит» является перспективным материалом для авиационной, атомной, космической промышленности, медицины, фармацевтики, для производства суперкомпьютеров. Добавка УНМ «Таунит» улучшает качество смазок, конструкционных композитов, строительных материалов [18, 19].



а) РЭМ-изображения «Таунит»



б) РЭМ-изображения «Таунит-М»

Рис. 1. РЭМ-изображения УНТ серии «Таунит», «Таунит-М»

В результате постоянной и непрерывной работы исследователей в области производства УНТ стало возможным в настоящее время синтезировать наноуглеродные трубки в промышленных масштабах, которые отличаются невысокой стоимостью по сравнению с первоначальной. Это открывает все большие перспективы освоения и внедрения УНТ в создании новых материалов и технологий, обладающих уникальными свойствами и показателями.

УНТ «Таунит», «Таунит-М», в виде порошка, имеют следующие характеристики (таблица).

Таблица 1 – Характеристики УНТ серии «Таунит», «Таунит-М»

Характеристика	«Таунит»	«Таунит-М»
Внешний диаметр, нм	20-50	10-30
Внутренний диаметр, нм	10-20	5-15
Длина, мкм	≥2	≥2
Общее количество примесей, %	начальное ≤10 после очистки ≤1	начальное ≤5 после очистки ≤1
Удельная поверхность, $м^2/г$	≥160	≥270
Насыпная плотность, $г/см^3$	0,3-0,6	0,025-0,06

Известен опыт применения УНТ в составе наномодификатора в сварочном производстве. Проводили исследования влияния углеродных нанотрубок/нановолокон (УНТ/УНВ) на свойства покрытий из баббита, полученных плазменной наплавкой. Использовали углеродные нанотрубки двух видов: многослойные и коаксиально-конические. Последние представляют собой нитевидные наноразмерные образования (трубки/волокна), имеющие внутренний канал, со структурой стенок, в которых графеновые плоскости расположены перпендикулярно или под углом к оси трубок. В результате введение УНТ в баббитовые покрытия, не оказывает существенного влияния на твердость, однако увеличивает износостойкость, причем различие в свойствах покрытий с УНТ двух типов не выявлено. При этом коэффициент трения остается на прежнем уровне, но повышается устойчивость процесса трения, особенно на больших нагрузках [20].

Выводы

Углеродные нанотрубки (УНТ) в качестве модификаторов второго рода в сварочной ванне могут иметь высокие показатели модифицирующей способности из-за своей высокой удельной поверхности. Такая поверхностно-активная частица может являться эффективным центром кристаллизации в сварочной ванне. Высокая прочность УНТ дает возможность высокоэнергетическими механическими методами прикреплять их к менее прочным макрочастицам.

Список литературы

1. Петч Н. Металлографические аспекты разрушения / Н. Петч. Разрушение. М.: Мир.- 1973, Т.1, С. 376-420.

2. Болдырев А.М., Дорофеев Э.Б., Антонов Е.Г. Управление кристаллизацией металла при сварке плавлением // Сварочное производство, 1971. № 6, С. 35-37.

3. Ерохин А.А., Китайгородский Ю.И., Силин Л.Л. О воздействии колебаний ультразвуковой частоты на характер кристаллизации сварочной ванны // Известия АН СССР, ОТН, 1958, № 1.

4. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Полосков С.И. Использование механических импульсов для управления процессами автоматической и механизированной сварки плавящимся электродом// Сварка и Диагностика, 2013, №6, С. 16-20.

5. Жерносеков А.М., Сидорец В.Н., Шевчук С.А. Комбинированное импульсное воздействие защитных газов и сварочного тока при сварке плавящимся электродом // Сварочное производство, 2013, №12, С. 9-13.

6. Болдырев А.М., Петров А.С., Толоконников Н.П. Анализ факторов, влияющих на активность модификаторов в условиях сварки плавлением // «Управление сварочными процессами» - сборник докладов межвузовской конференции, Тула, 1983, С. 98-108.

7. Чернов А.А., Гиваргизов Е.И., Багдасаров Х.С. и др. Современная кристаллография (в четырех томах). Том 3. Образование кристаллов. М.: Наука, 1980. 407 с.

8. Дьячкова Т.П., Ткачев А.Г. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013.-152 с. – ISBN 978-5-4442-0050-6.

9. Болдырев А.М., Гущин Д.А. Модифицирование металла шва при сварке низколегированных сталей под флюсом: монография // Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 140 с.

10. Кузнецов В.Д., Степанов Д.В. Структура и свойства металла сварного шва, модифицированного нанооксидами // Автоматическая сварка, 2015, №11, С. 19-24.

11. Головко В.В., Степанюк С.Н., Ермоленко Д.Ю. Влияние титансодержащих инокулянтов на структуру и свойства металла швов высокопрочных низколегированных сталей // Автоматическая сварка, 2015, №2, С.16-20.

12. Пломодьяло Р.Л., Назарько А.С., Штоколов С.С. Разработка технологических режимов подготовки шихты порошковой проволоки, содержащей карбид титана // Сварка и диагностика, 2019, №4, С. 53-57.

13. Потапов Н.Н. Восстановление титана и алюминия из шлака при сварке покрытыми электродами // Сварочное производство, 1975, № 8., С. 3-5.

14. Кузнецов М.А., Зернин Е.А., Колмогоров Д.Е., Шляхова Г.В., Данилов В.И. Строение, морфология и дисперсность металла, наплавленного дуговой сваркой плавящимся электродом в аргоне в присутствии наноструктурированных модификаторов // Сварка и диагностика, 2012, №6, С. 8-10.

15. Потапов Н.Н. Восстановление титана и алюминия из шлака при сварке покрытыми электродами // Сварочное производство, 1975, № 8, С. 3-5.

16. Алешин Н.П., Якушин Б.Ф., Коберник Н.В., Килев В.С. Совершенствование процесса сварки хладостойких сталей путем оптимизации баланса тепловой энергии дугового источника // Сварочное производство, 2018, № 10, С. 3-13.

17. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие, Тамбов: издательство Тамбовского Государственного Технического Университета, 2004. 75 с.

18. Гусев А.А., Емельянов А.В., Шутова С.В., Ткачев А.Г., Годымчук А.Ю., Кузнецов Д.В. Экотоксикологические исследование углеродного наноструктурного материала // Научные ведомости. Серия естественные науки. 2011. №15 (110). Выпуск 16, С. 80-87.

19. Ткачев А.Г., Золотухин И.В. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур: монография / - М.: Изд-во Машиностроение-1, 2007. - 316 с.

20. Коберник Н.В., Чернышов Г.Г., Чернышова Т.А., Вагагов В.Е. Антифрикционные свойства покрытий, полученных плазменной наплавкой баббита с углеродными наноструктурами // Сварка и диагностика, 2013, №3, С. 27-31.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ МАРКИ Е71Т-1 Ø1,2 ММ

DEFINING TECHNICAL PROPERTIES OF E71T-1 Ø1.2 MM FLUX-CORED WIRE

Мандров Борис Иванович[1]
Mandrov B.I.
Лебедев Максим Николаевич[2]
Lebedev M.N.
Ощепков Алексей Александрович[1]
Oschepkov A.A.
Маценко Илья Александрович[1]
Matsenko I.A.
Хомутов Георгий Станиславович[1]
Khomutov G.S.

[1]Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)
[2]ООО «Барнаулмеханомонтаж» (г. Барнаул)
[1]Polzunov Altai State Technical University (Barnaul)
[2]OOO Barnaulmekhanomontazh (Barnaul)
e-mail: polimerbim@mail.ru, lebedev_maksim@mail.ru, leha1996_25@mail.ru, mocenych@mail.ru, goshaman19@yandex.ru

Аннотация: *статья посвящена определению технических характеристик порошковой газозащитной проволоки марки Е71Т-1 диаметром 1,2 мм при частично механизированной сварке в смеси газов. По методике, принятой при производстве порошковой проволоки экспериментально определена масса отрезка порошковой проволоки и масса его металлической оболочки. Расчетным путем установлена и экспериментально подтверждена толщина оболочки порошковой проволоки. Определено значение коэффициента заполнения порошковой проволоки. Показано, что полученный результат может быть использован в технико-экономическом обосновании применения сварки порошковой проволокой диаметром 1,2 мм.*

Ключевые слова: *сварка порошковой газозащитной проволокой, частично механизированная сварка в углекислом газе, коэффициент заполнения порошковой проволоки, ресурсоемкость, четырех роликовый полуавтомат для дуговой сварки.*

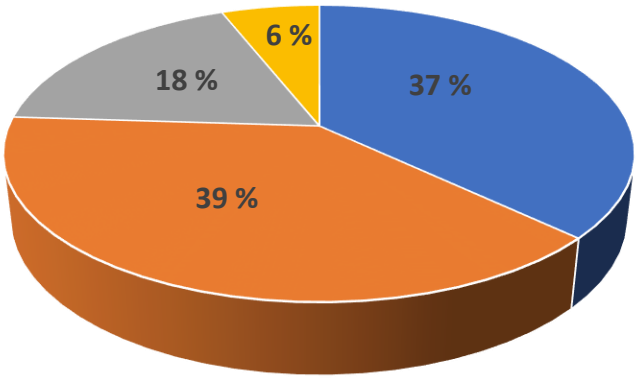
Abstract: the article defines technical characteristics of gas-shielded flux-cored wire E71T-1 of 1.2 mm diameter in semi-automatic welding with shielding gas mix. Using flux-cored wire production algorithm, authors experimentally define flux-core mass and metal sheath mass in a flux-cored wire. Metal sheath thickness is defined by calculation and confirmed experimentally. Flux-cored wire fill rate is also calculated. The produced results can be used in feasibility studies for using flux-cored wire of 1.2 mm diameter.

Key words: gas-shielded flux-cored wire welding, semi-automatic welding in CO2, flux-cored wire fill rate, electrode efficiency, four-roll semiautomatic arc welding machine.

Введение

Несмотря на значительное увеличение производства сварных конструкций из полимерных материалов металлические сварные конструкции по-прежнему играют главную роль в строительстве и машиностроении. При этом на дуговые способы сварки приходится основная часть объемов выпуска сварных конструкций. Сохранению ведущей роли дуговых способов сварки способствует совершенствование сварочного оборудования с большим количеством программ сварки и выпуск перспективных сварочных материалов,

Конкурентоспособность сварочных материалов сварочных материалов, как и любой продукции определяется соотношением цены и качества [1], включая технические характеристиками, определяющие затраты на сварочные материалы. Структура рынка сварочных материалов в 2000 г. показана на диаграмме (рисунок 1).



покрытые электроды-37%, проволоки сплошного сечения - 39%, порошковые проволоки – 18%, флюсы-6%

Рисунок 1 – Структура рынка сварочных материалов в 2000 г. [2]

В работе [2] было показано, что рынок сварочных материалов стабилизировался, а рост применения порошковой проволоки приостановился. Диаграмма показывает, по выпуску порошковая проволока занимает третье место в структуре рынка сварочных материалов. В тоже время, появляются новые типоразмеры порошковых проволок, например, порошковых проволок малого диаметра как самозащитных, так и газозащитных. По мнению производителей, порошковых проволок их применение дает возможность влиять на металлургические процессы в сварочной ванне, на коэффициент потерь проволоки при сварке, на расход защитного газа для газозащитных проволок, на расход электроэнергии и трудоемкость сварки.

На порошковые проволоки диаметром (от1,4 до 3,0) мм, выпускаемые по нормативным документам РФ и предшествующего периода в технической литературе и паспортных данных содержалась информация о коэффициенте заполнения порошковой проволоки и другие технические характеристики. Это позволяло при обосновании выбора способа сварки и сварочных материалов производить технико-экономические расчеты эффективности применения этого сварочного материала. В паспорте для газозащитной проволоки марки Е71Т-1диаметром 1,2 мм эти данные отсутствуют. В связи с этим, было проведено экспериментальное и расчетное определение толщины ленты, из которой изготавливалась оболочка порошковой проволоки вышеуказанного диаметра, а также рассчитывались коэффициент заполнения проволоки и другие технические характеристики. Эти характеристики порошковой проволоки необходимы для технико-экономического обоснования выбора как способа сварки, так и сварочных материалов.

Результаты и обсуждение

Известно [3], что для оболочки порошковой проволоки используется лента холоднокатаная из низкоуглеродистой стали толщиной от 0,05 до 4 мм по ГОСТ 503-81 [3].

При проведении экспериментального определения коэффициента заполнения проволоки использовалась методика ГОСТ 26271-84, согласно которой от катушки проволоки отрезают по одному образцу длиной (100-150) мм. Образцы взвешивают на весах с ценой деления не более 0,01 г, вскрывают, тщательно очищают оболочку от шихты. Оболочку взвешивают и для каждого образца вычисляют коэффициент заполнения в процентах по формуле (1).

$$K_з = 100*(P - P_{об})/P, \quad (1)$$

где P- масса образца проволоки, г;

$P_{об}$ - масса оболочки, г.

Для взвешивания использовались отрезки проволоки длиной в диапазоне, рекомендованном в государственном стандарте. Взвешивание производилось на весах марки M-ER 122ACF(JR)-150.005 с допустимой максимальной нагрузкой 150 г и действительной ценой деления 0,005 г, что соответствует требованиям вышеуказанного государственного стандарта. Для измерения толщины оболочки использовалась индикаторная головка ИЧ-10 по ГОСТ 577-68с ценой деления 0,01 мм, закрепляемая на магнитной стойке.

В экспериментальной части работы от катушки отрезались 3 образца длиной до 150 мм (рисунок 2), взвешивались на весах вышеуказанной марки, помещались в маркированные конверты, а полученные данные заносились в таблицу. Далее образцы раскрывались, очищались от шихты (см. рисунок 2 б), повторно взвешивались (рисунок 3), полученные данные заносились в таблицу.

а

б

Рисунок 2 – Образцы проволоки: а – исходный, б - после очистки от шихты

Рисунок 3 – Взвешивание оболочки проволоки

Для измерения толщины оболочки подготавливались образцы и измерительная установка (рисунок 4). Толщина оболочки измерялась 3 раза, средние значения записывались в таблицу. Известно [3], что для оболочки порошковой проволоки используется лента холоднокатаная из низкоуглеродистой, стали толщиной от 0,05 до 4 мм по ГОСТ 503-81 [3], поэтому полученные данные сравнивались со значениями толщины ленты вышеуказанного стандарта.

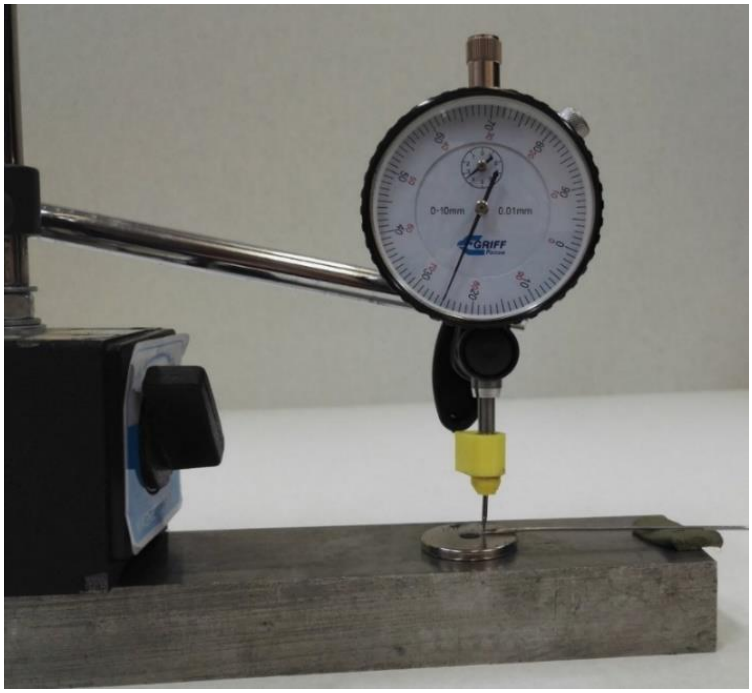


Рисунок 4 – Измерение толщины оболочки порошковой проволоки

После проведения измерений и заполнения таблицы производилось расчетное определение значений коэффициента заполнения порошковой проволоки, погонной массы

порошковой проволоки, ее оболочки и толщины оболочки. Расчетная толщина оболочки порошковой проволоки определялась из соотношения

$$mоб. = lпр.*Fоб.*\gamma, \quad (2)$$

где ***mоб.*** – масса оболочки образца при взвешивании, г,
lпр. – длина образца, мм,
Fоб. – площадь оболочки, мм^2,
γ– плотность стали, г/мм^2.

В расчетах использовались экспериментальные данные таблицы.

На основе экспериментальных данных определялись дополнительные параметры: погонная масса порошковой проволоки, погонная масса оболочки порошковой проволоки, г/мм. Эти параметры будут необходимы для определения коэффициента расхода проволоки. Зная скорость подачи проволоки и время наплавки можно определить длину отрезка проволоки, израсходованной во время наплавки, массу израсходованной оболочки и проволоки.

Современные сварочные полуавтоматы, оснащенные блоком программирования, задают скорость подачи проволоки в зависимости от диаметра проволоки и величины сварочного тока и типа проволоки (сплошного поперечного сечения или порошковой). Был произведен расчет площади оболочки порошковой проволоки вышеуказанного диаметра и ее сопоставление с проволокой сплошного сечения. Оказалось, что площадь поперечного сечения оболочки наиболее близка к площади сечения проволоки диаметром 1,0 мм (разность составляет ~ 4%). Это объясняет, что скорость подачи порошковой проволоки назначается по проволоке диаметром 1,0 мм.

Таблица 1 –Технические характеристики порошковой проволоки диаметром 1,2 мм

№ п/п	Длина образца проволоки, мм	Масса образца проволоки, mпр., г	Масса оболочки, mоб., г	Масса шихты, г	Значение $K_з$, % рассчитанное по экспериментальным данным	Погонная масса порошковой проволоки, г/мм	Погонная масса оболочки порошковой проволоки, г/мм	Расчетное значение толщины оболочки, мм	Экспериментальное значение толщины оболочки, мм	Толщина ленты холоднокатаной ГОСТ 503-81, мм	Площадь оболочки, мм^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	150	1,050	0,885	0,165	15,71	0,0070	0,0059	0,25	0,25	0,25	0,75
2	150	1,050	0,885	0,165	15,71	0,0070	0,0059	0,25	0,26		
3	145	1,015	0,855	0,160	15,76	0,0070	0,0059	0,25	0,25		

Выводы

1. Использование методики и весов с ценой деления, не нижеуказанной в ГОСТ 26271-84 позволяет определить массу оболочки, рассчитать значение коэффициента заполнения проволоки и толщину оболочки.
2. Значения погонной массы порошковой проволоки и ее оболочки могут быть при необходимости использованы для определения коэффициентов расхода проволоки, расплавления и потерь металла при сварке.
3. Значения расчетной и экспериментальной толщины оболочки имеют хорошее соответствие друг другу и данным ГОСТ 503-81.
4. Расчетное определение толщины оболочки менее трудоемко чем экспериментальное и может быть использовано для получения этого показателя.

Список литературы

1. Едварс. В. Деминг. Выход из кризиса / В. ЕдварсДеминг. – Тверь : Альба, 1994. – 498 с.
2. Кусков. Ю.В., Эволюция производства сварочных материалов, проблемы настоящее и будущее. Труды II Международного симпозиума «Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения / Ю.В. Кусков, Г.Н. Полищук. – Москва - Минск : Б.и. 2001. – 128 с.
3. ГОСТ 26271-84Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия:дата введения 1987-01-01. - Москва :Издательство стандартов, 1993. – 23 с.
4. Порошковые проволоки для электродуговой сварки. Каталог-справочник / И.К. Походня, А.М. Суптель, В.Н. Шлепаков и др. – Киев : Наукова думка, 1980. – 180 с.
5. ГОСТ 503-81 Лента холоднокатаная из низкоуглеродистой стали. Технические условия :дата введения 1983-01-01. - Москва :Стандартинформ, 2009. – 14 с.

ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ С НАПЫЛЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ

CONDUCTING SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF SPECIMENS WITH A SPUTED COATING BY THE METHOD OF HYPERSONIC METALLIZATION

Коротин Владимир Олегович[1]
Korotin V.O.
[1]Кузбасский государственный технических университет
имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ)
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28
[1]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University after
650000, Kemerovo, Vesennyaya, 28
e-mail: korotinvo@kuzstu.ru

Аннотация: *В статье рассмотрены методы упрочнения поверхностного слоя деталей (гиперзвуковая металлизация и поверхностное пластическое деформирование). Представлена методика обкатывания образцов после напыления.*

Ключевые слова: *поверхностный слой, эксплуатационные свойства, комбинированная обработка, гиперзвуковая металлизация, поверхностное пластическое деформирование.*

Abstract: The article considers methods for hardening the surface layer of parts (hypersonic metallization and surface plastic deformation). A technique for rolling samples after deposition is presented.

Keywords: surface layer, performance properties, combined processing, surface plastic deformation, hypersonic metallization.

Введение

Кузбасс является одним из крупнейших угольных центров Российской Федерации. Поэтому в регионе развито производство и ремонт горно-шахтного оборудования (ГШО). Все ГШО гидрофицировано; это связано с тем, что оборудование работает в подземных взрывоопасных условиях, подвергается воздействию шахтных вод, которые в зависимости от пород разрабатываемого месторождения могут быть кислотными или щелочными, вызывающими коррозию оборудования. Поэтому к ним предъявляются повышенные требования к качеству поверхности деталей.

В настоящее время качество такого рода оборудования обеспечивается на специальных заводах, где изготавливаются детали гидроцилиндров требуемого качества. В условиях ремонтных производств часто используется наплавка или хромирование. При ремонте оборудование восстанавливается не полностью, а частично, вследствие этого не удается обеспечить требуемую долговечность. Кроме того, применение хромирования повышает экологическую нагрузку и создает существенные проблемы в процессе утилизации электролитов; хромирование является дорогостоящим методом упрочнения. Также было установлено, что при больших удельных нагрузках хромовые покрытия, нанесенные на детали узлов трения скольжения, изнашиваются и разрушаются очень быстро, о чем говорится в исследованиях М.А. Белоцерковского, А.С. Прядко, А.Е. Черепко [1].

Таким образом, замена хромирования другими высокопроизводительными методами, позволяющим получать коррозионностойкие покрытия большей толщины с минимальным загрязнением окружающей среды, обеспечить повышенную износостойкость, является важным для деталей силовой гидравлики.

Высокую эффективность упрочнения поверхностного слоя деталей силовой гидравлики в процессе изготовления/ремонта показывает гиперзвуковая металлизация (ГМ). Данная технология разработана проф. М.А. Белоцерковским, позволяет отказаться от применения хромирования и может использоваться как в процессах изготовления, так и в процессах восстановления/ремонта деталей силовой гидравлики [2]. Согласно исследованиям М.А. Белоцерковского и А.В. Сосновского, хромовые покрытия на 30-40% уступают гиперзвуковой металлизации по износостойкости. Поэтому можно сказать, что при правильном подборе напыляемых материалов и режимов нанесения, можно успешно решать задачу восстановления деталей с изношенными хромовыми покрытиями [3].

Как известно, что любой нагрев поверхностного слоя (хромирование, наплавка и др. методы упрочнения), приводит к появлению растягивающих напряжений, а это влияет на коррозионную стойкость и износостойкость поверхности; поэтому для получения сжимающих напряжений в поверхностном слое можно применять ППД.

В связи с этим цель проведения экспериментальных исследований заключается в оценке возможности применения гиперзвуковой металлизации (ГМ) в сочетании с поверхностным пластическим деформированием (ППД) для упрочнения поверхностного слоя деталей силовой гидравлики, в частности, штоков гидроцилиндров механизированных шахтных крепей.

Описание экспериментальных исследований

Экспериментальные образцы изготавливались из стали 30ХГСА ГОСТ 4543-2016 одной поставки.

Выбор стали 30ХГСА в качестве основного материала для исследований обусловлен тем, что из данного материала изготавливаются штоки гидроцилиндров механизированных шахтных крепей.

С учетом требований, предъявляемых к ГМ, диаметр образца составил 20±0,26 мм, длина 80±0,37 мм (рисунок 1).

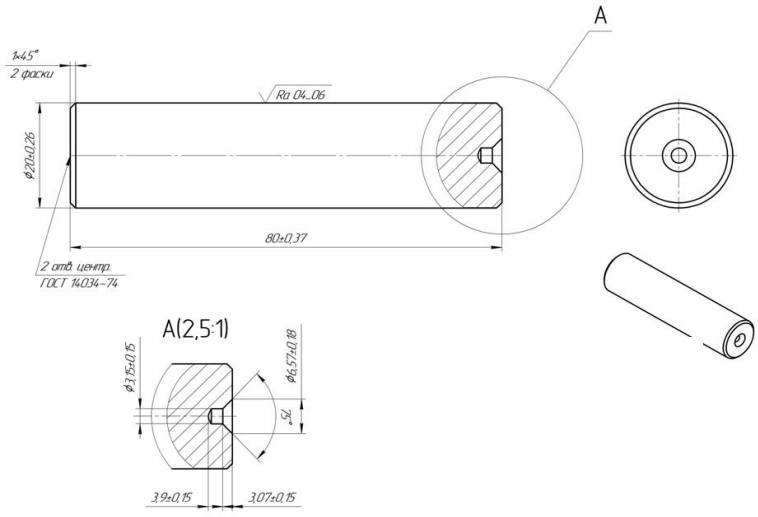


Рисунок 1 – Эскиз образца

ГМ выполнялась в Объединенном институте машиностроения НАН Республики Беларусь. На поверхность образца наносился порошок сплава 30ХГСА. Общая толщина напыляемого покрытия составила ***d*** ≈ 1,5 мм, толщина напыляемого слоя ***di*** ≈ 0,5 мм; количество ходов ***i*** = 3. Сила ток варьировалась от 60 до 450 А. Производительность процесса распыления стальной проволоки: 1,5-18,0 кг/ч. Пористость покрытия при скорости перемещения металлизатора 0,6 м/с составила: 1,3-1,8 %.

Рисунок 2 – Образцы после ГМ

Поверхность образцов после ГМ имеет высокую шероховатость ***Ra*** 6,77…7,79 мкм и пористую поверхность (рисунок 2). Такая поверхность неприемлема для проведения ППД. Для этого необходимо выполнить механическую обработку образца. Диаметр образцов после проведения ГМ составил ***d*** ≈21,5±0,26 мм. Образцы обрабатывались резанием на всю длину в соответствии с режимами, представленными в табл. 1.

Таблица 1 – Режимы механической обработки

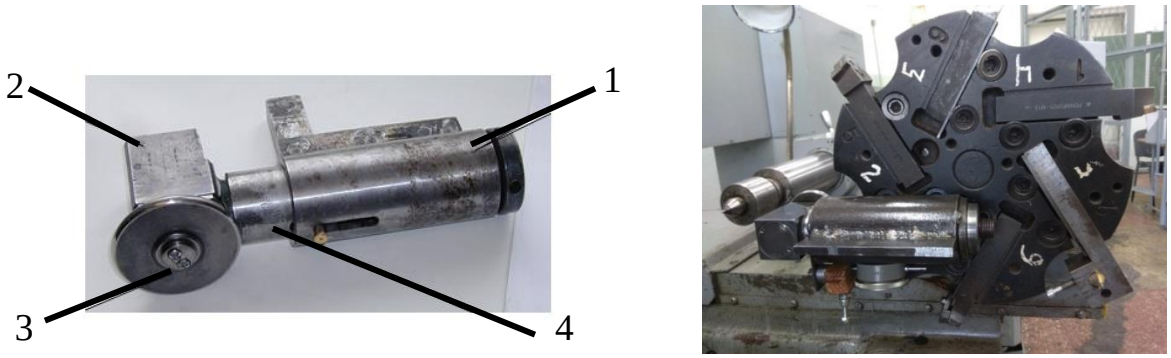
Образец № п/п.	Механическая обработка		
1-6	Черновое		
	t, мм	***S***, мм/об	***n***, м/мин
	0,25	0,07	1600
	Получистовое		
	0,25	0,07	1600
	Чистовое		
	0,05	0,07	1600

После обработки образцы имеют диаметр ***d*** ≈21±0,26 мм. Поверхность сплошная не пористая, ***Ra*** 1,2-1,0. Такая поверхность пригодна для проведения обкатывания (рисунок 3).

Рисунок 3 – Образцы после механической обработки

Вторым этапом проведения экспериментальных исследований было обкатывание образца.

В качестве приспособления использовалась однороликовая головка для обкатывания. Приспособление состоит из трех основных узлов: корпуса (базового агрегата) 1, сменной роликовой головки 2 с роликом 3 и штока 4 с пружиной. Корпус представляет собой трубу с приваренной к ней державкой для установки в резцедержатель токарного станка. Роликовая головка устанавливается в корпус по конусу Морзе. Необходимое давление ролика на обкатываемый образец осуществляется винтовой тарированной пружиной и может меняться от 500 до 5000 ***H*** (50 - 500 кгс) [4]. Однороликовое приспособление с помощью державки устанавливаются в резцедержатель токарного станка (рисунок 4).



а) б)

Рисунок 4 – приспособления для обкатывания:
а) однороликовое приспособление; б) однороликовое приспособление в резцедержателе токарного станка с ЧПУ

Для обкатывания использовался ролик из стали ШХ 15 (ГОСТ 801-78) с радиусом закругления 3 мм (рисунок 5).

d=65 мм

Рисунок 5 – Ролик для обкатывания с $R_{пр}$ =3 мм;

Усилие ***P*** обкатывания составляло 200 кгс, 150 кгс и 125 кгс, подача ***S***=600 мм/мин. В качестве СОЖ использовалось масло индустриальное И20.

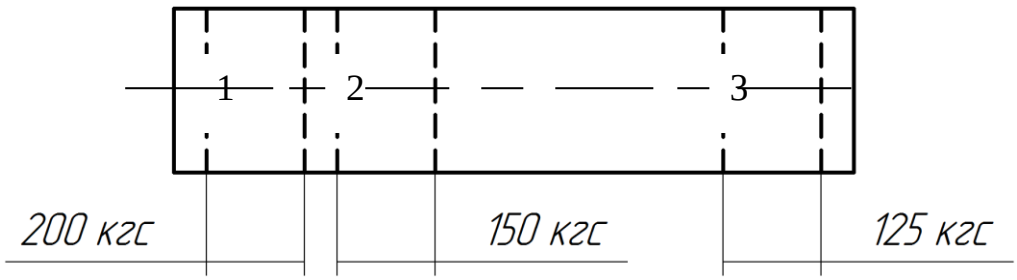


Рисунок 6 – Участки образца, обкатанные с разными усилиями

На участке 1 усилие составило 200 кгс, обкатывание проводилось слева направо. Сразу после приложения усилия на поверхности образовалась трещина и произошло отслаивание нанесенного покрытия (рисунок 7).

На участке 2 усилие составило 150 кгс, трещина продолжила расти и продолжилось отслаивание покрытия.

На участке 3 усилие составило 125 кгс, обкатывание проводилось справа налево. При приложенном усилии трещин на образце не обнаружено, отслаивание не наблюдается.

Рисунок 7 – Обкатанный образец

Выводы и результаты

При обкатывании покрытия усилием 200 кгс, на поверхности образовалась трещина и произошло отслаивание покрытия на торце образца, при уменьшении усилия до 150 кгс, трещина продолжила рост. При обкатывании с усилием 125 кгс трещина не образовалась.

Было выявлено, что композиционные порошковые проволоки весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Поэтому, если неправильно подобрать режимы обработки такого рода покрытий, то на нем могут появиться микротрещины, которые в последующем могут увеличиться в размерах либо привести к разрушению всего покрытия.

Чтобы исключить образование микротрещин при механической обработке, необходимо уменьшать толщину снимаемого за один ход слоя, увеличить количество рабочих ходов и непрерывно контролировать температуру образца.

Еще одним вариантом предотвращения образования трещин является замена механической обработки резанием на обработку шлифовальными кругами. Но здесь также нужно выбирать режимы и типы шлифовальных кругов. Дальнейшие исследования микротвердости позволят определить глубину упрочнения и детализировать закономерности процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587.

Список литературы

1. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета, Сер. В, Промышленность.

2. Белоцерковский М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении: междунар. науч. конф., Минск, 30–31 окт. 2008 / редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2008.

3. Черепко, А.Е. Технологии гиперзвуковой металлизации / А.Е. Черепко, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Механика-2011: сб. науч. докл. V Белорус. конгр. По теорет. и прикладной механике, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т.; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. –Минск, 2011. – Т. 2. – С. 138–143.

4. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А. Информационная поддержка жизненного цикла упрочненных ППД деталей машин. функциональная модель механики технологического наследования//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. № 1. – С. 14-23.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ППД ПЕРЕХОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМИ ДЕФОРМИРУЮЩИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

ANALYSIS OF SPD PROCESSES OF TRANSITION SURFACES WITH COMPLEX PROFILE DEFORMING TOOLS

Блюменштейн Валерий Юрьевич[1],
Blumenshtein V.Yu.
Учайкин Сергей Евгеньевич[1],
Uchaikin S.E.

[1]Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ)
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[1]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
650000, Kemerovo, st. Vesennaya, 28
e-mail: blumenstein.vu@gmail.com, uchaikinse@kuzstu.ru

Аннотация: *Показана актуальность задачи. Выполнен анализ имеющихся сложнопрофильных деформирующих инструментов. Рассмотрена возможность применения сложнопрофильных роликов для обработки криволинейных поверхностей.*

Ключевые слова: *поверхностный слой (ПС), упрочняющая обработка, качество поверхностного слоя, поверхностное пластическое деформирование (ППД), напряженно-деформированное состояние (НДС), галтельные переходы, сложнопрофильные инструменты*

Abstract: The relevance of the problem is shown. The analysis of the available complex-profile deforming tools is carried out. The possibility of using complex-profile rollers for processing curved surfaces is considered.

Keywords: surface layer, hardening treatment, quality of the surface layer, surface plastic deformation (SPD), stress-strain state (SSS), fillet transitions, complex-profile tools

Теоретическая часть

Большое количество изделий машиностроения составляют валы и оси, которые имеют различную геометрию поверхности. Валы и оси часто работают при циклических знакопеременных нагрузках. Поэтому важно обеспечить высокое качество поверхности деталей, ведь именно из-за различных концентраторов, в т.ч. большой шероховатости поверхности, возникают усталостные трещины, которые в итоге ведут к разрушениям.

Высокое качество поверхностного слоя (ПС), заключающееся в рациональном сочетании упрочнения и остаточных напряжений, позволяют обеспечить методы традиционного обкатывания торовыми роликами или шариками. Они хорошо исследованы и этими методами пользуются и по сей день. Существуют фирмы по изготовлению данной оснастки.

Стремление повысить эффективность ППД привело к появлению новых комбинированных технологий: размерное совмещенное обкатывание, обкатывание шариками с орбитальным вращением, обкатывание несколькими роликами сразу и т.п.

В КузГТУ были разработаны оригинальные конструкции роликов для обкатывания [1-3] и доказаны их преимущества перед традиционными [4-9]. Данные ролики позволяют создавать большое гидростатическое давление в очаге деформации, что обеспечивает большие пластические деформации с получением наноструктурированного состояния без разрушения металла.

Современное станочное оборудование с ЧПУ позволяет реализовывать различные схемы и способы обработки деталей. Стоит отметить, что, именно для ППД отечественного оборудования на данный момент нет. Есть несколько зарубежных компаний, которые выпускают данное специальное оборудование.

Ранее, как и в настоящее время, обработка заключалась в установке специальной оснастки на универсальное оборудование (например, токарно-винторезный станок). Однако, универсальное оборудование не позволяет производить обработку сложных поверхностей деталей с должной точностью и качеством.

Существуют различные схемы традиционного обкатывания торовым роликом переходных поверхностей, в т.ч. галтелей. При обкатывании наклонными роликами не требуется больших усилий, так как деформация на обрабатываемом участке происходит постепенно при весьма малой площади контакта. Однако такие ролики сложны в изготовлении. Обкатывание с подачами по хорде и вдоль оси вала происходит при неодинаковых условиях нагружения по длине хода. Поэтому обработку следует проводить так, чтобы наибольшее упрочнение металла происходило в зоне концентрации эксплуатационных напряжений (рис. 1) [10].

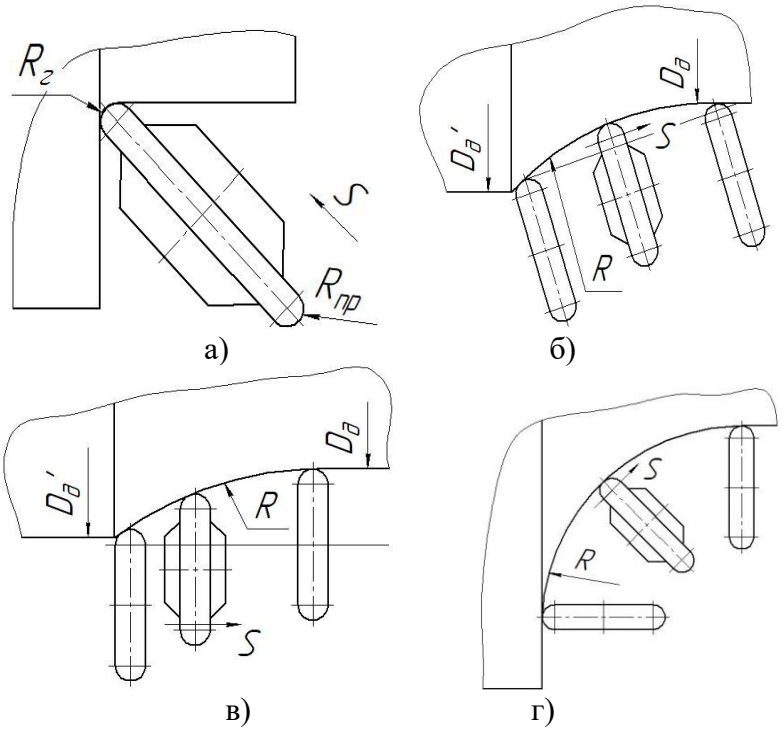


Рисунок 1 – Схемы обкатывания переходных поверхностей:
а – роликом с радиусом, равным радиусу галтели ($R_г = R_{пр}$, до 25 мм); б – роликом с подачей по хорде ($R > 2.5(D_d^{`} - D_d$ )); в – роликом с подачей по оси вала ($R > 4(D_d^{`} - D_d$)); г – роликом с подачей по дуге образующей переходной поверхности ($R > 50$ мм)

При обкатывании цилиндрических поверхностей ролик, расположенный перпендикулярно к поверхности образца, либо с некоторым наклоном, но с постоянным положением на протяжении всей обработки, дает наибольшую стабильность обработки. Отсюда следует, что наиболее предпочтительной схемой обкатывания галтелей и различных криволинейных поверхностей будет являться схема, при которой ролик будет находиться перпендикулярно к касательной к профилю обработки в каждый момент времени (рис. 1, г).

На эту тему выполнено теоретическое решение задач по обкатыванию поверхности торовым роликом методом конечных элементов (МКЭ) [11-12].

Исходя из вышесказанного, обкатывание торовым роликом не позволяет получить максимальных результатов; это обеспечивают сложнопрофильные ролики. Далее будет рассмотрена возможность применения сложнопрофильных роликов для обработки переходных поверхностей (галтелей).

При обработке криволинейной поверхности торовым роликом не возникает проблем, т.к. ролик имеет некий радиус, что позволяет наклонять ролик под некоторым углом в плюс и минус относительно оси симметрии. При этом процесс обработки не меняется.

Из анализа геометрии гидро-ролика [1] следует, что его применение без изменения конструкции, т.е. с цилиндрической частью, теоретически возможно то тех пор, пока ширина ролика будет вписываться в дугу профиля поверхности (рис. 2). Но, т.к. индентор ролика выступает относительно цилиндрической части всего на 0,1 мм, а ширина ролика составляет 17 мм, то дуга окружности получится достаточно большой, что делает этот ролик неприменимым для обработки галтелей. Изменение толщины ролика тоже не приведет к должному результату.

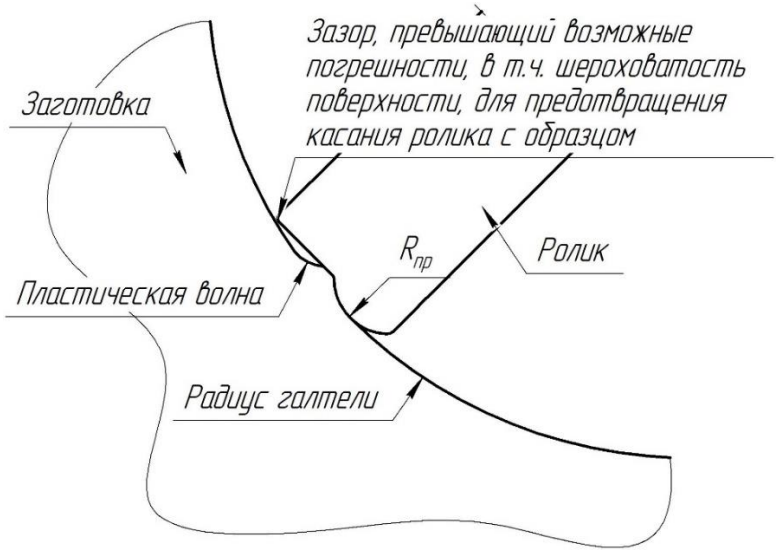


Рисунок 2 – Схема обработки галтели базовым гидро-роликом

Из анализа геометрии комбо-ролика [2] следует, что применение ролика без изменения его конструкции теоретически возможно то тех пор, пока ширина ролика будет вписываться в дугу профиля поверхности (рис. 3).

Но, т.к. комбо-ролик имеет ширину, как и у гидро-ролика 17 мм, а инденторы относительно цилиндрической части выступают примерно на 2 мм, то дуга окружности профиля поверхности получится достаточно большой, что делает этот ролик неприменимым для обработки галтелей.

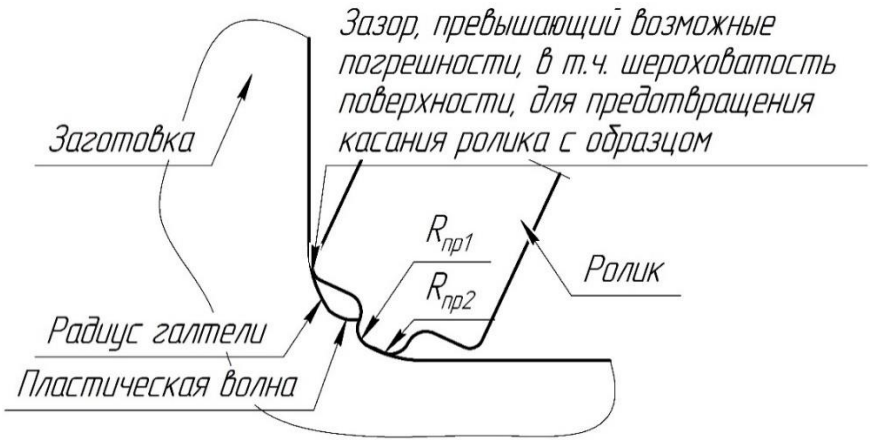


Рисунок 3 – Схема обработки галтели базовым комбо-роликом

Из анализа конструкции мультирадиусного ролика [3] следует, что при обработке цилиндрической поверхности все инденторы работают по определенному закону, т.е. каждый индентор создает свой натяг. Следовательно, для обработки галтелей, даже очень больших, данный ролик не годится, т.к. не сохранится закон работы всех инденторов.

Выводы

Подводя итоги, можно сказать, что разработка новых способов и оптимизация имеющихся является открытой задачей. Применение сложнопрофильных роликов дает возможность получать большое гидростатическое давление в очаге деформации. Это позволяет достичь высоких пластических деформаций с обеспечением наноструктурированного состояния без разрушения металла. Однако, все полученные результаты справедливы для обработки только цилиндрических поверхностей. Из анализа конструкций сложнопрофильных роликов, следует, что с данной геометрией они не пригодны для обработки различных переходных поверхностей, в т.ч. галтелей. Требуется поиск и разработка путей для повышения механических свойств ПС валов со сложной геометрией поверхности.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587»

Список литературы

1. Пат. 2529335 Российская федерация, МПК B24B 39/04. Ролик обкатной комбинированный / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технологический университет имени Т.Ф. Горбчаева" (КузГТУ). – № 2013135796/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 27.09.2014.

2. Пат. 2530600 Российская федерация, МПК B24B 39/04. Ролик обкатной двухрадиусный / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технологический университет имени Т.Ф. Горбчаева" (КузГТУ). – № 2013135794/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014.

3. Пат. 2557377 Российская федерация, МПК B24B 39/04. Ролик обкатной мультирадиусный / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.;

заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технологический университет имени Т.Ф. Горбчаева" (КузГТУ). – № 2013135795/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.02.2015.

4. Mitrofanova K.S. Study of surface layer hardening after treatment complex tool / K.S. Mitrofanova // Solid State Phenomena. - 2020. - Т. 303. - С. 89-96.

5. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя армко-железа после обкатывания мультирадиусным роликом / В.Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2022. - Т. 18. - № 3 (207). - С. 110-115.

6. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study on the effects of hydrostatic pressure on the structural state of pure-iron during hardening treatment with a multiradius roller / V.Yu. Blumenstein, K.S. Mitrofanova // Solid State Phenomena. -2022. - Т. 328. - С. 17-25.

7. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя / В.Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т. 16. - № 2 (182). - С. 68-74.

8. Krechetov A., Mitrofanova K. The study of multiradius roller running process / A. Krechetov, K. Mitrofanova // В сборнике: MATEC Web of Conferences. The conference proceedings (ISPCIME-2019). - 2019.- С. 05003.

9. Митрофанова К.С. Исследование патентной активности в области технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2019. - Т. 15. - № 12 (180). - С. 572-576.

10. Дальский, А.М. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах Т. 2 / А.М. Дальский [и др.] – М.: Машиностроение-1, 2001. - 944 с

11. Учайкин, С.Е. Влияние стационарности процесса поверхностного пластического деформирования на предел выносливости / С.Е. Учайкин // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники: сб. ст. участников, международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники». 424 с. - Брянск: БГТУ, 2020. – С. 227-229.

12. Учайкин, С.Е. МКЭ моделирование обработки ППД сложнопрофильных цилиндрических поверхностей / С.Е. Учайкин // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. ст. научного симпозиума технологов-машиностроителей. 791 с. – г. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2020. – С. 258-264.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

THE INFLUENCE OF WELDING MODE PARAMETERS ON THE FORMATION OF A WELDED JOINT IN FRICTION STIR WELDING

Атрощенко Валерий Владимирович[1],
Atroshchenko V.V.
Кагарманов Эдуард Илшатович[1],
Kagarmanov E.I.
Логачев Юрий Владимирович[1],
Logachev Yu.V.
Сафиуллин Равиль Шамилевич[1],
Safiullin R.S.
Шугаипов Шамиль Данилевич[1],
Shugaipov Sh.D.

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет
(ФГБОУ ВО "УГАТУ", кафедра "Современных методов сварки и контроля конструкций" на базе ООО "АЦ СваркаТехСервис")
450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12
[1]Ufa State Aviation Technical University
450008, Republic of Bashkortostan, Ufa, K. Marx str., 12
e-mail: 91250@mail.ru, kagarmanov@naks-rb.ru, yuryk33@mail.ru,
safiullinrsh@yandex.ru shugaipov17@gmail.com

Аннотация: *сварка тонких листов из алюминиевых сплавов представляет собой сложный процесс традиционными технологиями. В данной работе исследуется влияние параметров режима на формирование сварного соединения при сварке трением с перемешиванием (СТП) сплава АМг2М толщиной 1 мм. Для проведения исследований разработан инструмент, выявлено влияние угла наклона инструмента на температуру в процессе СТП.*

Ключевые слова: *сварка трением с перемешиванием, сварка алюминиевых сплавов, инструмент для СТП.*

Abstract: welding of thin sheets of aluminum alloys is a complex process using traditional technologies. In this work, the influence of welding mode parameters on the formation of a welded joint in friction stir welding (FSW) of an AMg2M alloy 1 mm thick is investigated. For research, a tool for welding was developed, the influence of the tool inclination angle on the temperature during the FSW process was revealed.

Key words: friction stir welding, aluminum alloys welding, tool for FSW

1. Введение

Технология СТП была предложена еще в 1967 году в СССР Ю.В. Клименко согласно авторскому свидетельству №195846, но в современном виде реализована и запатентована в

1991 году Британским институтом сварки (TWI). Изначально такой способ сварки разрабатывался для соединения алюминиевых сплавов, плохо поддающихся сварке плавлением. Однако СТП также позволяет получать неразъемные соединения стали, медных, титановых, свинцовых, магниевых сплавов [1].

Механическое соединение производится путем погружения вращающегося инструмента цилиндрической в свариваемые пластины и перемещением вдоль линии стыка (рисунок 1).

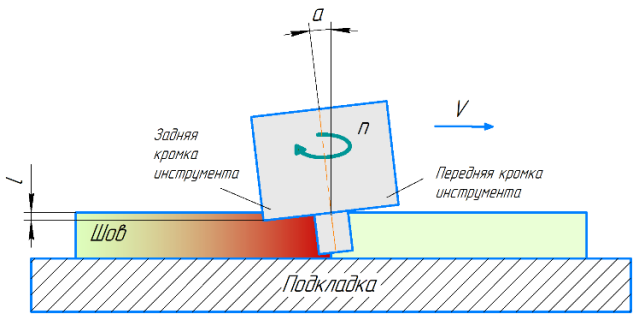


Рисунок 1 – Схематичное изображение процесса сварки трением с перемешиванием

При этом предел максимальных температур в зоне пластического деформирования материала находится ниже точки плавления, для алюминиевых сплавов она не превышает 500°С [2]. Основными параметрами СТП являются частота вращения инструмента, скорость сварки, величина прижимного давления или же заглубления инструмента, форма сварочного инструмента [1-3].

2. Методика проведения исследования

Объектом исследований является сварное соединение пластин толщиной 1 мм из сплава АМг2М, выполненное сваркой трением с перемешиванием. Химический состав материала был проконтролирован посредством оптико-эмиссионного анализатора.

Работы велись на фрезерном станке модели FSS-400 с разработанной сборочно-сварочной оснасткой, который представлен на рисунке 2. Для контроля перемещения инструмента использовались цифровые оптические линейки с точностью 0,001 мм.

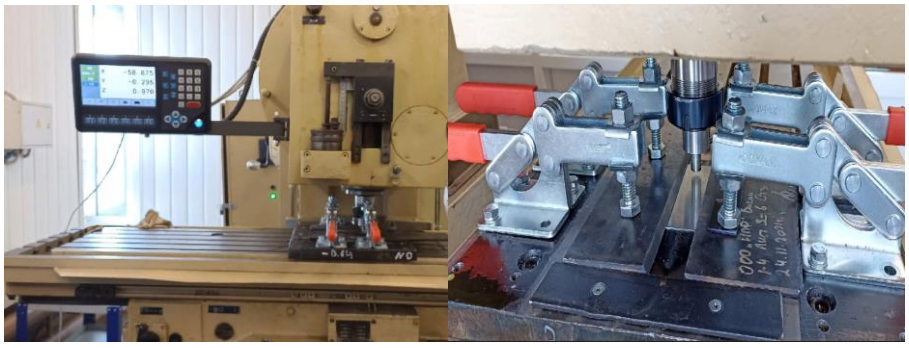


Рисунок 2 – Фрезерный станок FSS-400 сборочно-сварочной оснасткой

Первым этапом проводимых работ была разработка инструмента для СТП. Исходя из условий работы инструмента, в качестве материала была выбрана сталь 20Х13 [2,3], обладающая высокой теплоустойчивостью. Инструмент представляет собой цилиндр с

плоским торцом диаметром D, данный элемент называется заплечиком. Из заплечика выступает цилиндр меньшего диаметра d - пин [1,2].

Решено было использовать заплечик с плоской формой, так как выпуклая форма плеча является неэффективной, а вогнутая приведет к значительному утонению шва [3].

Для упрощения конструкции, форму пина приняли цилиндрическую. Определили, что длина пина должна быть равной 75-85% толщины материала, так же учли то, что заплечик погружается в материал на 0,08-0,15 мм [4]. Опираясь на вышеописанные данные, был разработан инструмент в соответствии с рисунком 3.

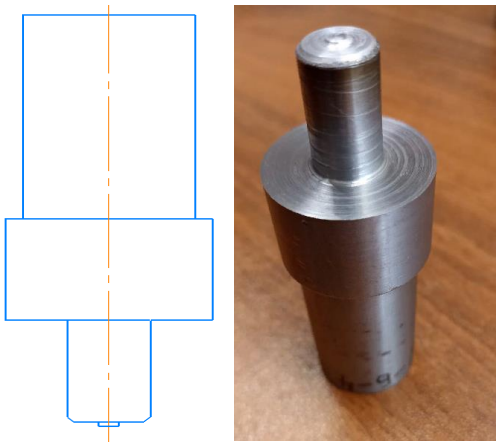


Рисунок 3 – Инструмент для СТП листов толщиной 1 мм из сплава АМг2М

Вторым этапом работ, было проведение экспериментов по СТП. В ходе данных работ проводилась оценка внешнего вида получаемых участков по ГОСТ ISO 25239-5-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю». Для определения степени воздействия инструмента на материал, было решено определить температуру при сварке, с помощью тепловизора Testo.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Для определения влияния режимов сварки на образование сварного соединения были проведены эксперименты на двух разных частотах вращения (1400 об/мин, 710 об/мин).

На рисунке 4 показаны образцы, на которых проводилась сварка трением с перемешиванием на режимах приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы сварки образцов

№ соед.	n, об/мин	v, мм/мин	l, мм	α, °
144	1400	200	0,115-0,12	0
145	1400	16	0,07-0,08	
147	1400	315	0,1-0,105	
148	710	315	0,1-0,105	
149	1400	100	0,1-0,105	
150	710	100	0,1-0,115	
151	710	16	0,1-0,115	
152	710	50	0,11-0,115	
153	1400	50	0,11-0,12	

Полученные сварные швы имеют значительные несплошности в зоне шва в виде углублений и вырывов металла. Перечисленные дефекты являются результатом

недостаточной пластической деформации свариваемого металла, создаваемой инструментом.

Рисунок 4 – Общий вид сварных швов 144,145,147,148-153

Средняя температура в процессе сварки составила 250-275 °С. На рисунке 5 представлен результат измерения.

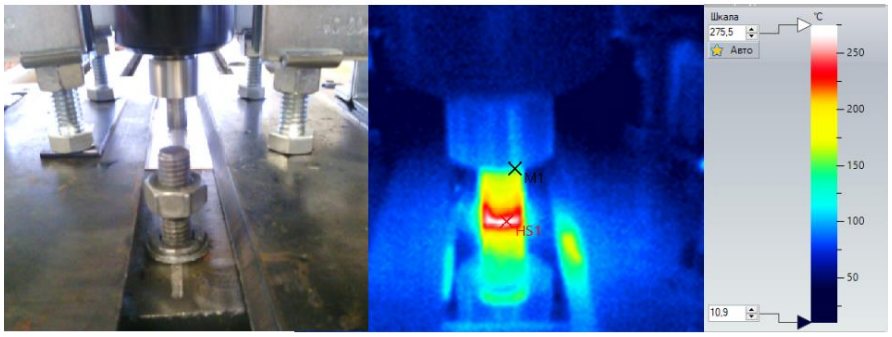


Рисунок 5 – Результаты измерения температуры образца 153

Для формирования физического контакта, необходимо повысить температуру. Было решено увеличить силовое обжимающее воздействии инструмента, путем увеличения глубины погружения.

В таблице 2 представлены режимы сварки с увеличенной глубиной погружения.

Таблица 2 – Режимы сварки образцов 155-157

№ соед.	n, об/мин	v, мм/мин	l, мм	α, °
155	1400	50	0,14-0,145	0
156	1400	16	0,14-0,145	
157	1400	50	0,1-0,115	
158	1400	50	0,1-0,12	

Чрезмерное увеличение глубины погружения инструмента приводит к утонению шва и образованию дефекта типа грат. На рисунке 6 представлены сваренные образцы.

Рисунок 6 – Общий вид сварных швов 155-157

Контроль температуры сварки показал небольшое (<20 °С) увеличение температуры сварки. Результаты показаны на рисунке 7.

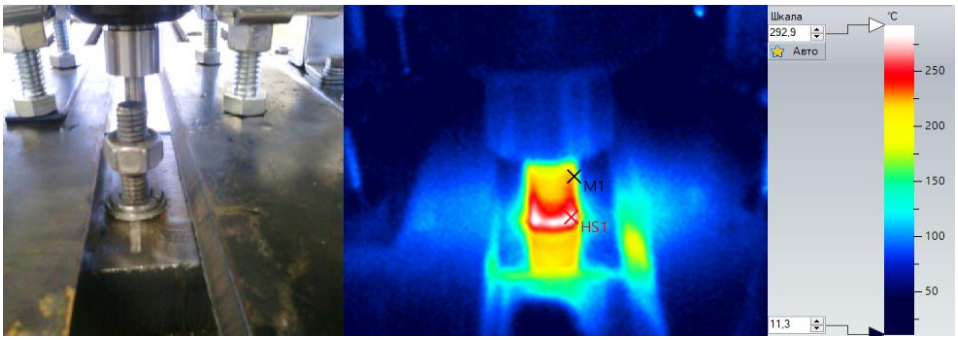


Рисунок 7 – Результаты измерения температуры образца №156

Для создания дополнительной пластической деформации сварного шва было решено создать наклон инструмента в 1º. В таблице 3 приведены режимы сварки с увеличенным углом наклона инструмента.

Таблица 3 – Режимы сварки образцов 159-162

№ соед.	n, об/мин	v, мм/мин	l, мм	α, °
160	1400	16	0,09	1
161	1400	200	0,145	
162	710	16	0,12	

Сварные швы, выполненные на режимах с частотой вращения 1400 об/мин имеют удовлетворительный внешний вид, на поверхности отсутствуют такие дефекты как надрывы, неровная поверхность шва, грубая чешуйчатость Результаты показаны на рисунке 8.

Рисунок 8 – Общий вид сварных швов 160-162

Измерение температуры в процессе сварки с углом наклона инструмента 1° показало увеличение температуры до 451°С.

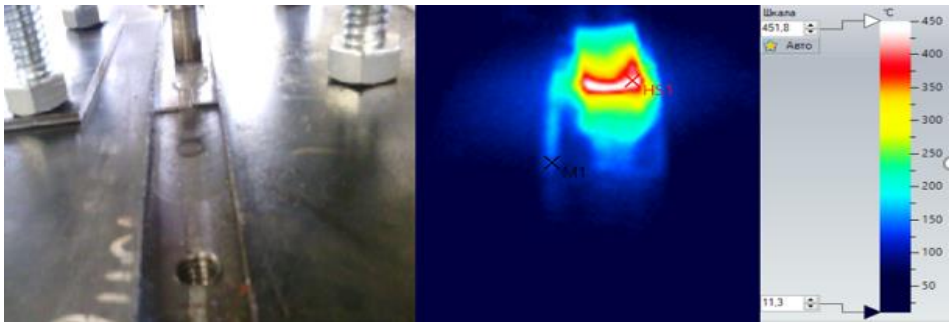


Рисунок 9 – Результаты измерения температуры образца №161

4. Выводы

Экспериментально установлено, что удовлетворительное соединение алюминиевого сплава АМг2М при СТП происходит в твердой фазе при температуре на лицевой поверхности соединения в зоне сварке 451°С. Изменение угла наклона инструмента с 0° на 1° позволяет увеличить температуру сварки с 250°С до 451°С.

Список литературы

1. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов; Отделение химии и наук о материалах РАН. – 2–е изд., доп. – М.: Наука, 2006. – 287 с
2. Котлышев Р.Р., Щучев К.Г., Крамской А.А. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т. 10, № 5 (48). – С. 648–653
3. Шугаипов Ш.Д., Кагарманов Э.И., Селиванов А.С., Лобачев В.С. Предотвращение тоннельного дефекта при сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава Амг4 толщиной 6 мм // Инновационное и цифровое машиностроение: Всероссийская научно-техническая конференция «состояние и перспективы развития сварочного производства России. – Уфа: УГАТУ, 2021
4. Mrunal Panchal, Devax Patel, Hardik Vyas, Kush Mehta. Ultra-thin friction stir welding on Aluminum alloy // Materials Today: Proceedings - Volume 26, Part 2, 2020, Pages 2888-2894
5. Schmidt H.B., Hattel J.H. Thermal modelling of friction stir welding // Scripta Materiala. – 2008. – Vol. 58. – P. 332–337
6. Карманов В.В., Каменева А.Л. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва, // Вестник ПНИПУ. – Аэрокосмическая техника, 2012. – № 32. – С. 67–8
7. Andrey Tsarkov, Konstantin Trukhanov, Igor Zybin. The influence of gaps on friction stir welded AA5083 plates // Materials Today: Proceedings - Volume 19, Part 5, 2019, Pages 1869-1874
8. R.Abrahams, J.Mikhail, Panahsadat Fasihi. Effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 5005-H34 and 7075-T651 aluminium alloys // Materials Science and Engineering: A - Volume 751, 28 March 2019, Pages 363-373.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

FEATURES OF THE FORMATION OF COPPER COMPOUNDS DURING FRICTION STIR WELDING

Атрощенко Валерий Владимирович1,
Atroshchenko V.V.
Логачев Юрий Владимирович1,
Logachev Yu.V.
Садрисламов Артем Радифович1,
Sadrislamov A.R.
Селиванов Алексей Сергеевич2,
Selivanov A.S.
Лобачев Владислав Сергеевич2
Lobachev V.S.

[1]Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет,
450008, Россия, г. Уфа, ул. Карла Маркса 12,
[2]ООО «Аттестационный центр СваркаТехСервис»,
450001, Россия, г. Уфа, ул. Пархоменко 155/1,
[1]Ufa State Aviation Technical University,
450008, Russia, Ufa, 12 K. Marx St.,
[2]LLC «Attestation Center SvarkaTechService»,
450001, Russia, Ufa 155/1 Parkhomenko Str.
e-mail: 91250@mail.ru, yuryk33@mail.ru, artem22sad@gmail.com, selivanov@naks-rb.ru, vladik1997okt@mail.ru

Аннотация: *Статья посвящена исследованию свойств сварного соединения меди марки М1, полученного методом сварки трением с перемешиванием (СТП). Приведены результаты испытаний на электропроводность, статическое растяжение и статический изгиб.*

Ключевые слова: *Сварка трением с перемешиванием, медь, заплечик, пин, режимы сварки.*

Abstract: The paper is devoted to the research of properties of M1 copper welded joint obtained by friction stir welding (FSW). The results of tests for electrical conductivity, static tensile and static bending are given.

Keywords: Friction stir welding, copper, shoulder, pin, welding modes.

1. Введение

Медь, благодаря высокой электро- и теплопроводности, сочетанию прочности и пластичности, а также коррозионной стойкости, находит применение в различных отраслях промышленности при изготовлении токоведущих деталей, электротехнических шин силового оборудования, различного технологического оборудования и других изделий [1].

Сварка меди традиционными способами сварки плавлением осложняется высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, значительным окислением при температуре плавления и склонностью к образованию трещин [2].

Одним из путей решения проблем, возникающих при сварке меди является применение способов сварки в твердой фазе, к которым относится сварка трением с перемешиванием.

Преимущества СТП - это возможность получения сварных соединенией с мелкозернистой структурой и малыми остаточными дефермациями, сварка разнородных материалов, в том числе неметаллических, полимерных и композитных [3-6].

Технологический процесс сварки трением с перемешиванием основан на формировании сварного соединения за счет тепловой энергии, возникающей в результате сил трения инструмента и соединяемых заготовок. В процессе сварки вращающийся инструмент погружается в заготовку и обеспечивает осевое сжимающее усилие на зону перемешивания, свариваемый материал под заплечиком нагревается, переходит в пластичное состояние и обтекает пин инструмента. Таким образом происходит перемешивание материалов заготовок и образуется сварной шов. [7-10]. Схема процесса приведена на рисунке 1.

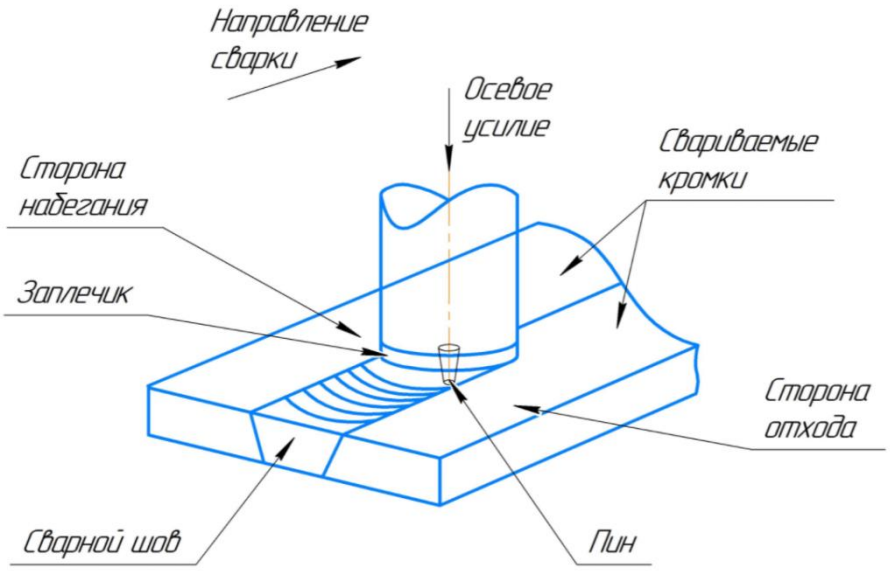


Рисунок 1 – Схема рабочего процесса сварки трением с перемешиванием

Целью работы является определение механических свойств и электропроводности сварных соединений из меди, полученных СТП.

2. Методика экспериментального исследования

В ходе экспериментальных исследований использовался модернизированный консольно-фрезерный станок с мощностью привода шпинделя 12 кВт. Для контроля перемещения инструмента использовались цифровые оптические линейки с точностью 0,005 мм. Режимы сварки указаны в таблице 1. Образцы для сварки изготавливались из меди марки М1 толщиной 5 мм. Для исключения краевых эффектов сварка выполнялась с применением входных и выходных планок.

Таблица 1 – Используемые параметры сварки

Скорость сварки, мм/мин	Частота вращения инструмента, об/мин	Угол наклона инструмента, ◦	Величина заглубления инструмента, мм
25	1120	2	0,47-0,49

Для испытаний на статическое растяжение использовалась испытательная машина ИР 6055-500-0. Испытания на статический изгиб проводились швом наружу и швом вовнутрь на прессе гидравлических испытаний ПИ модификации П-50. Методики испытаний соответствовали ГОСТ 6996-66.

Испытания на электросопротивление проводились с использованием микроомметра МИКО-21 для высокоточных измерений электрического сопротивления постоянному току.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Полученное сварное соединений представлено на рисунке 2. Видно, что наружные дефекты отсутствуют, а радиографический метод контроля показал отсутствие внутренних дефектов.

Рисунок 2 – Внешний вид сварного соединения

Из полученных сварных соединений изготавливались образцы для механических испытаний (рисунок 3).

На рисунке 4 показаны образцы сварных соединений и основного металла после испытаний на статическое растяжение. Видно, что разрушение образцов происходило по сварному шву. В силу того, что сварные соединения в токоведущих устройствах не подвергаются растягивающим усилиям, снижение временного сопротивление сварного соединения на 25% относительно основного металла (табл.1) не является критически значимым.

Рисунок 3 – Образцы для механических испытаний

Рисунок 4 – Образцы после испытания на статическое растяжение

На рисунке 5, показаны образцы для испытаний на статический изгиб (а-швом наружу; б-швом вовнутрь).

Результаты испытаний сварных соединений, основного металла, и требования ГОСТ 1173-2006, приведены в таблице 2.

Среднее значение электрического сопротивления сварного шва и зоны термического влияния по результатам измерений составило 5,205 мкОм, а основного металла 5,188 мкОм, увеличение сопротивления составило 0,3%, что свидетельствует о возможности применения СТП для получения соединений токопроводящих устройств.

а) б)

Рисунок 5 – Образцы после испытаний на статический изгиб

Таблица 2 – Результаты механических испытаний

	$\sigma_в$, МПа	δ_{10}, %	Угол изгиба α
Сварной шов	250	5	123°
Основной металл	313	6,25	-
ГОСТ 1173-2006	Не менее 290	Не менее 3	90°

Выводы

1.Установлено, что СТП принципиально позволяет получить сварные соединения меди без наружных и внутренних дефектов. При этом значения относительного удлинения сварного соединения и уголка изгиба соответствуют требованиям ГОСТ 1173-2006 и близки к значениям, полученным при испытании основого металла.

2.Испытания на растяжение показали, что временное сопротивление сварного соединение примерно на 25% ниже, чем у основного металла, что не является критически значимым для токоведущих устройств.

3.Электропроводность сварного шва, околошовной зоной и основного металла отличаются незначительно, увеличение сопротивления составило 0,3%.

Список литературы

1. Davis J R, Copper and Copper Alloys, ASM International (2001).
2. Lin J -W, Chang H -C, and Wu M -H, J Manuf Process 16 (2014) 296–304.
3. Singh, V.P., et al., Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review. Journal of Materials Research and Technology, 2020. 9(3): p. 6217-6256
4. Heidarzadeh, A., et al., Application of nanoindentation to evaluate the hardness and yield strength of brass joints produced by FSW: microstructural and strengthening mechanisms. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020. 20: p. 1-9
5. Zhang, H., et al., Improving the structure-property of aluminum alloy friction stir weld by using a non-shoulderplunge welding tool. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 87(1-4): p. 1095-1104
6. Akinlabi, E.T. and R.M. Mahamood, Introduction to Friction Welding, Friction Stir Welding and Friction Stir Processing, in Solid-State Welding: Friction and Friction Stir Welding Processes. 2020, Springer. p. 1-12
7. Zhang, Y., et al., Review of tools for friction stir welding and processing. Canadian Metallurgical Quarterly, 2012. 51(3): p. 250-261

8. Rai, R., et al., friction stir welding tools. Science and Technology of welding and Joining, 2011. 16(4): p. 325-342
9. Mishra, R.S. and Z. Ma, Friction stir welding and processing. Materials science and engineering: R: reports, 2005. 50(1-2): p. 1-78
10. Rai, R., et al., friction stir welding tools. Science and Technology of welding and Joining, 2011. 16(4): p. 325-342
11. Lee W -B, and Jung S -B, Mater Lett 58 (2004) 1041
12. Abdelaziz I.A, Review The Common Defect In Friction Stir Welding (2020).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

FEATURES OF FORMING STEEL JOINTS DURING FRICTION STIR WELDING

Атрощенко Валерий Владимирович[1],
Atroshchenko V.V.
Логачев Юрий Владимирович[1],
Logachev Yu.V.
Садрисламов Артем Радифович[1],
Sadrislamov A.R.
Селиванов Алексей Сергеевич[2],
Selivanov A.S.
Лобачев Владислав Сергеевич[2]
Lobachev V.S.

[1]Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет,
450008, Россия, г. Уфа, ул. Карла Маркса 12,
[2]ООО «Аттестационный центр СваркаТехСервис»,
450001, Россия, г. Уфа, ул. Пархоменко 155/1,
[1]Ufa State Aviation Technical University,
450008, Russia, Ufa, 12 K. Marx St.,
[2]LLC «Attestation Center SvarkaTechService»,
450001, Russia, Ufa 155/1 Parkhomenko Str.
e-mail: 91250@mail.ru, yuryk33@mail.ru, artem22sad@gmail.com, selivanov@naks-rb.ru, vladik1997okt@mail.ru

Аннотация: *Работа посвящена сварке трением с перемешиванием (СТП) углеродистой стали. Определены наиболее часто встречающиеся дефекты сварного шва, рекомендуемая форма и размеры инструмента. Спроектирован и изготовлен инструмент для СТП, установлены режимы при которых образуется качественное сварное соединение из Ст3 толщиной 3 мм.*

Ключевые слова: *Сварка трением с перемешиванием, сталь, заплечик, пин, режимы сварки.*

Abstract: The paper is devoted to friction stir welding (FSW) of carbon steel. The most common defects in the weld, the recommended shape and size of the tool have been determined. The tool for friction stir welding is designed and manufactured, modes are established at which qualitative welded joint is formed from Cm3 with thickness of 3 mm.

Keywords: Friction stir welding, steel, shoulder, pin, welding modes.

1. Введение

Сталь (Ст3) является одним из самых распространённых конструкционных материалов среди малоуглеродистых сталей. Она используется в основном для изготовления сварных конструкций в строительной, машиностроительной и нефтяной отраслях [1,2].

Целью исследования является разработка инструмента и определение режимов сварки, при которых образуется стыковое сварного соединение пластин из Ст3 толщиной 3,0 мм.

2. Описание метода и литературный обзор по сварке стали

Основными параметры процесса СТП являются: частота вращения инструмента $n(\omega)$, скорость сварки $V_{св}$, угол наклона инструмента α, глубина погружения инструмента l, или осевое усилие P_z, геометрические параметры инструмента.

В ходе исследования решались следующие задачи: выбор материала инструмента для СТП стали, определение формы и размеров инструмента для сварки, а также режимов сварки.

При СТП сталей, близких по составу с Ст3, установлено, что температура инструмента при сварке достигает 800-950 ºС [1].

К дефектам, наиболее часто возникающим в процессе СТП сталей относят ослабление сварного шва, возникающее вследствие заглубления заплечика в свариваемый материал; твердые включения (осколки рабочей части инструмента), заглаженный непровар, представляющий собой протяженную несплошность как внутри, так и на поверхности сварного шва [4].

При использовании инструментов с различной геометрией, предпочтение отдано инструменту с конической формой пина. Рекомендуемые диапазоны размеров рабочей части инструмента для сварки сталей с толщиной от 2 до 6,35 мм, следующие: диаметр пина 2,6-7,6 мм, длина пина 1,2-6,22 мм, диаметр заплечика 16,0-36,8 мм [5-10,12], диапазоны режимов сварки: $V_{св}$=1,7-60 мм/мин; α=0-3º; l= 0,05-2,3 мм [1,7,9,11,12].

В таблице 1 приведены основные характеристики конструкции инструментов для сварки сталей и сводные данные по применяемым режимам сварки.

Таблица 1 – Характеристики конструкции инструментов и применяемые режимы сварки

Источник	**Толщина пластин, мм**	**Материал инструмента**	**Длина пина, мм**	**Диаметр пина, мм**	**Диаметр заплечика, мм**	$V_{св}$, **мм/мин**	$n(\omega)$, **об/мин**
[1]	3	Корбид вольфрама с 7% кобальта	2,6	-	20	60	750
[2]	2	Поликристалический кубический нитрид бора (PCBN)	1,2	5,7	36,8	-	-
[3]	-	PCBN	3,7	7,6	24	25,4	500
[4]	2	WC	1,5	5	16	50	800
[5]	3	aWC	2,6	5,5	16	50	400,800
[6]	4	PCBN, WRe	3,62	-	36,8	-	-
[7]	-	PCBN	2	4.1	-	-	-
[8]	6,35	Вольфрамовый инструмент	6,22	7,9	19	-	-
[9]	3	PCBN	-	-	-	35	80, 100, 150, 200
[10]	-	Вольфрамовый инструмент	-	-	19	1,7	300, 500

На основании полученных данных сконструирован и изготовлен инструмент для сварки углеродистой стали толщиной 3,0 мм, представленный на рисунке 2.

Рис. 2. Инструмент для СТП сталей толщиной 3,0 мм

Рабочая часть инструмента выполнена из сплава ВК8.

3. Экспериментальные исследования

Для исследования особенностей формирования соединений стали при СТП проводилась сварка плоских образцов из Ст3 толщиной 3 мм при частоте вращения инструмента n=560 об/мин, скорости сварки v=40 мм/мин, угле наклона инструмента 1° и величине заглубления заплечика 0,2 мм.

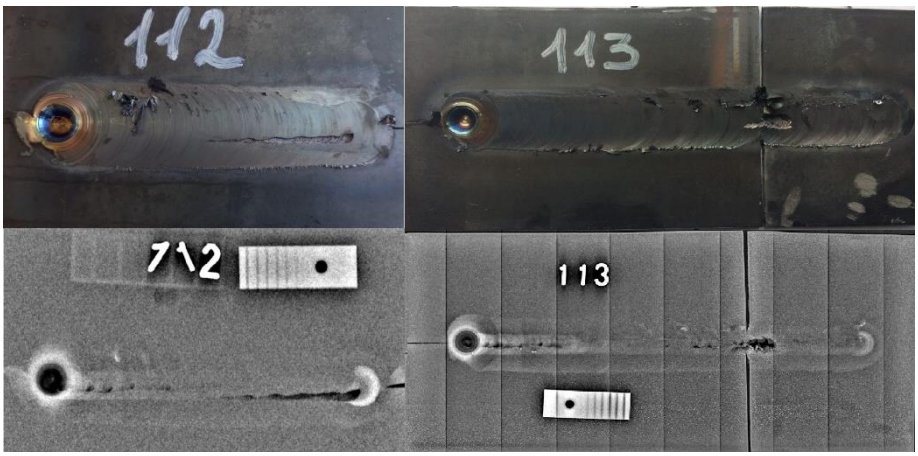


Рис.3. Сварные соединения и их рентгенографические снимки

В результате были получены сварные соединения, представленные на рисунке 3.

На образце 112 в начале шва наблюдается дефект в виде несплавления, вследствие недостаточного разогрева металла посредствам трения инструмента. Для исключения указанного дефекта применили вводную планку на которой инструмент нагревается до необходимой температуры.

С применением вводной планки при сварке образца 113 количество дефектов в начале шва уменьшилось. Центральная часть образца имеет участок без дефектов, однако при выполнении сварки на конечном участке образца началось активное разрушение рабочей части интрумента, с образованием внутренних дефектов. Инструмент с изношенной рабочей частью представлен на рисунке 4.

Рис.4. Инструмент с изношенной рабочей частью

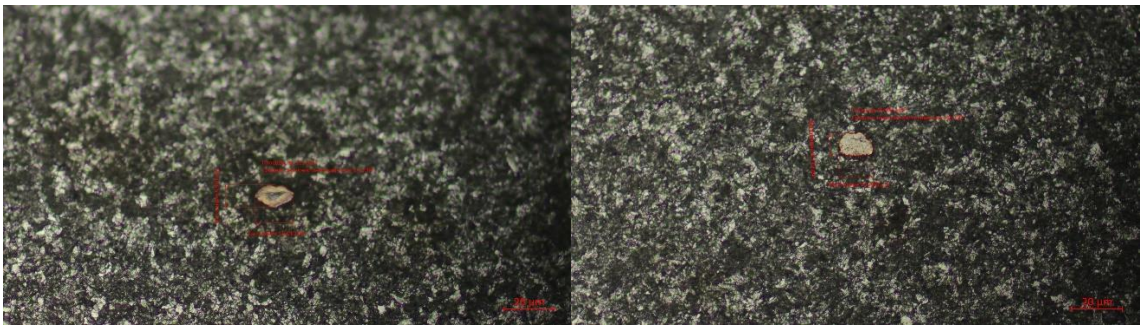


Рис.5. Микрошлифы с включениями карбида вольфрама

По фотографиям микрошлифов соединений видно, что в сварном шве обнаруживаются включения карбида вольфрама (рис.5). На основании полученых экспериментальных даных спроектирован инструмент с пином из вольфрама WL15, обезпечивающий бездефектную сварку на установленных режимах.

4. Выводы

1.Получены сварные соединений Ст3 толщиной 3 мм при следующих режимах сварки: частота вращения инструмента n=560 об/мин, скорость сварки v=40 мм/мин, угол наклона инструмента 1˚, величина заглубления заплечика 0,2 мм.

2.Применение твердого сплава ВК8 в качестве материала инструмента не обеспечивает его длительную работоспособность при сварке сталей. Для обеспечения длительной работоспособности при СТП спроектирован инструмент с пином из вольфрама WL15.

Список литературы

1. И. К. Черных, Е. В. Васильев, А. Н. Абакумов, Н. В. Захарова, К. А. Синогина. Разработка технологии сварки трением с перемешиванием листов из стали Ст3 // IV International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update", 2020. № 5. С. 306-313.

2. Е. И. Ткаченко, А. С. Лукин, Д. А. Прошутинский. Разработка инструмента для сварки трением с перемешиванием конструкционных, нержавеющих сталей и титановых сплавов // IV International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update", 2020. № 5. С. 548-552.

3. Anmol Bhatia, Reeta Wattal. Friction stir welding of carbon steel: Effect on microstructure and tensile strength // Materials Today: Proceedings, 2019. №18. PP. 498-503.

4. Hoon-Hwe Cho, Heung Nam Han, Sung-Tae Hong, Jong-Hwan Park, Yong-Jai Kwon, Seok-Hyun Kim, Russell J. Steel. Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel // Materials Science and Engineering A, 2011. T.528 №25. PP. 2889-2894.

5. G.R. Argade, S. Shukla, K. Liu, R.S. Mishra. Friction stir lap welding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion properties // Journal of Materials Processing Technology, 2018. №14. PP. 320-347.

6. T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, T. Shibayanagi, K. Ikeuchi, H. Assadi. On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel // Materials Science and Engineering A, 2010. T.527 №24. PP. 6484-6488.

7. M. Jafarzadegan, A.H. Feng, A. Abdollah-zadeh, T. Saeid, J. Shen, H. Assadi. Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel // Materials Characterization, 2012. №74. PP. 28-41.

8. Manish P. Meshram, Basanth Kumar Kodli, Suhash R. Dey. Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steel by PCBN Tool and Its Joint Analyses // Procedia Materials Science, 2014. №6. PP. 135-139.

9. S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, H. Inoue, S. Tsuge. Structural response of superaustenitic stainless steel to friction stir welding // Acta Materialia, 2011. T.59 №14. PP. 5472-5481.

10. R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert, T. Debroy. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel // Acta Materialia, 2007. T.55 №6. PP. 883-895.

11. VSM Ramakrishna R, K Bhanu Sankara Rao, G. Madhusudan Reddy, Jai Prakash Gautam. Friction stir welding of advanced high strength (bainitic) steels for automotive applications // Materials Today: Proceedings, 2018. №5. PP. 17139-17146.

12. A.P. Reynolds, Wei Tang, T. Gnaupel-Herold, H. Prask. Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds // Scripta Materialia, 2003. №48. PP. 1289-1294.

ГАЗОДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА

GAS DETONATION SPRAYING OF POWDER SHS-MATERIALS BASED ON TITANIUM ALUMINIDES

Собачкин Алексей Викторович[1],
Sobachkin A.V.
Попова Анастасия Александровна[1],
Popova A.A.

[1]Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
656038 г. Барнаул, пр. Ленина, 46
[1]Polzunov Altai State Technical University
656038 Barnaul, Lenin Avenue, 46
e-mail: anicpt@rambler.ru

Аннотация: *В работе подобраны оптимальные режимы детонационно-газового напыления для порошковых СВС-материалов на основе MAX-фаз системы Ti-Al-C. Рациональным режимом детонационно-газового напыления следует считать стехиометрическое соотношение рабочих газов, дистанция напыления 100 мм. Рентгенофазовый анализ газодетонационных покрытий показал наличие MAX-фаз Ti_2AlC, Ti_3AlC_2 и небольшого количества TiC. Величина шероховатости полученных покрытий составляет от Ra 3,56 до Ra 11,28.*

Ключевые слова: *детонационно-газовое напыление, MAX-фазы, титан, алюминий, углерод, шероховатость, покрытие.*

Abstract: The optimal modes of detonation-gas spraying for powder SHS materials based on MAX-phases of the Ti-Al-C system are selected in the work. The stoichiometric ratio of working gases, the spraying distance of 100 mm, should be considered as a rational mode of detonation-gas spraying. X-ray phase analysis of gas detonation coatings showed the presence of MAX-phases Ti_2AlC, Ti_3AlC_2 and a small amount TiC. The roughness of the obtained coatings ranges from Ra 3.56 to Ra 11.28.

Keywords: detonation-gas spraying, MAX-phases, titanium, aluminum, carbon, roughness, coating.

Введение

Надежность работы механизмов и машин во многом обусловлена долговечностью рабочих поверхностей и ремонтопригодностью ответственных деталей. Эффективным средством повышения долговечности и ремонтопригодности производимых агрегатов являются технологии, основанные на нанесении покрытий.

Нанесение покрытий на рабочие поверхности деталей позволяет сэкономить дефицитные материалы, значительно повысить эксплуатационные показатели машин, продлить срок службы новых и восстановленных деталей, сократить затраты на изготовление запасных частей.

В последние годы для нагрева и ускорения наносимых порошковых материалов все шире применяются импульсные источники энергии, в частности, энергии взрыва смесей горючих газов с окислителями. Метод, использующий эту энергию, получил название детонационно-газового напыления (ДГН) [1, 2].

Опыт зарубежных исследователей (корпорация «Union Carbide», США) показывает, что детонационное напыление позволяет значительно повысить срок эксплуатации деталей, например, авиадвигателей, путем применения элементов термической и газо-абразивной защиты с покрытиями.

В качестве материалов для получения покрытий используют металлы и их сплавы, твердые сплавы, оксиды металлов и композиционные порошки. Производство различных материалов для напыления активно развивается и позволяет получить целый спектр покрытий. Например, алюмокерамические композиты все больше используются в качестве конструкционных и функциональных материалов, например, в таких отраслях промышленности как автомобильная, аэрокосмическая и др. Основные свойства таких материалов обеспечиваются (помимо алюминиевой матрицы) керамическим упрочнителем. В связи с этим в современном материаловедении большой интерес вызывает новый вид тугоплавких соединений – так называемые MAX-фазы. Они представляют собой тройные соединения, отвечающие формуле $M_{n+1}AX_n$, где M – переходный металл; A – элемент IIIA или IVA группы системы Менделеева; X – углерод и/или азот [3].

Как металлы MAX-фазы обладают отличной тепло- и электропроводностью, хорошей стойкостью к тепловым ударам. Как керамика эти соединения имеют высокий модуль упругости, низкий коэффициент теплового расширения, отличную тепло- и жаростойкость. Кроме того, MAX-материалы хорошо сопротивляются механическим повреждениям: механические повреждения (микротрещины, микроразрывы и т.п.) локализуются в каком-либо определенном зерне, что приводит к замедлению макроскопического разрушения изделия в целом.

Более того, уникальные свойства MAX-фаз сохраняются даже при высоких температурах: так, показатели прочности MAX-фаз при циклических деформациях при температурах порядка 1000 °C зачастую выше циклической долговечности многих используемых жаропрочных материалов на основе никеля и интерметаллидных сплавов. Принимая во внимание также низкие удельные характеристики и низкий коэффициент трения MAX-фаз, можно сделать вывод, что этот вид легкообрабатываемой конструкционной керамики можно применять в различных отраслях машиностроения, прежде всего, для техники, работающей в экстремальных условиях [4].

Среди множества MAX-фаз, полученных на текущий момент, наибольший интерес по уровню свойств представляют MAX-фазы на основе титана (Ti_2AlC, Ti_2AlN, Ti_3AlC_2, Ti_3SiC_2), особый интерес представляют MAX-фазы в системе Ti-Al-C, поскольку они обладают некоторой пластичностью при сжатии при комнатной температуре [5].

В этой связи целью настоящей работы является изучение процесса детонационно-газового напыления MAX-фаз системы Ti-Al-C.

Методика экспериментального исследования

В качестве шихты для детонационно-газового напыления использовался порошок, полученный при реализации высокотемпературного синтеза в механоактивированной смеси состава 80% Ti + 12% Al + 8% C. Выбор этого состава обусловлен получением MAX-фаз Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 после реализации СВС [6-8]. После синтеза порошок измельчался, и для напыления использовалась фракция 63…100 мкм.

Напыление проводилось на установке детонационно-газового напыления «Катунь М». «Катунь М» предназначена для нанесения покрытий из порошковых материалов на рабочие поверхности различных изделий с целью придания им качественно новых свойств

по сравнению с исходным материалом. В качестве детонирующего состава используется пропан-бутан – кислородная смесь. Установка находится в изолированном, вентилируемом боксе для защиты оператора от воздействия ударных волн и предотвращения возможных чрезвычайных ситуаций, связанных с возможностью самовоспламенения горючих газов.

Результаты и обсуждение

При выборе режимов детонационно-газового напыления одним из критериев является толщина напыляемого покрытия. Для этого фиксировали число циклов напыления (100) и определяли толщину сформированного за это время покрытия.

Одним из параметров работы УДГН является соотношение рабочих газов. Для определения рационального соотношения рабочих газов оставляли постоянным расход кислорода (определяемый по ротаметру), а расход пропан-бутановой смеси варьировали для создания окислительного, восстановительного или стехиометрического пламени. Результаты определения толщины по 5 образцам занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Зависимость толщины покрытия от соотношения рабочих газов

Соотношение газов	Толщина покрытия, мкм
70 % кислород / 30 % пропан-бутан (окислительное пламя)	80…120
50 % кислород / 50 % пропан-бутан (стехиометрическое соотношение)	170…220
30 % кислород / 70 % пропан-бутан (восстановительное пламя)	150…190

Исходя из полученных данных, рациональным режимом напыления следует считать 50 % кислород / 50 % пропан-бутан (стехиометрическое соотношение газов).

Для этого режима напыления были проведены эксперименты по определению рациональной дистанции напыления. Критерием также выбрана толщина формируемого покрытия. Проводилось изменение дистанции от среза установки детонационного-газового напыления до образца в диапазоне 50…150 мм с шагом 25 мм. По результатам 5 измерений уставлено, что дистанция напыления, равная 100 мм, обеспечивает формирование покрытия толщиной порядка 200 мкм.

Исходя из этого, рациональным режимом детонационно-газового напыления MAX-фаз системы Ti-Al-C следует считать стехиометрическое соотношение рабочих газов, дистанция напыления 100 мм. Число циклов напыления должно определяться требуемой толщиной покрытия конкретного изделия.

Характерная дифрактограмма полученного покрытия представлена на рисунке 1.

Из дифрактограммы видно, что основные фазы идентифицируются в покрытии, т.е. перешло наследование фазового состава исходной шихты для напыления. Дифрактограммы покрытий являются типичными для покрытий, полученными газовой детонацией.

Исследование топологии поверхности полученного покрытия, проведенное с помощью VEECO (WYKO) NT 9080, показало, что величина шероховатости составляет от Ra 3,56 до Ra 11,28, в связи с чем возможно появится необходимость в финишных операциях для получения требуемых значений шероховатости (в зависимости от изделия).

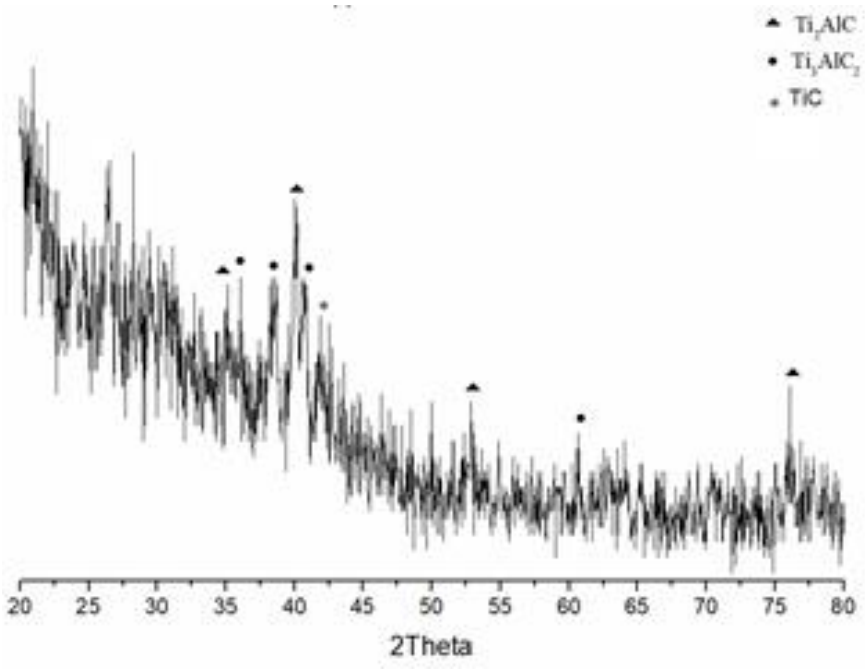


Рисунок 1 – Дифрактограммы покрытия, напыленного СВС-порошком из состава 80% Ti + 12% Al + 8% C

Выводы

1. В качестве шихты для детонационно-газового напыления использовался порошок, полученный при реализации высокотемпературного синтеза в механоактивированной смеси состава 80% Ti + 12% Al + 8% C. После синтеза порошок измельчался, и для напыления использовалась фракция 63…100 мкм. Рациональным режимом детонационно-газового напыления следует считать стехиометрическое соотношение рабочих газов, дистанция напыления 100 мм. Число циклов напыления должно определяться требуемой толщиной покрытия конкретного изделия.

2. Дифрактограммы покрытий, полученных при напылении порошков после СВС в составе 80% Ti + 12% Al + 8% C, являются типичными для покрытий, полученными газовой детонацией. Идентифицируются MAX-фазы Ti_2AlC, Ti_3AlC_2, небольшое количество TiC.

3. Величина шероховатости, определенная VEECO (WYKO) NT 9080, составляет от Ra 3,56 до Ra 11,28, потому после напыления в зависимости от изделия может потребоваться финишные операции по обработке покрытия

Список литературы

1. Tracton A. A. Coatings Technology Handbook. 3th Edition. CRC Press. 2007. 936 p.

2. Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 215 с.

3. Радишевский В. Л., Лепакова О. К., Афанасьев Н. И. Синтез, структура и свойства MAX-фаз Ti_3SiC_2 и Nb_2AlC // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2015. № 1. С. 33–38.

4. Сметкин А. А., Майорова Ю. К. Свойства материалов на основе MAX-фаз (обзор) // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17. № 4. С. 120–138.

5. Федотов А. Ф., Амосов А. П., Латухин Е. И., Ермошкин А. А., Давыдов Д. М. Влияние газифицирующих добавок на фазовый состав продуктов горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе MAXфаз в системе Ti-C-Al //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6. С. 50–55.

6. Sobachkin A. V., Sitnikov A. A., Myasnikov A. Y. Effect of mechanical activation and gamma-irradiation on structural-phase state of Ti-Al-C powder reagents // Defect and Diffusion Forum. 2021. V. 410. P 674–679.

7. Sobachkin A. V., Myasnikov A. Yu., Sitnikov A. A., Loginova M. V., Yakovlev V. I., Gradoboev A. V. Features of high-temperature synthesis in mechanoactivated gammairradiated mixtures of triple systems Ti-Al-C and Ti-Al-Nb // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1100. P. 012046.

8. Собачкин А. В., Мясников А. Ю., Ситников А. А. Влияние темпа нагрева на процесс высокотемпературного синтеза в системе Ti-Al-C // Инновационные технологии в машиностроении : сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. Томск, 2021. С. 35–38.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ AL_2O_3 НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ БРОНЗЫ БРАЖ9-4 ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКОЙ

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MODIFICATION BY AL_2O_3 NANOSIZED PARTICLES ON THE FORMATION OF A DEPOSITED LAYER OF BRAZH9-4 BRONZE BY PLASMA-POWDER WELDING

Князьков Константин Викторович[1,2]
Knyaz'kov K.V.
Князьков Виктор Leonidovich[1,2]
Knyaz'kov V.L.

[1]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]ООО «Кузбасский центр сварки и контроля»,
650040, Россия, Кемерово, ул. Радищева, 1Б
[1] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
650000, Russia, Kemerovo, Vesennyaya Str., 28
[2]OOO Kuzbass Centre for Welding and Quality Control,
650055, Russia, Kemerovo, Radishev str., 1B
e-mail: koss233@gmail.com

Аннотация. *Представлены результаты сравнительных исследований влияния на формирование наплавленного слоя плазменно-порошковой наплавки порошковым материалом с использованием модификатора в виде наноразмерных частиц Al_2O_3 и без модификатора. Установлено, что введение модификатора привело к измельчению структуры материала, увеличению твердости.*

Ключевые слова: *плазменно-порошковая наплавка, бронза, наноразмерные частицы, модифицирование.*

Abstract. The results of comparative studies of the influence on the formation of the deposited layer of plasma-powder surfacing with powder material using a modifier in the form of Al_2O_3 nanoparticles and without a modifier are presented. It was established that the introduction of the modifier led to a refinement of the material structure and an increase in hardness.

Key words: plasma-powder surfacing, bronze, nanosized particles, modification.

Введение

В современном промышленном производстве увеличение производительности труда связано с повышением технических характеристик машин и механизмов, предельные значения которых ограничены свойствами материалов. Поэтому повышение свойств материалов предоставляет новые возможности для проектирования более совершенных деталей машин.

Бронза БрАЖ9-4 относится к самым недорогим и доступным маркам бронз, поскольку совершенно не содержит дорогостоящего олова. При этом по своим качественным характеристикам она не уступает оловянным бронзам, превосходно прессуется и куется под давлением, а также противостоит трению и коррозии. В связи с этим, бронза БрАЖ9-4 – популярный заменитель оловянных бронзовых сплавов БрОЦ, БрОЦС, массово используемый в авиационной и машиностроительной промышленностях.

Бронза марки БрАЖ9-4 изготавливается из медного сплава, содержащего присадки алюминия и до 2-4% примесей железа. Остальная часть сплава приходится на долю меди, но по действующим стандартам ГОСТ 493-54 в нем допускается незначительное содержание других примесей (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав материала БрАЖ9-4, %.

Fe	Si	Mn	P	Al	Cu	Pb	Zn	Sn	Примесей
2 - 4	до 0.1	до 0.5	до 0.01	8 - 10	84.3 - 90	до 0.01	до 1	до 0.1	всего 1.7

Образующаяся на ее поверхности оксидная пленка позволяет ей противостоять коррозии в активных влажных или газовых средах. Легирующие добавки железа, оказывают положительное влияние на структуру бронзового сплава, повышают его износостойкость, прочность и устойчивость к истиранию. Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$ = 400-500 МПа, твердость составляет HV = 110-130.

В настоящее время актуальность улучшения за счет модификации существующих материалов по механизму внесения добавок, является очень актуальным направлением в силу множества открытых новых свойств и увеличения показателей существующих. Так в работах [1-9] показано, что внесение различных добавок влияет как на химический состав, структурно-фазовое состояние материалов, а также изменение балла зерна. Особыми результатами можно считать формирование фаз дальнего порядка [10], образование более сложных фаз в виде систем состоящих из трех и более элементов [11-12].

Во многих технологиях изготовления деталей машин существуют процесс нанесения специальных покрытий наплавкой, при которых рабочие поверхности приобретают свойства защищающие от абразивного, кавитационного, коррозионного и других износов.

При внесении модификатора в наплавочный материал ставилась цель получения антифрикционного покрытия, имеющего повышенную твердость и высокие антифрикционные свойства, поэтому в качестве основы выбран порошок бронзы ПГ-БрАЖ-9-4 фракция 40-63 мкм предназначенный для плазменно-порошковой наплавки. В качестве упрочняющей фазы применялись наноразмерные частиц Al_2O_3.

Перед использованием наноразмерых частиц Al_2O_3 выполнялось их исследование в части чистоты и действительной размерности. Определение размеров и чистоты частиц проводилось в лаборатории физики Томского архитектурно-строительного университета методом просвечивающей электронной микроскопии с помощью угольных реплик. Просмотр угольных реплик, на которые осаждались исследуемые порошки, осуществлялся на электронном микроскопе ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ и рабочих увеличениях в колонне микроскопа от 25000 до 80000 крат.

Измерение размеров частиц проводилось по методу случайных секущих. Было измерено ~500 частиц. Средний размер частиц определялся по гистограмме (распределению частиц по размерам), представленной на рис.1.

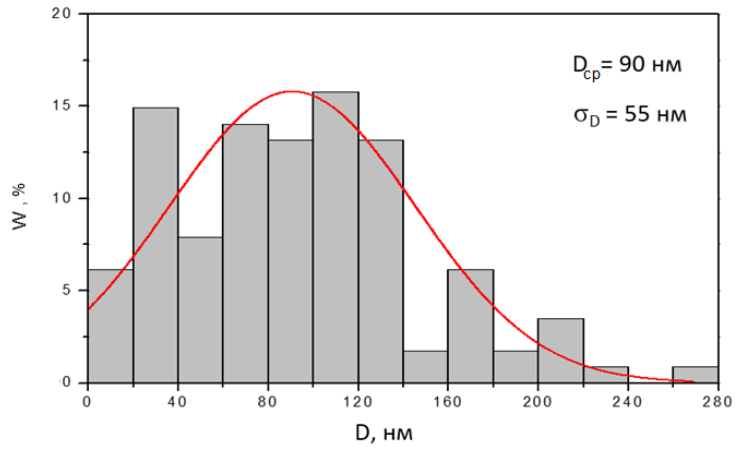


Рисунок 1 – Гистограмма распределения частиц AL_2O_3 по размерам

Из рисунка видно, что средний размер частиц (<D> = 90 нм) не является наиболее вероятным значением. Как следует из распределения, наиболее вероятными значениями являются интервалы значений 20–40 нм и 100–120 нм. Обнаружено, что количество частиц, имеющих размеры <20 нм, составляет ~6%.

Примеры изображений частиц, полученных при увеличении в колонне микроскопа 25000 крат, представлены на рисунке 2.

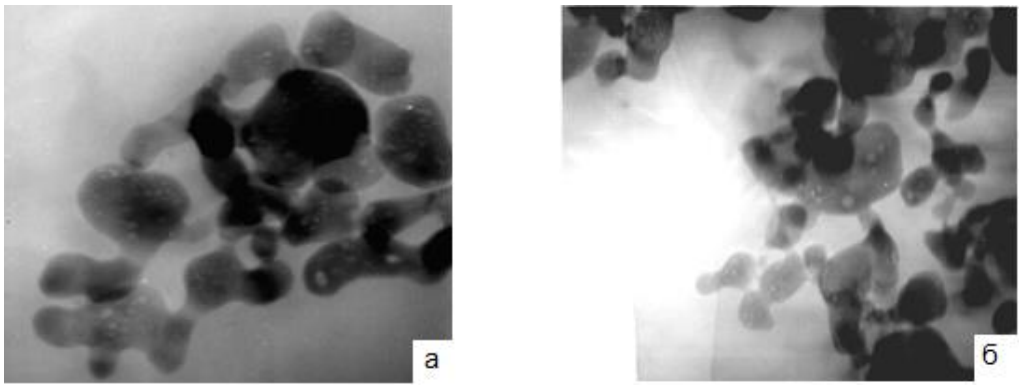


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение частиц Al_2O_3:
а) агломерат размером 200 нм; б) участок скопления частиц на площадке в 500 нм

Из рис. 2 а, б видно, что все частицы, во-первых, обладают округлой формой и, во-вторых, частицы присутствуют только группами. При этом плотность частиц в группе может быть так велика, что такая группа может быть принята за отдельную частицу,

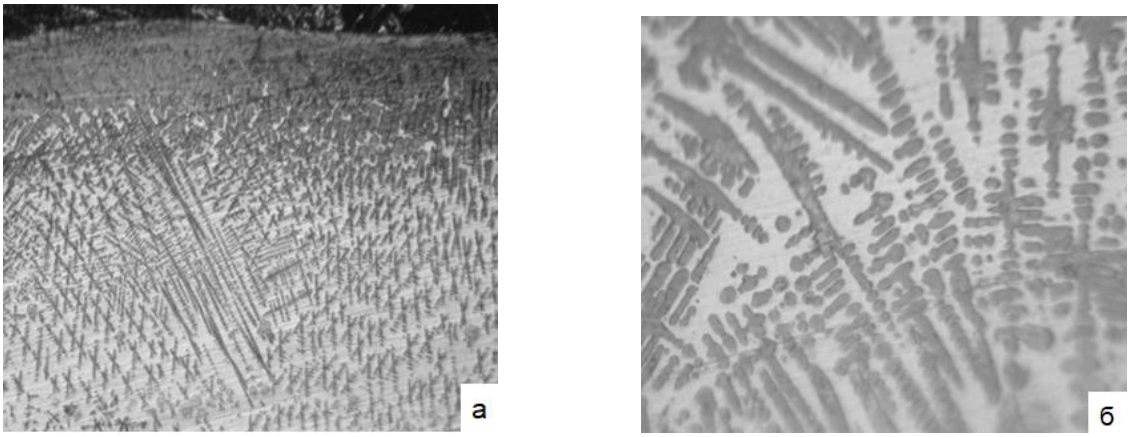
Однако доказательством того, что это не отдельная частица, а группа частиц, служит тот факт, что края агломерата частиц имеют волнистый вид, а не идеальный овал, как на отдельных частицах, представленных на рис.2 б.

Для проведения исследования влияния модификатора на основной наплавляемый материал были выполнены образцы наплавок плазменно-порошковой наплавкой на установке УПН-303. Образцы выполнялись на одинаковых режимах наплавки. Выбор выполнялся по минимальному проплавлению основного металла, сварочно-технологическим свойствам, качеству формирования наплавленных валиков. Также наплавка выполнялась с различным содержанием модификатора в наплавляемом порошке. По результатам выполнения наплавок было определено, что рациональное содержание составляет порядка 5 вес. %. Уменьшение количества упрочняющих частиц Al_2O_3 менее 5 вес. % снижает твердость наплавляемого покрытия. Увеличение количества упрочняющих

частиц выше 5 вес. % ухудшает жидкотекучесть, это приводит к снижению технологических свойств металлокерамического наплавочного материала и препятствует равномерному распределению упрочняющей фазы в наплавленном поверхностном слое.

После выполнения образцов наплавок выполнялось исследование микроструктуры полученной в образцах без модификатора и с модификатором. Изображения микроструктуры представлены на рисунках 3 и 4.

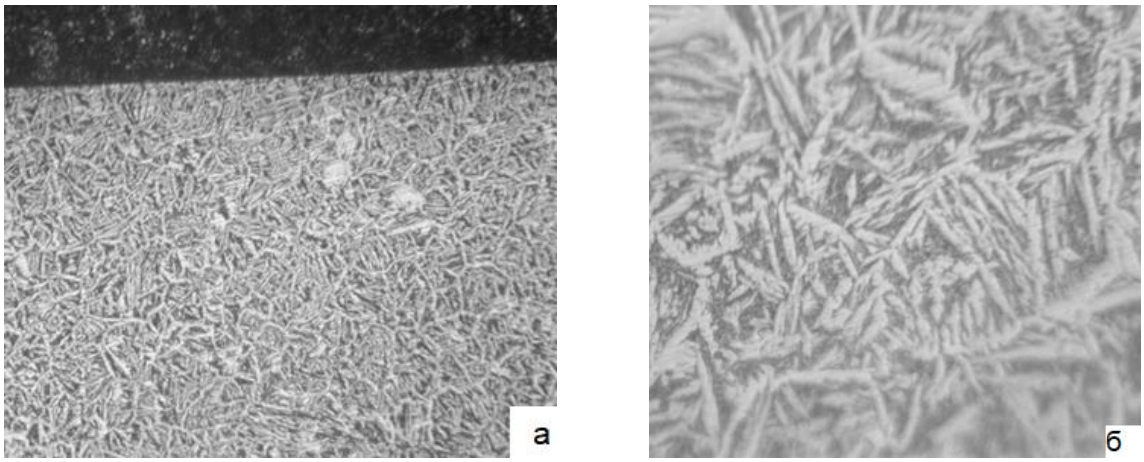
Структура в обоих случаях представляет собой сложнолегированные алюминиевые бронзы из зерен твердого раствора α-фазы (светлый фон), эвтектики α+γ (темный фон), что видно на рисунках 3б и 4б. Так же присутствуют не ярко выраженные точеные включения железа (точечный темный фон). Общее формирование структуры дендритное. Дендриты обогащены более тугоплавким компонентом, а меж дендритные объемы – более легкоплавким. Отличием является снижение игольчатости в структуре образца с модификатором, уменьшением двойников, более равномерным распределением твердой фазы имеющей меньшую размерность и большую разорентированность дендритов. Данные изменения указывают на одновременное сохранение пластичности в различных плоскостях деформации, а также увеличение распределения твердых фаз отвечающих за твердость сплава. Так же необходимо заметить характер роста дендритов у зоны сплавления. В образце с модификатором явно присутствует рост дендритов равномерно от самой зоны сплавления, что не наблюдается в образце без модификатора. Данный эффект может реализовывать большую прочность слоя у зоны сплавления, а также необходимо учесть что дендритная структура частично состоит их железа, что при наплавке на углеродистые и низкоуглеродистые стали на основе железа благоприятно сказывается на прочности сцепления между основным металлом и наплавленным слоем.



× 100 × 500

Рисунок 3 – Структура контрольного образца плазменно-порошковой наплавки слоя алюминиевой бронзы ПГ-БрАЖ-9-4

При испытаниях на твердость полученных образцов было установлено, что микротвердость образцов с модификатором более равномерно распределена от зоны сплавления к поверхности наплавленного слоя рисунок 5а. Значения микротвердости образца без модификатора находится в пределах H_{50} = 419-500 кгс/мм^2, темная фаза, H_{50} = 328-421 кгс/мм^2. Значения микротвердости образца с модификатором составляет H_{50} = 549-746 кгс/мм^2 темная фаза, H_{50} = 356-426 кгс/мм^2 светлая фаза. Изображение участка микроструктуры наплавленного слоя с модификацией Al_2O_3 представлено на рисунке 5б.



× 100 × 500

Рисунок 4 – Структура образца плазменно-порошковой наплавки слоя наплавленного смесью алюминиевой бронзы ПГ-БрАЖ-9-4 и наноразмерных частиц Al_2O_3

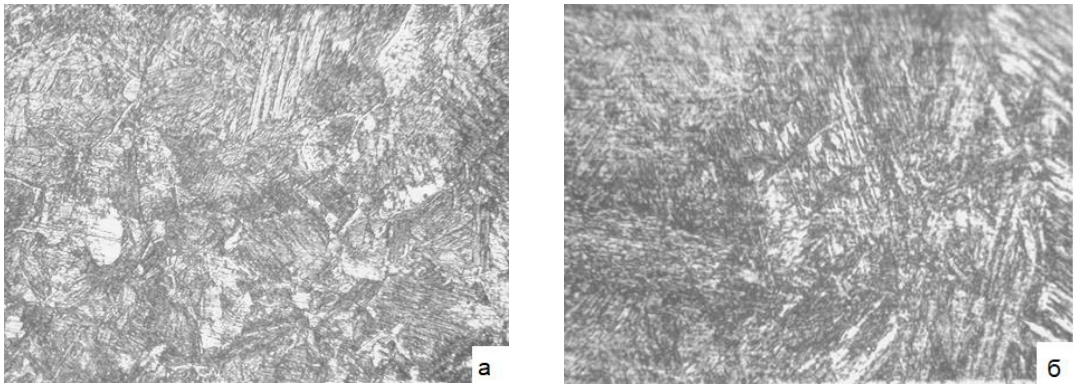


Рисунок 5 – Микроструктура участков образцов для измерения микротведости:
а – наплавленного слоя без модификатора, б – наплавленного слоя с модификатром

Твердость наплавленного слоя бронзы без армирования составляет 110-130HV (среднее значение ~20HRC), за счет армирования наноразмерными частицами корунда Al_2O_3 твердость (в пересчете по шкале Роквелла возрастает до 48HRC).

Выводы:

1. Установлено, что размеры дендритов в структуре модифицированного образца имеют разориентированный характер и равномерно распределены по объему наплавленного слоя.
2. Рентгеноструктурным анализом установлено наличие в объеме наплавки 1,5% наноразмерных частиц Al_2O_3, что указывает на возможность получения методами плазменно-порошковой наплавки композиционного материала Бронза-корунд с новым типом структуры и свойствами.
3. Доказано, что внесение модификатора приводит к перераспределению структуры слоя и вызывает образование скоплений промежуточной фазы на границах дендритов.
4. Подтверждены предположения о повышении твердости модифицированного слоя бронзы.

Список литературы

1. Гольдштейн, Я. Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и сталей / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.

2. Трошков, А. С. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / А. С. Трошков // ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ. – 2009. – №2. – С. 72-75

3. Зорин, И. В. Исследование структуры и свойств наплавленного алюминида никеля Ni3Al, легированного нанодисперсными карбидами вольфрама / И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак // ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. – 2012. – №2. – С. 21-27

4. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г. Н. Соколов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – №6. – С. 18-25.

5. Кривоносова, Е. А. Модифицирование и формирование структуры металла сварных швов низкоуглеродистых сталей: дис. … докт. техн. наук: 05.03.06 / Кривоносова Екатерина Александровна. – Пермь. – 2005. – 266 с.

6. Оценка влияния способа ввода модифицирующей добавки в покрытие электрода на их сварочно-технологические свойства и механические свойства металла шва / Урбанович Н.И., Бендик Т.И., Барановский К.Э., Розенберг Е.В. // Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 119-123.

7. Исследование влияния ультрадисперсных частиц Al_2O_3 на структуру и свойства наплавленного металла/ Шекшеев М.А., Сычков А.Б., Емелюшин А.Н., Михайлицын С.В. / Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. 2020. С. 214.

8. Наномодифицирование в процессах сварки и наплавки/ Ташев П.Ч., Алексиев Н.Л., Манолов В.К., Черепанов А.Н.// Исследования наукограда. 2017. Т. 1. № 1 (19). С. 16-21.

9. Технология изготовления и сварка конструкций из алюминиевых сплавов электродами, содержащими нанопорошки/ Крушенко Г.Г.// Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2015. Т. 16. № 3. С. 735-742.

10. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов/ Калашников И.Е.// Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской Академии Наук. Москва, 2011

11. Влияние модифицирования на устойчивость кристаллической решетки аустенита в нержавеющей стали/ Курзина И.А., Потекаев А.И., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., и др.// Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61. № 4 (724). С. 99-105.

12. Влияние нанодисперсных частиц Al_2O_3 на структурно-фазовое состояние покрытий системы NI-CR-B-SI-FE/WC, полученных плазменно-порошковой наплавкой/ Смирнов А.Н., Князьков В.Л., Радченко М.В., и др.// Сварка и диагностика. 2012. № 5. С. 32-37.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ТЕПЛОСТОЙКИМИ СПЛАВАМИ

APPLICATION OF A COMPLEX OF HARDENING TECHNOLOGIES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF PLASMA SURFACING WITH HEAT-RESISTANT ALLOYS

Малушин Николай Николаевич[1],
Malushin N. N.
Громов Виктор Евгеньевич[1],
Gromov V.E.
Романов Денис Анатольевич[1],
Romanov D.A.
Бащенко Людмила Петровна[1],
Bashchenko L.P.
Ковалев Андрей Петрович[1]
Kovalev A.P.

[1]ФГБОУ ВО Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Россия, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42
[1]Siberian State Industrial University
654007, Russia, Novokuznetsk, Central district, Kirova str., zd. 42
e-mail: nmalushin@mail.ru, gromov@physics.sibsiu.ru, romanov_da@physics.sibsiu.ru, luda.baschenko@gmail.com, Andreiiiii70@mail.ru

Аннотация: *Основу упрочнения наплавленных деталей обеспечивает плазменная наплавка в среде азота порошковыми проволоками, разработанными на базе экономно-легированных теплостойких сплавов. Дополнительное повышение твердости и износостойкости обеспечивает высокотемпературный отпуск, ультразвуковая поверхностная упрочняющая обработка и рекристаллизационный отжиг.*

Ключевые слова*: плазменная наплавка в среде азота, теплостойкие сплавы, высокотемпературный отпуск, поверхностная упрочняющая обработка, рекристаллизационный отжиг.*

Abstract. The basis of hardening of the deposited parts is provided by plasma surfacing in a nitrogen medium with powder wires developed on the basis of economically alloyed heat-resistant alloys. An additional increase in hardness and wear resistance is provided by high-temperature tempering, ultrasonic surface hardening treatment (UPO) and recrystallization annealing.

Keywords: plasma surfacing in nitrogen, heat-resistant alloys, high-temperature tempering, surface hardening treatment, recrystallization annealing.

Введение

Для упрочнения деталей горно-металлургического оборудования широко применяются наплавочные материалы, разработанные на базе теплостойких быстрорежущих сталей [1, 2]. Основной трудностью, возникающей при наплавке

теплостойкими сплавами, является образование холодных (закалочных) трещин. Для предупреждения трещин применяют обязательный предварительный подогрев деталей до температуры 350 – 700 С. Существенным недостатком традиционной технологии является обязательное применение высокотемпературного подогрева, замедленного охлаждения и, как следствие, последующей закалки наплавленной детали. Закалка биметаллического изделия является сложной задачей из-за различных свойств наплавленного высоколегированного слоя и низколегированной сердцевины. Существующие технологические процессы наплавки теплостойкими сплавами не позволяют достаточно полно использовать свойства металла наплавленного слоя [1, 2]. Именно поэтому актуальной является задача разработки новых способов наплавки теплостойкими сплавами и применения дополнительных упрочняющих технологий, которые позволяют устранить отмеченные недостатки традиционной технологии и полностью использовать высокую твердость и износостойкость используемых материалов.

Цель работы – разработка способов наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости, обеспечивающих получение наплавленного металла в закаленном состоянии без образования трещин и применение дополнительных упрочняющих технологий для повышения эффективности использования высоколегированных теплостойких сплавов.

Теория

Получить наплавленный металл, который обладает высокой стойкостью против образования холодных трещин и высокими механическими свойствами сразу же после окончания наплавки, можно путем регулирования термического цикла наплавки. Предлагаемый термический цикл для многослойной наплавки теплостойкими сплавами показан на рисунке 1 (где t_{10} – время, необходимое для образования 10 % мартенсита; t_{30} – время, необходимое для образования 30 % мартенсита) [2].

Особенностью предложенных способов наплавки [3] является применение низкотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева. Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин регулируется уровень временных напряжений в процессе наплавки путем их частичной релаксации за счет проявления эффекта кинетической пластичности в момент протекания мартенситного превращения. Релаксация временных напряжений в интервале температур мартенситного превращения предотвращает образование трещин в процессе наплавки.

Охлаждение наплавленных слоев и изотермическая выдержка в интервале мартенситного превращения приводит к термической стабилизации аустенита. При этом наплавленный металл в процессе наплавки на 70 – 90 % состоит из стабилизированного аустенита. При увеличении количества аустенита снижаются напряжения, увеличивается пластичность, уменьшаются объемные изменения, деформации и чувствительность к трещинам.

Особенностями предложенного термического цикла наплавки также являются: ограниченное время пребывания наплавленного металла в высокотемпературной зоне; высокие скорости охлаждения металла в области минимальной устойчивости аустенита; сохранение металла в аустенитном состоянии до завершения процесса наплавки путем применения предварительного подогрева с температурой $M_н$ + (50 ÷ 100) С (рисунок 1). Для уменьшения уровня накопившихся в аустенитной области временных напряжений предложено кратковременное снижение температуры подогрева на 20 – 100 °С ниже значения $M_н$. Снижение температуры подогрева в процессе многослойной наплавки приводит к частичной релаксации временных напряжений, которая происходит в основном за счет эффекта сверхпластичности в момент мартенситного превращения. Релаксация временных напряжений в интервале температур мартенситного превращения предотвращает образование трещин в

процессе многослойной наплавки. Уровень релаксации временных напряжений обеспечивается временем выдержки $t_в$ при температурах ниже $M_н$

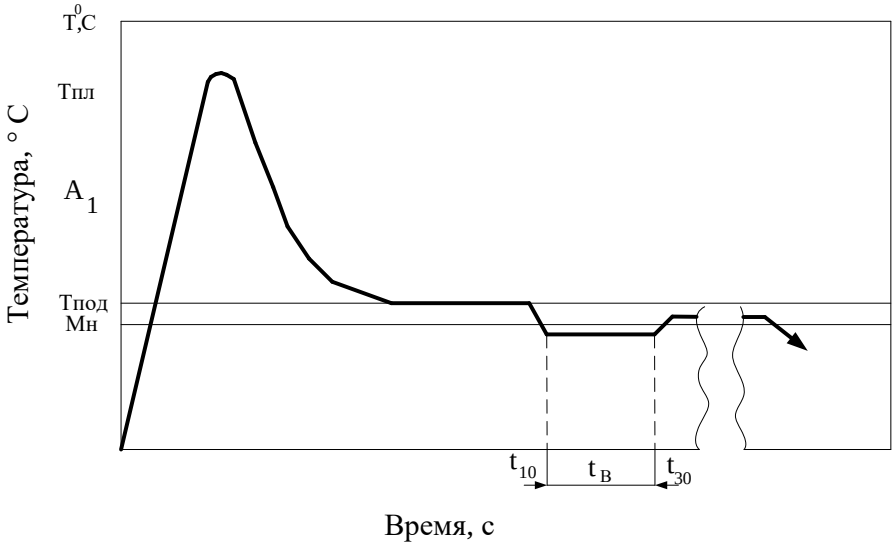


Рисунок 1 – Схема термического цикла при наплавке теплостойкими сталями

В качестве способа выбрана плазменная наплавка нетоковедущей присадочной порошковой проволокой. Для плазменной наплавки нетоковедущей порошковой проволокой использована установка, скомпонованная из серийно выпускаемого оборудования.

Результаты и их обсуждение

Выбор плазменной наплавки как базового способа нанесения износостойких покрытий объясняется рядом преимуществ плазменной наплавки: высокая производительность; широкая возможность легирования наплавленного металла; возможность применения различных наплавочных металлов. Большой диапазон регулирования ввода теплоты в основной и наплавляемый металлы позволяет реализовать предлагаемый термический цикл наплавки. Перечисленные положительные стороны способов плазменной наплавки не только существенно расширяют технологические возможности их применения, но и позволяют получать значительный экономический эффект за счет наплавки слоев с минимальной глубиной проплавления и сохранения первоначальных физико-механических свойств наплавленного металла. Особенностью сжатой дуги как источника тепла является также то, что ее тепловые и газодинамические характеристики могут легко регулироваться в широких пределах. Использование сжатой дуги обратной полярности позволяет устранить трудоемкие, усложняющие технологический процесс наплавки операции по предварительной очистке поверхности изделия. Очистка наплавляемой поверхности от загрязнений происходит в этом случае непосредственно в процессе наплавки за счет эффекта катодного распыления, чем обеспечиваются необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. При плазменной наплавке на обратной полярности достигается также меньшее разбавление наплавляемого металла основным [2].

Наиболее эффективным для решения ряда технологических задач при наплавке деталей горно-металлургического оборудования типа тел вращения является применение процесса плазменной наплавки на обратной полярности в защитно-легирующей среде азота

с нетоковедущей присадочной порошковой проволокой [4]. Использование азота в качестве защитного газа по сравнению с аргоном позволяет не только снизить затраты на наплавку, но и эффективно легировать наплавленный металл азотом из газовой фазы непосредственно в процессе наплавки, что существенно повышает его твердость и износостойкость. Предотвращение образования пор в наплавленном металле достигается введением в порошковую проволоку элементов, имеющих большее сродство к азоту и связывающих его в стойкие нитриды. Положительно на увеличении твердости наплавленного металла и предотвращении образования пор при плазменной наплавке в азоте сказывается введение в шихту порошковой проволоки алюминия в определенных пределах. В процессе наплавки происходит легирование наплавленного металла азотом непосредственно из газовой фазы, что позволяет дополнительно повысить твердость рабочего слоя изделия. Алюминий вводят в состав шихты порошковой проволоки для устранения пористости. Алюминий связывает избыточный азот в нерастворимые в жидком металле соединения, способные дополнительно упрочнять металл за счет образования мелкодисперсных частиц нитридов. Дополнительно улучшить свойства наплавленного высоколегированного металла, а также обеспечить благоприятное напряженное состояние позволяет применение высокотемпературного отпуска. Так, твердость металла после наплавки порошковыми проволоками ПП-Р2М9ЮН составляет 52 – 57 HRC. Структура наплавленного металла при этом близка по своему составу к структуре быстрорежущей стали Р2М9Ю в закаленном состоянии и состоит из мартенсита (около 70 %), карбидов (до 20 %) и остаточного аустенита (до 10 %). Трех – четырехкратный высокотемпературный отпуск при температуре 580 °С увеличивает твердость наплавленного металла до 62 – 64 HRC. Увеличение твердости объясняется превращением остаточного аустенита в мартенсит и эффектом дисперсионного твердения. Твердость наплавленного металла после отпуска на вторичную твердость достигает 64 – 66 HRC [2].

Типичная структура наплавленного металла после многослойной плазменной наплавки и высокотемпературного отпуска приведена на рисунке 2 (исследование проведено методом растровой электронной микроскопии [5]).

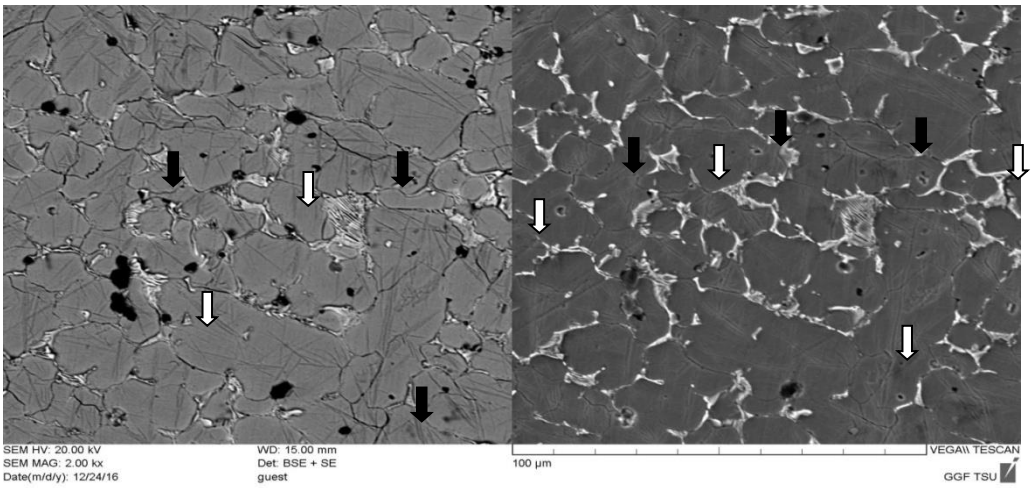


Рисунок 2 – Структура поверхности наплавленного слоя после наплавки и высокотемпературного отпуска (цементит указан светлыми стрелками, зерна перлита – черными)

Повышение износостойкости наплавленных валков объясняется наличием в структуре мелкодисперсных карбидов и карбонитридов. Наличие в поверхностном слое наплавленных деталей сжимающих напряжений и отсутствие резкого перехода сжимающих

напряжений в растягивающие напряжения является, также, одним из факторов, способствующих повышению износостойкости.

Основными причинами выхода из строя наплавленных деталей являются естественный износ, отслоения и отколы. Отслоение связано с образованием очагов усталостного разрушения в глубине детали. Очаги усталостного разрушения располагаются в зоне сплавления основного металла с наплавленным. Для дальнейшего повышения работоспособности наплавленных деталей применены дополнительные технологии упрочнения.

При применении дополнительно после наплавки ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработки можно повысить твердость до 64 – 66 HRC. Применять дополнительно азотирование наплавленного теплостойкого металла не следует, так как эффект упрочнения не значителен. Резервы повышения качества наплавленных деталей заложены в процессе их эксплуатации путем применения рекристаллизационного отжига. Использование отжига в процессе эксплуатации наплавленных деталей приводит пластически деформированный металл в более устойчивое структурное состояние, причем за счет явления рекристаллизации полностью снимается наклеп зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом, восстанавливается его усталостная прочность до первоначальных значений. Устранение зоны наклепа предотвращает зарождение очагов усталостного разрушения и существенно снижает вероятность образования отслоений, за счет чего стойкость возрастает.

Схема предлагаемого технологического обеспечения высокого качества и работоспособности наплавленных деталей состоит из следующих этапов. Предлагается активный рабочий слой валка наносить, используя плазменную наплавку теплостойкими сплавами высокой твердости. Улучшить свойства наплавленного высоколегированного металла, а также обеспечить благоприятное напряженное состояние позволяет применение дополнительно после наплавки высокотемпературного отпуска и ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработки. В случае выхода наплавленной детали из строя возможна его восстановительная наплавка.

Выводы

Установлено, что технология плазменной наплавки на обратной полярности в защитно-легирующей среде азота с нетоковедущей присадочной порошковой проволокой типа ПП-Р2М9Ю по разработанным способам и применяемый наплавочный материал позволяют получить качественный наплавленный сплав без трещин, пор, шлаковых включений и дефектов макро- и микроструктуры и это является физической основой упрочнения поверхностного слоя наплавленных деталей. Основной дополнительный вклад в упрочнение вносит высокотемпературный отпуск и ультразвуковая поверхностная упрочняющая обработка.

Список литературы

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.

2. Малушин Н.Н., Валуев Д.В. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 358 с.

3. Пат. РФ № 2699488. Способ многослойной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости в азотсодержащей среде / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, Е.А. Будовских, Д.В. Валуев. Заявл. 20.02.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.

4. Пат. РФ № 2681049 Шихта порошковой проволоки для наплавки в азотсодержащей среде / Н.Н. Малушин., Е.А. Будовских, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, И.В. Осетковский, Р.А. Гизатулин. Заявл. 21.11.2017; опубл. 01.03.2019. Бюл. № 7.

5. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Бащенко Л.П. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 10 (742). С. 106–111.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ПЛАКИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

A STUDY OF THE WELDABILITY OF CLAD STEELS

Атрощенко Валерий Владимирович[1],
Atroshchenko V.V.
Сафиуллин Равиль Шамилевич[1],
Safiullin R.Sh.
Кагарманов Эдуард Илшатович[1],
Kagarmanov E.I.
Никитин Владислав Валерьевич[1],
Nikitin V.V.
Бачаев Денис Александрович[1],
Bachaev D.A.

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет
(ФГБОУ ВО "УГАТУ", кафедра "Современных методов сварки и контроля конструкций" на базе ООО "АЦ СваркаТехСервис")
450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12
[1]Ufa State Aviation Technical University
450008, Republic of Bashkortostan, Ufa, K. Marx str., 12
e-mail: 91250@mail.ru, safiullinrsh@yandex.ru, kagarmanov@naks-rb.ru,
vladislaw.n2010@mail.ru, denisba4aev@mail.ru

Аннотация: *Статья посвящена исследованию свариваемости плакированных сталей. Раскрыты этапы сварки каждого слоя, с учетом разделки стыкового соединения С-6 по ГОСТ 16098-80. Приведены и описаны результаты неразрушающего и разрушающего контроля.*

Ключевые слова: *Сварка, ручная дуговая сварка, плакированные стали, биметаллы, хромоникелевые сплавы, коррозионностойкие стали, двухслойные стали.*

Abstract: The article is devoted to the research of weldability of clad steels. Welding steps of each layer, taking into account the section of the butt joint C-6 according to State Standard 16098-80, are disclosed. The results of nondestructive and destructive testing are given and described.

Keywords: Welding, manual arc welding, clad steels, bimetals, chromium-nickel alloys, corrosion-resistant steels, two-layer steels.

Введение

Проблема внутренней коррозии трубопроводов на нефтяных месторождениях с высоким содержанием углекислого газа (CO_2) и сероводорода (H_2S) возникла давно, но в последнее время стала более острой из-за резкого увеличения удельной частоты отказов трубопроводов.

Это делает необходимым их изготовление из специальных высоколегированных сталей. Такие стали содержат дорогие, дефицитные металлы.

Одним из способов ограничить применение высоколегированных сталей в таких конструкциях - сделать их плакированными. Во многих случаях работает не все изделие, а только некоторые его компоненты. Остальная часть изделия работает в обычных условиях, поэтому она может быть изготовлена из средне- или низколегированной стали или даже из обычной углеродистой стали [1].

Плакированный слой состоит из хромоникелевой аустенитной стали марки 12Х18Н9, обладающей высокой химической стойкостью в агрессивных средах. Сталь имеет высокую прочность и пластичность в широком диапазоне температур [9].

Основные трудности наплавки плакированного слоя связаны со склонностью к образованию трещин в ЗТВ, с выделением карбидов из аустенита и ухудшении в этих местах стойкости против межкристаллитной коррозии (МКК) [2].

В статьях, посвященных сварке плакированных сталей, в основном рассматриваются теоретические вопросы, без практического подтверждения результатов.

Целью настоящей работы является исследование свариваемости двухслойных плакированных сталей, состоящих из основного слоя марки 09Г2С (перлитного класса) толщиной 8мм и плакирующего защитного слоя из 12Х18Н9 (аустенитного класса) толщиной 2мм, полученные ручной дуговой сваркой. В таблице 1,2 приведены химические составы сталей основного слоя и плакирующего. Для оценки качества полученных сварных соединений проведены неразрушающий и разрушающий контроль, методами: ВИК, РК, ПВК, испытания на статический изгиб, металлографические исследования структуры материала и испытания на МКК (вид коррозии, при котором разрушение металла происходит преимущественно вдоль границ зерен (кристаллов)).

Таблица 1 – Химический состав стали 09Г2С [3]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Fe
до 0,12	0,5- 0,8	1,3-1,7	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	до 0,008	~96-97

Таблица 2 – Химический состав стали 12Х18Н9 [3]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Fe
до 0,12	до 0,8	до 2	8-10	до 0,02	до 0,035	17-19	~70

Методика экспериментального исследования:

Для исследования свариваемости плакированных сталей проведена ручная дуговая сварка (РД) листов из двухслойного материала 09Г2С + 12Х18Н9, размером 300х300мм, толщиной 10мм.

Двухслойная сталь 09Г2С+12Х18Н9 состоит из сталей разных структурных классов с различными физико-механическими свойствами и неодинаковой свариваемостью. Исходя из этого при сварке следует учитывать особенности фазоструктурных изменений каждого слоя металла, а также переходной зоны между ними [1].

Сварка и подготовка кромок под сварку проводилась в соответствии с ОСТ 26.260.480-2003, тип сварного соединение стыковое, тип шва выбран С6 по ГОСТ 16098-80, сварка выполнялась с двух сторон. Конструктивные элементы сварного шва с размерами представлены на рисунке 1.

Во избежание расплавления сварочным материалом плакирующего слоя при сварке основного слоя, производится снятие плакирующего слоя на ширину 3-4мм.

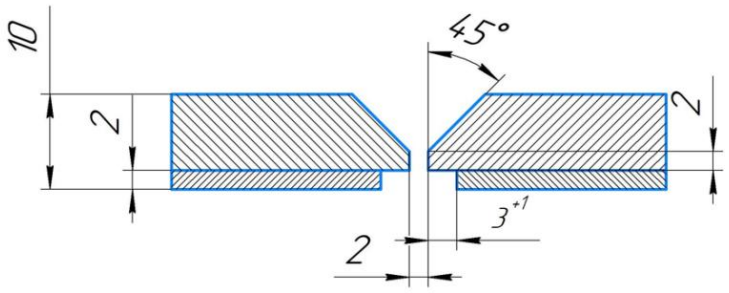


Рисунок 1 – Конструктивные размеры под сборку

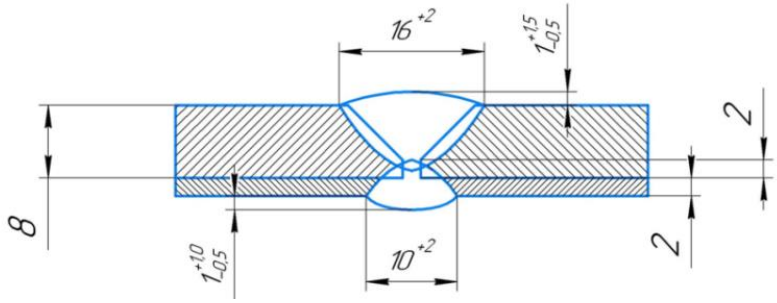


Рисунок 2 – Конструктивные размеры сварного соединения

Сварка двухслойной стали состоит из трех основных этапов: сварки основного слоя, наплавки переходного и плакирующего слоев.

В связи с тем, что сварное соединение двухслойных сталей обусловлены наличием в сварном соединении разнородных металлов с различными физическими и механическими свойствами, сварку основного и последующую наплавку плакирующего слоя производили раздельно, разными сварочными материалами [4].

Для сварки коррозионностойкого плакирующего использовали сварочные материалы, рекомендуемые ОСТ 26.260.480-2003.

Основной слой

Сварка основного слоя из стали марки 09Г2С производилась ручной дуговой сваркой на постоянном токе обратной полярности, электродами марки УОНИ 13/55 (∅3мм; сила тока 90-110А). Особое внимание при сварке основного слоя было обращено на недопустимость повреждения плакирующего слоя.

Переходный слой

При наплавке переходного слоя сварных соединений двухслойной стали сварочными материалами должны быть обеспечены меры, предотвращающие образованием хрупкой структуры. Во время наплавки плакирующего слоя неизбежно разбавление легированного металла шва, за счет частичного проплавления углеродистого металла. С целью компенсации снижения содержания легирующих элементов в металле шва для сварки переходного слоя применяли присадочные материалы с повышенным содержанием хрома и никеля. Наплавка данного слоя производилась электродами марки ОЗЛ-6 (∅2,5мм; сила тока 60-90А).

Плакирующий слой

Наплавка плакирующего слоя, стали – 12Х18Н9, производилась однотипными сварочными материалами с металлом плакирующего слоя и характеризуется как соединение

металлов одного структурного класса – аустенитного. Для сварки плакирующего слоя использовали электроды марки ЦЛ-11 (∅2,5мм; сила тока 60-80А).

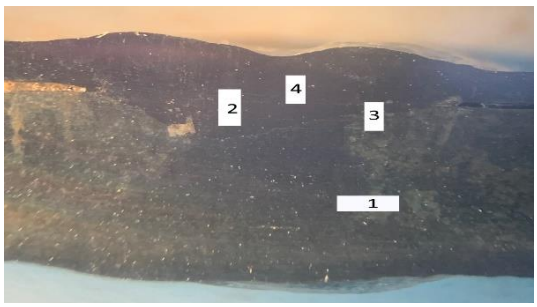


Рисунок 3 – Характерные переходные участки в сварном соединении двухслойной стали 09Г2С + 12Х18Н9:
1- от шва стали 09Г2С к основному металлу 09Г2С;
2- от переходного аустенитного шва к шву стали 09Г2С;
3- от переходного аустенитного шва к основному металлу 09Г2С;
4- от переходного аустенитного шва к шву плакирующего слоя 12Х18Н9

Результат и обсуждения

После получения сварного соединения на установленных режимах был проведен ВИК. Основные параметры сварного соединения ширина шва и усиление шва – в допусках. На сварном соединение дефектов не обнаружено.

Рисунок 4 – Шов со стороны плакированного слоя

Цифровая радиография также не выявила дефектов.

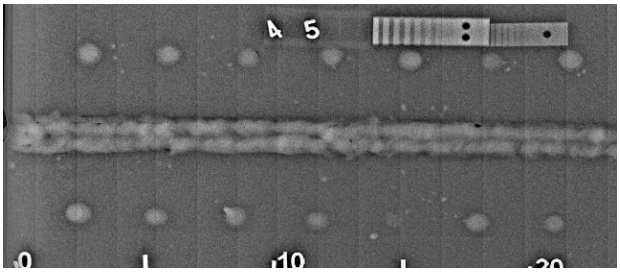


Рисунок 5 – Снимок цифровой радиографии

Дополнительно для обнаружения дефектов произвели капиллярный контроль. После проведения ПВК дефектов не обнаружено.

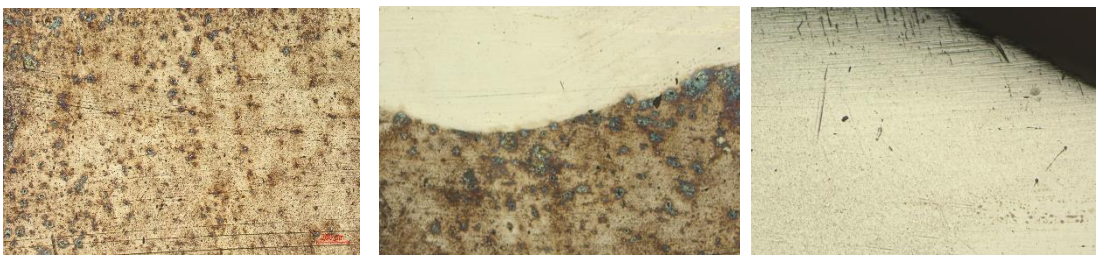
Рисунок 6 – Образец после проведения капиллярного контроля

Для разрушающего контроля определили участки проведения испытаний на статический изгиб. Размеры образцов согласно ГОСТ 6996-66.

Минимальное значение угла изгиба по ОСТ 26-291-94 составляет 100° при котором на образце должны появиться трещины. Данный образец прошел испытание, на угле изгиба в 135° трещины не обнаружены.

Рисунок 7 – Испытание на статический изгиб

Для определения стойкости плакированной стали к межкристаллитной коррозии сварные образцы выдерживали в растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии стружки меди. Испытания проводились по ГОСТ 6032-2017. Результат представлен на рисунке 8.



а) б) в)

Рисунок 8 – Микрошлифы образца из двухслойной стали
а - поверхность основного слоя шва из стали 09Г2С
б - поверхность переходного аустенитного слоя шва.
в - поверхность плакирующего слоя шва из стали 12Х18Н9

На образцах, после испытаний на МКК, разрушение границ зерен плакирующего слоя не обнаружено.

Выводы

1. В ходе экспериментальных исследований свариваемости плакированных сталей были определены режимы сварки, при которых в сварных соединениях отсутствуют дефекты (трещины, подрезы).

2. По результатам испытаний на статический изгиб, угол изгиба образцов составил 135°, при этом трещин на поверхности образцов не выявлено.

3. Результаты испытаний на МКК показали, что полученные соединения устойчивы к межкристаллитной коррозии.

Список литературы:

1. Гальцов И.А., Каленская А.В. Сварка плакированной стали: Монография. Минобрнауки России, САФУ им. М.В. Ломоносова. Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2021. 164 с.

2. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей.

3. Волченко В.Н. (гл.ред), Макаров Э.Л. (ред.) Сварка и свариваемые материалы. Справочник в трех томах. Том 1.

4. Гальцов И.А., Лукин К.И. Проблематика и методы оптимизации сварки плакированной стали.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MEASURING THE VELOCITY OF POWDER ALLOY PARTICLES DURING SGP SURFACING BY AN INTEGRAL CORRELATION METHOD

Киселев Вадим Сергеевич[1],
Kiselev V.S.
Радченко Михаил Васильевич[1],
Radchenko M.V.
Шевцов Юрий Олегович[2],
Shevtsov Yu.O.

[1]ООО «ГАЦ АР НАКС»,
656043, Россия, г. Барнаул, ул. Анатолия, 103 А,
[2]Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, Россия, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
[1]LLC «GATS AR NAKS»,
656043, Barnaul, Anatolia str., 103 A,
[2]Polzunov Altai State Technical University,
656038, Barnaul, Polzunov av., 46
e-mail: vadserkis@yandex.ru

Аннотация. *В работе представлены результаты разработки системы измерения термоциклов при сверхзвуковой газопорошковой наплавке (СГП-наплавке) износостойких и жаростойких покрытий системы Ni-Cr-B-Si. Эта система позволяет получать, анализировать и отрабатывать технологические режимы СГП-наплавки.*

Ключевые слова: *система контроля и диагностики, измерение термоциклов при сверхзвуковой газопорошковой наплавке, защитные покрытия, рациональные режимы наплавки.*

Abstract. The results of development of the monitoring system for measuring the particle velocity of Ni-Cr-B-Si powder alloys during supersonic gas-powder cladding (SGP- cladding) of wear-resistant and heat-resistant coatings are presented in the paper. That system has allowed to analyze and set up the rational technological modes of Ni-based alloys cladding.

Keywords: monitoring and diagnostic system, measuring the particle velocity, supersonic gas powder cladding, rational cladding modes.

Для исследования температуры нагрева сверхзвуковой газопламенной струи наиболее точным и информативным является метод измерения температуры нагрева пламени с использованием термоэлектрического преобразователя. Блок-схема разработанной установки для измерения температуры нагрева сверхзвуковой газопламенной струи при помощи термоэлектрического преобразователя из платинородиевых сплавов типа ТПРТ 01.01 (платина - 30% родий/платина - 6% родий) показана на рисунке 1.

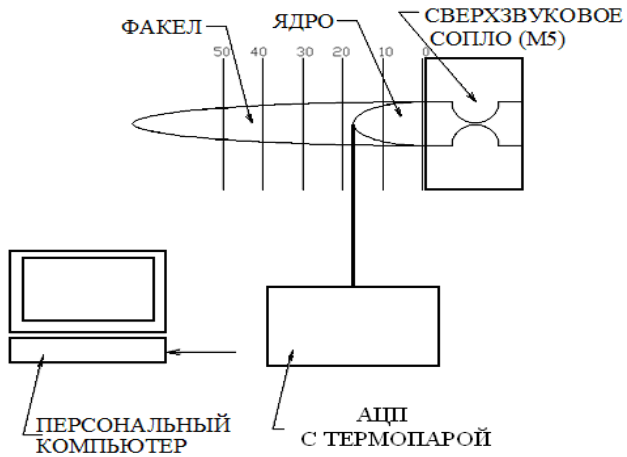


Рисунок 1 – Блок-схема установки для измерения температуры нагрева сверхзвуковой газопламенной струи

Выбранный термоэлектрический преобразователь из платинородиевых сплавов представляет собой чувствительный элемент – термопару из термоэлектродной проволоки платина – 30 % родий и платина – 6 % родий. Термоэлектроды помещены в изолирующую двухканальный керамический корпус из алюмооксида и сварены между собой со стороны рабочего конца, образуя рабочий спай.

Для регистрации термоэлектродвижущей силы термопары при измерении температуры нагрева сверхзвуковой газопламенной струи использовалась система сбора данных на основе виртуального осциллографа PCS500 совместно с персональным компьютером (рисунок 3).

Рисунок 2 – Общий вид системы сбора данных совместно с персональным компьютером и подключенной термопарой ТПРТ 01.01

Исследования температуры сверхзвуковой газовой струи производились для следующих технологических параметров: значения избыточных давлений рабочих газов – $P_{КИСЛОРОДА} = 5\ атм$, $P_{ПРОПАНА} = 1\ атм$; коэффициент β соотношения рабочих газов – 1,1. Данное соотношение является наиболее технически целесообразным для процессов сверхзвуковой газопорошковой наплавки, так как позволяет получить требуемую температуру нагрева при сохранении качественных характеристик самой струи. Современные самофлюсующиеся сплавы системы Ni-Cr-B-Si частично плавятся уже при

1050-1100°С и дают эвтектические расплавы с высоким содержанием бора и кремния. Вследствие этого режим сверхзвуковой газопорошковой наплавки низкой интенсивности горения наиболее технологически целесообразен для нанесения защитных покрытий на детали относительно небольших размеров ввиду значительно меньшего образования оксидов на поверхности подложки, чем на более производительных режимах СГП-наплавки.

Из диапазона расхода горючего газа (пропана), обеспечивающего устойчивое горение сверхзвуковой газовой струи при заданных давлениях выделены три характерных значения расхода рабочих газов (низкой, средней и высокой интенсивности).

Номинальные статические характеристики согласно ГОСТ Р 8.585-2001 для термопары типа В (платина - 30% родий/ платина - 6% родий) показаны на рисунке 3.

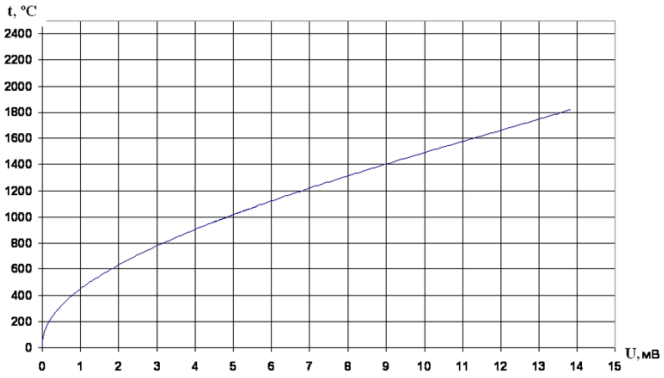


Рисунок 3 – Статическая характеристика (значения термо-ЭДС в зависимости от температуры) термопары типа В (платина - 30% родий / платина - 6% родий)

Учитывая, что данная термопара рассчитана на максимальную температуру 1800 ºС, что соответствует значению термо-ЭДС около 14 мВ, был построен график соотношения температуры и термо-ЭДС, с учётом линии тренда, описываемой уравнением y = 3E-06x2 + 0,0016x - 0,2953, и соответствующей более высоким температурам.

В экспериментах термопара помещалась в открытое пламя на различном расстоянии от среза сопла. Максимальная температура располагалась в пределах конца ядра – восстановительной зоне, на расстоянии 20 мм (рисунок 4).

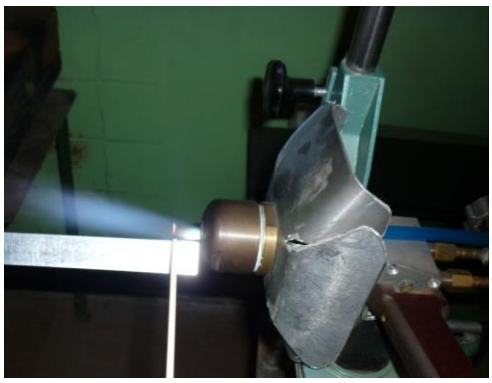


Рисунок 4 – Измерение температуры сверхзвуковой газопорошковой струи с использованием термопары ТПРТ 01.01

Полученные значения при L=20 мм представлены ниже на рисунке 5.

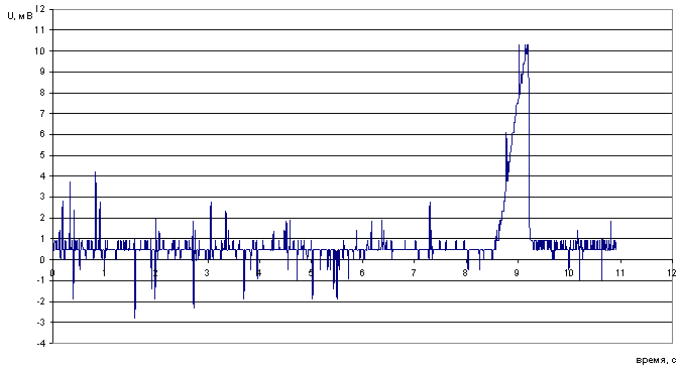


Рисунок 5 – Значения термо-ЭДС, фиксируемые виртуальным осциллографом PCS500 с течением времени при нагреве СГП струей пламенем низкой интенсивности при β=1,1

Из графика выше видно, что термо-ЭДС составила 10,5 мВ, что соответствует температуре 1650 ºС.

При следующем опыте термопара оплавилась, но выдала значение в 21 мВ, что соответствует температуре в 2200 ºС (рисунок 6). Параметры СГП струи при низкой интенсивности составили:

$Q_{пр}$ – расход пропана 2,5 л/мин,

$Q_к$ – расход кислорода 2,75 л/мин,

β – коэффициент соотношения рабочих газов (Qк/Qпр = 1,1),

L – расстояние от среза сопла до поверхности (20 мм).

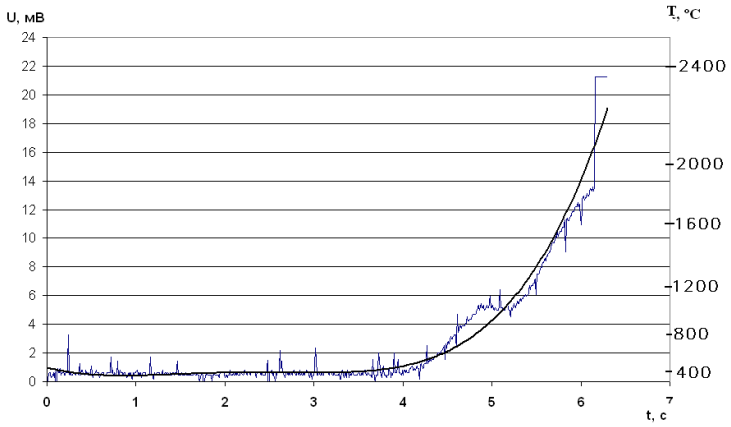


Рисунок 6 – Показания термопары при измерении температуры в открытом пламени

Применение термоэлектрического преобразователя из платинородиевых сплавов типа ТПРТ 01.01 для измерения температуры нагрева сверхзвуковой газопламенной струи косвенным способом позволило значительно увеличить степень достоверности полученных результатов. В качестве подложки использовалась стальная пластина размером 10х10 см и толщиной 3 мм. Посередине данной пластины сверлилось несквозное отверстие на глубину 2 мм, куда помещался спай термопары. Сверху данная пластина нагревалась сверхзвуковой газовой струей на различных режимах (рисунок 7).

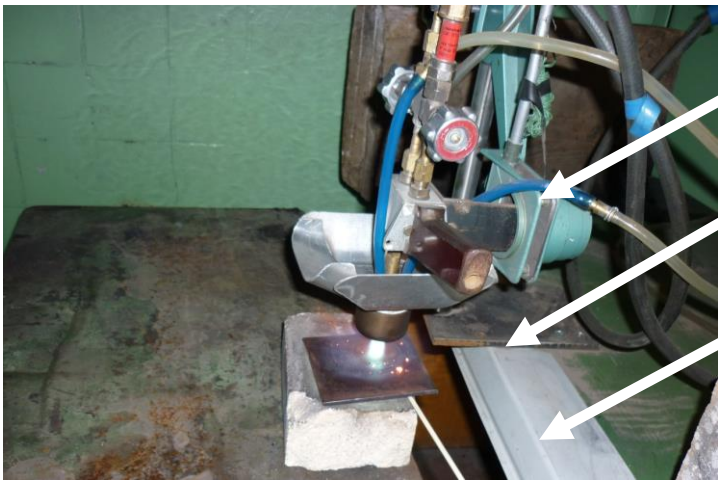


Рисунок 7 – Измерение температуры нагрева подложки при СГП-наплавке

На рисунке 8 показаны графики зависимости термо-ЭДС от времени нагрева пластины сверхзвуковой газовой струей низкой, средней и высокой интенсивности с последующим охлаждением.

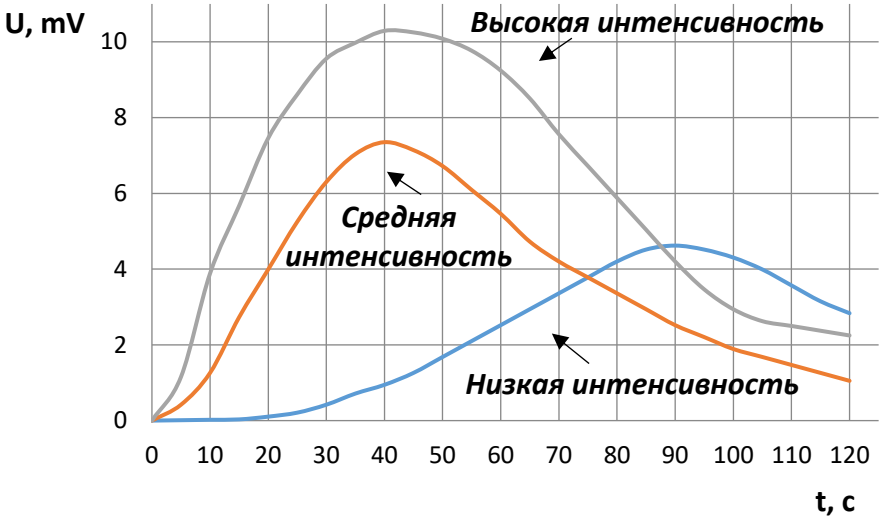


Рисунок 8 – График зависимости термо-ЭДС от времени нагрева пластины сверхзвуковой газовой струей низкой, средней и высокой интенсивности

На основании полученных данных можно судить о скорости нагрева и температурном распределении при нагреве подложки на различных режимах работы установки для СГП-наплавки. За один и тот же промежуток времени стальная подложка нагревалась до большей температуры быстрее с увеличением интенсивности пламени. С увеличением интенсивности пламя становится окислительным, что не позволяет использовать данный режим для наплавки защитных покрытий.

Для исследования распределения температуры по длине пламени при СГП-наплавке выбран наиболее рациональный режим сверхзвукового горения низкой интенсивности. Измерение температуры производится при различных расстояниях от среза сопла до стальной подложки. Термопреобразователь при этом закрепляется в подложке снизу на расстоянии 1 мм от нагреваемой поверхности.

На основе полученных экспериментальных данных построен график распределения температуры нагрева подложки по длине пламени низкой интенсивности при СГП-наплавке (рисунок 9).

Исходя из полученных экспериментальных данных, наивысшая температура нагрева подложки сверхзвуковой газовой струей низкой интенсивности регистрируется на расстоянии порядка 20 мм от среза сверхзвукового сопла до поверхности подложки. То есть, температура пламени также максимальна на этом расстоянии. Также следует учесть, что фактическая температура на поверхности подложки из-за рассеяния энергии больше фиксируемой термопреобразователем примерно на 100-150 ºС.

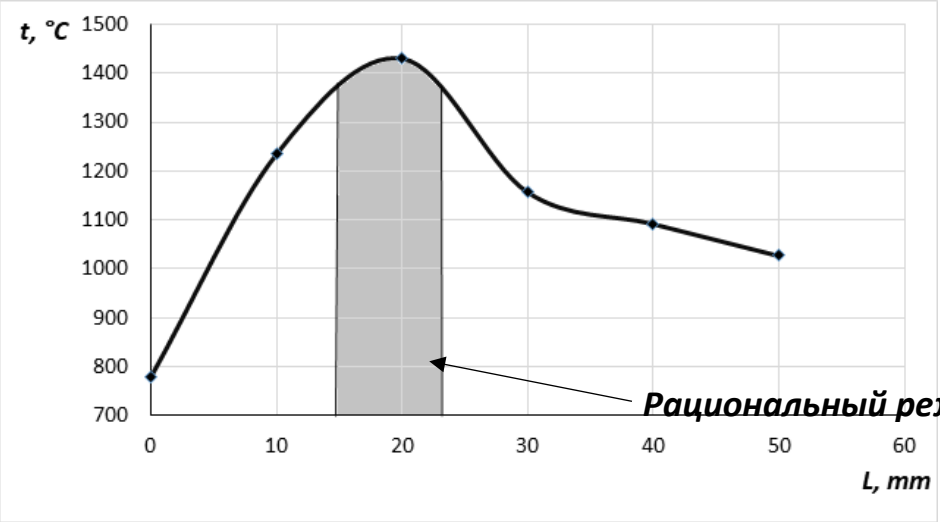


Рисунок 9 – График распределения температуры нагрева подложки по длине пламени при СГП наплавке

Таким образом, система контроля и измерения температуры нагрева сверхзвуковых газовых струй при помощи термоэлектрического преобразователя из платинородиевых сплавов и организацией сбора данных с использованием виртуального осциллографа PCS500 совместно с персональным компьютером позволяет производить отработку технологических режимов СГП-наплавки во всем доступном диапазоне сверхзвукового горения.

Список литературы:

1. Киселев В.С. Повышение износостойкости наплавленных покрытий путём выбора рациональных технологических параметров на основе диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй: дис. канд. техн. наук / В.С. Киселев. – Барнаул, 2010 – 130 с.

2. Диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий. Радченко М.В., Киселёв В.С., Шевцов Ю.О., Суранов А.Я., Смолин В.С., Уварова С.Г./ Сварка и диагностика, 2009. – № 2. – С. 31-36.

3. Исследование термоциклов при сверхзвуковой газопорошковой наплавке износостойких покрытий / М.В. Радченко, В.П. Тимошенко, Т.Б. Радченко, В.С. Киселёв, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова // Сварка и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 29-32.

4. Комплексная диагностика режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.С. Киселёв, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова // Сварка и диагностика. – 2011. – №1. – С. 54-58.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВОГО СПЛАВА ПРИ СГП-НАПЛАВКЕ ИНТЕГРАЛЬНЫМ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MEASURING THE VELOCITY OF POWDER ALLOY PARTICLES DURING SGP SURFACING BY AN INTEGRAL CORRELATION METHOD

Киселев Вадим Сергеевич[1,2],
Kiselev V.S.
Радченко Михаил Васильевич[1],
Radchenko M.V.

[1]ООО «ГАЦ АР НАКС»,
[2]Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
656043, г. Барнаул, ул. Анатолия, 103 А
[1]LLC "GATS AR NAKS"
[2]Polzunov Altai State Technical University
656043, Barnaul, Anatolia str., 103 A
e-mail: vadserkis@yandex.ru

Аннотация: В работе представлены результаты разработки системы измерения скорости частиц порошковых сплавов системы Ni-Cr-B-Si при сверхзвуковой газопорошковой наплавке (СГП-наплавке) износостойких и жаростойких покрытий. Эта система позволяет получать, анализировать и отрабатывать технологические режимы СГП-наплавки.

Ключевые слова: система контроля и диагностики, измерение скорости частиц, сверхзвуковая газопорошковая наплавка, защитные покрытия, рациональные режимы наплавки.

Abstract: The results of development of the monitoring system for measuring the particle velocity of Ni-Cr-B-Si powder alloys during supersonic gas-powder cladding (SGP- cladding) of wear-resistant and heat-resistant coatings are presented in the paper. That system has allowed to analyze and set up the rational technological modes of Ni-based alloys cladding.

Keywords: monitoring and diagnostic system, measuring the particle velocity, supersonic gas powder cladding, rational cladding modes.

В интегральных оптических методах контроля тепловое излучение регистрируется не от отдельно выделенной частицы, а суммарно (интегрально) от группы частиц в одном сечении потока. Оптические сигналы от каждой частицы суммируются, результатом измерения является их интегральная характеристика [1]. Методика контроля скоростных характеристик газопорошкового потока заключается в последовательном выделении оптическими средствами теплового излучения одинаковых порций частиц потока и измерении времени пролета известного базового расстояния, задаваемого двумя фотоприемниками [2-4].

Измерение скорости частиц в сверхзвуковой газопорошковой струе возможно осуществить по интегральным времяпролетным характеристикам порошка при помощи системы контроля, состоящей из следующих основных блоков:

1. Блок фотодиодных светоприёмников.
2. Блок промежуточных усилителей.
3. Плата аналого-цифрового преобразования.
4. Персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением.

Структурная схема разработанной авторами экспериментальной установки для снятия времяпролетной характеристики представлена на рисунке 1.

Для вырезания узкого участка пространства при проведении исследований из листовой нержавеющей стали способом высокоточной лазерной резки были изготовлены прецизионные измерительные головки (рисунок 2). Данные головки состоят из двух коллиматорных щелей, разнесенных основанием между собой на расстояние 20 мм. Они позволяют производить фокусировку оптической системы перемещением дискретного фотоприемника относительно щели. В качестве линейных фотоприемников выбраны фотодиоды марки ФД256 (рисунок 2 б).

Основные характеристики фотодиода ФД256:

- размер фоточувствительного элемента – 1,37 мм;
- диапазон спектральной характеристики – 0,4...1,1 мкм;
- максимум спектральной характеристики – 0,75...0,9 мкм;
- рабочее напряжение – не более 10 В;
- темновой ток – не более 0,005 мкА;
- интегральная токовая чувствительность при длине волны 0,9 мкм – 6 А/лм (0,6 А/Вт).

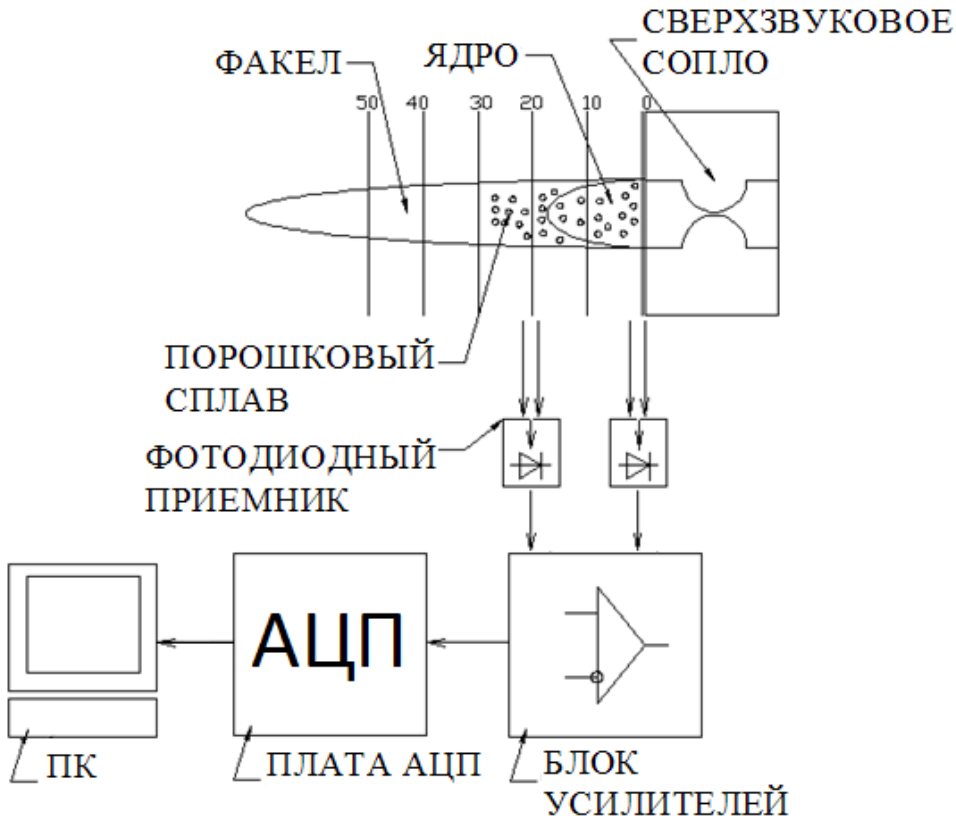
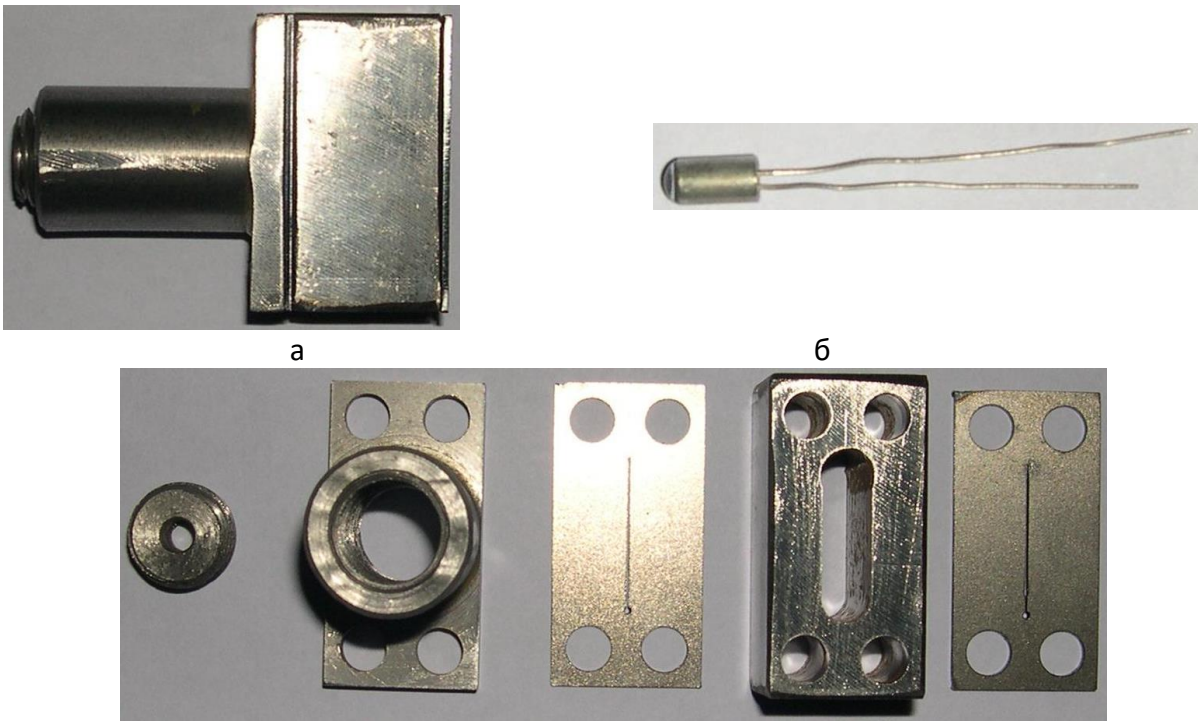


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки для снятия времяпролетной характеристики



а б

в

Рисунок 2 – Общий вид измерительных головок для измерения скорости: а) измерительная головка в сборе; б) фотодиод ФД256; в) составные части измерительной головки

Головки устанавливаются в специальный кронштейн, позволяющий изменять базовое расстояние, который крепится к сверхзвуковому соплу при помощи четырех центровочных болтов (рисунок 3).

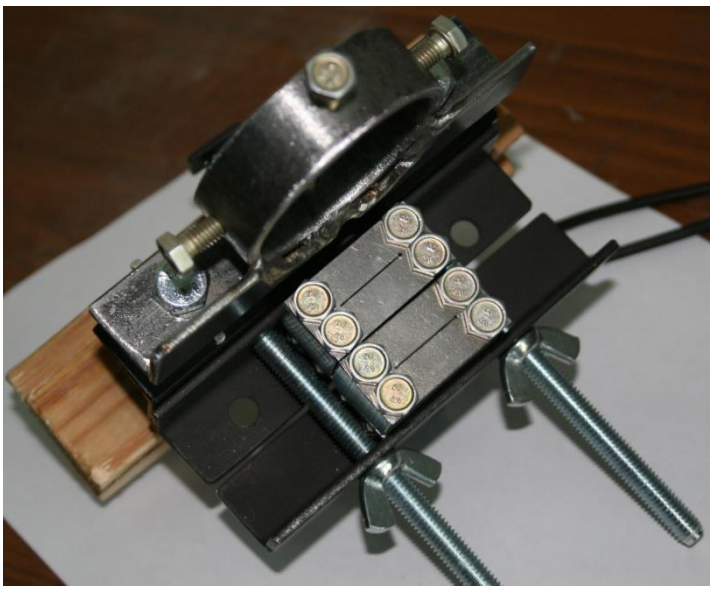


Рисунок 3 – Кронштейн для крепления измерительных головок

Блок промежуточных усилителей предназначен для преобразования "интенсивность света – напряжение" и согласования с платой аналого-цифрового преобразования (АЦП).

В качестве операционного усилителя выбрана микросхема AD8056 фирмы Analog Devices, обладающая следующими характеристиками:

- питание – ±5 В;
- потребляемый ток – 13,9 мА;
- частота единичного усиления – 300 МГц;
- скорость увеличения выходного напряжения – 1400 В/мкс;
- напряжение смещения нуля – 3 мВ;
- наибольшая амплитуда выходного напряжения – 3,1 В;
- входное сопротивление – 10 мОм;
- входная ёмкость – 2 пФ;
- диапазон рабочих температур – -40+125 ºС.

Блок промежуточных усилителей состоит из двух одинаковых каналов оптоэлектронного преобразования, двух стабилизаторов напряжения и фильтров для питания микросхем.

Принципиальная схема блока промежуточных усилителей показана на рисунке 4.

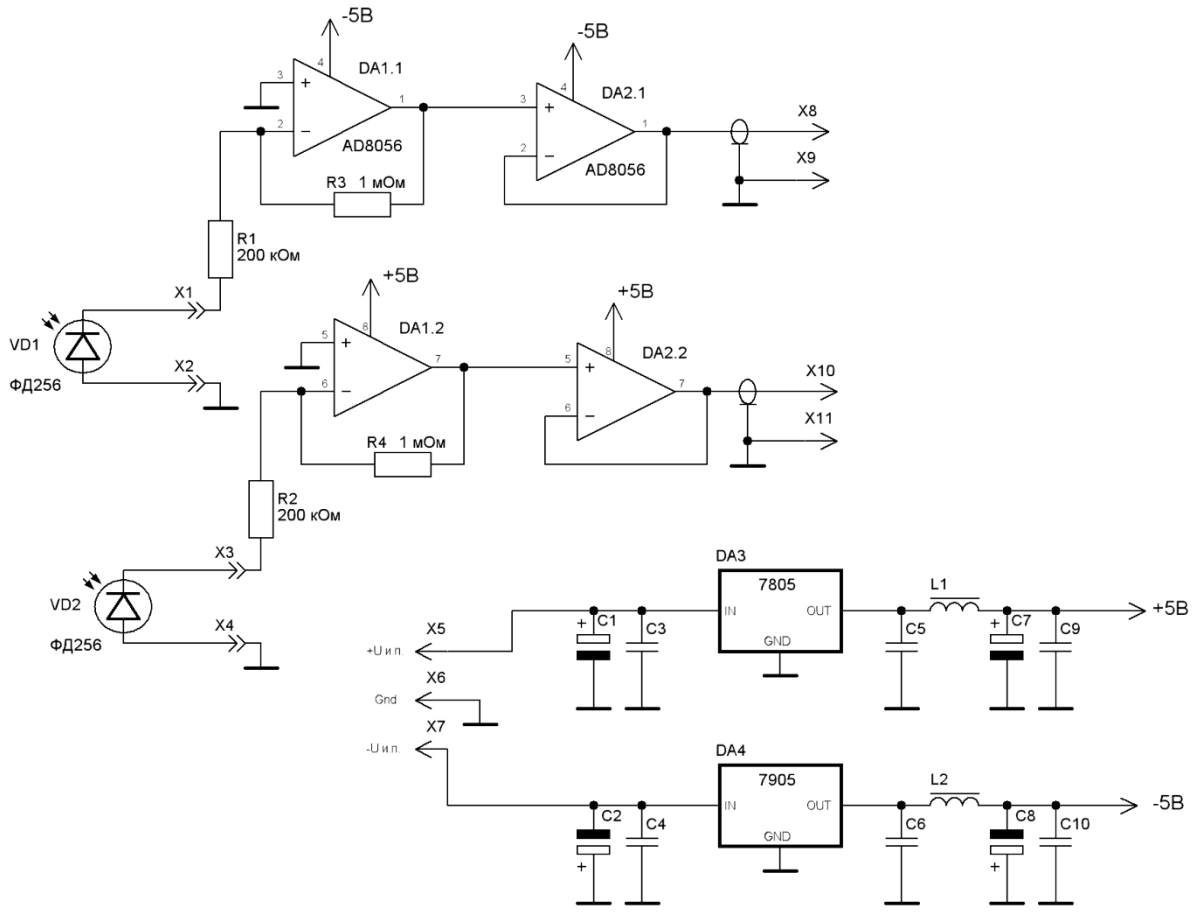


Рисунок 4 – Принципиальная схема оптоэлектронного преобразования

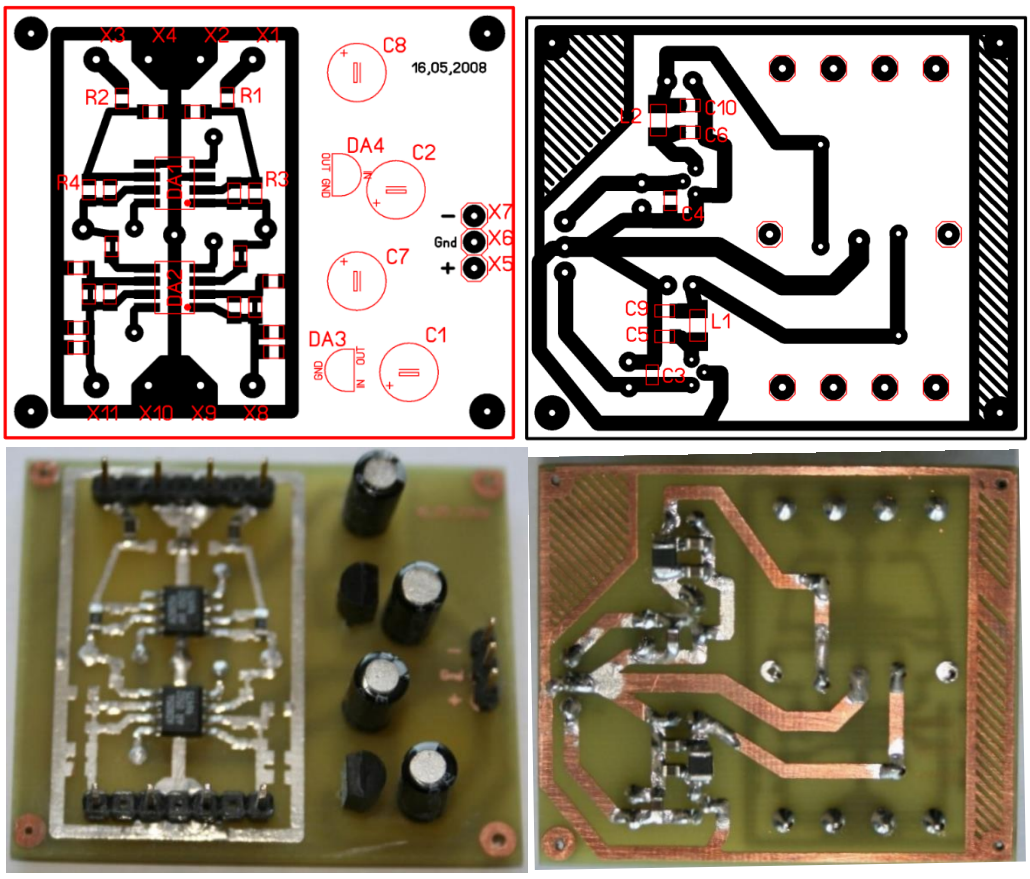
Рассмотрим работу одного канала блока промежуточных усилителей. Световой сигнал поступает на входную линзу фотодиода VD1 (ФД-256), в котором свет преобразуется в фототок. Величина фототока пропорциональна интенсивности света. Фототок, протекая через сопротивления R1, R3, в соответствии с законом Ома, преобразуется в напряжение, которое прикладывается к инвертирующему входу (2) операционного усилителя DA1.1 (AD8056). Неинвертирующий вход (3) заземлен. Усиленный сигнал с выхода DA1.1

поступает на вход следующего каскада усиления, собранного на DA2.1 и предназначенного для согласования усилителя с платой аналого-цифрового преобразования.

Далее сигнал (напряжение) поступает в выходной разъем X8, для подачи его в устройство аналого-цифрового преобразования. Для уменьшения шума в канале применяются фильтры верхних частот в трактах питания DA1 и DA2, они состоят из емкостей C5 - C10 и дросселей L1, L2.

Операционный усилитель DA1.1, охвачен отрицательной обратной связью через сопротивление R3, изменяя которое возможно регистрировать поток с различной мощностью излучения. Варьируя сопротивление R1, имеется возможность изменять вид характеристики преобразования. В случае R1=0÷200 кОм имеем линейную характеристику преобразования интенсивность света - выходное напряжение. Если, применяем сопротивление R1=300÷500 кОм получаем нелинейное преобразование.

Печатная плата устройства блока промежуточных усилителей представлена на рисунке 5.



а б

Рисунок 5 – Печатная плата блока промежуточных усилителей:
а – 1 сторона, б – 2 сторона

Сопряжение фотодиодного приемника и блока промежуточных усилителей с ПК осуществляется с использованием платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Таким образом, такая система позволяет с высокой точностью и частотой производить измерения электрических сигналов.

Для накопления и упорядочения информации, используемой в оперативном контроле и последующем статистическом анализе, применяются технологии баз данных (БД). Структуризация

информации на основе реляционной БД позволяет организовать получение, хранение и обработку данных для анализа скоростных и температурных параметров газопорошковой струи [5].

Разработанная система контроля скоростных и температурных характеристик наплавляемого порошкового сплава позволяет оперативно регистрировать и сохранять значения температуры и скорости пролета частиц при различных режимах сверхзвукового горения, что является базовой информацией для отработки рациональных технологических режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки по критериям качества.

Список литературы

1. Киселев В.С. Повышение износостойкости наплавленных покрытий путём выбора рациональных технологических параметров на основе диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй: дис. канд. техн. наук / В.С. Киселев. – Барнаул, 2010 – 130 с.

2. Диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий. Радченко М.В., Киселёв В.С., Шевцов Ю.О., Суранов А.Я., Смолин В.С., Уварова С.Г. / Сварка и диагностика, 2009. – № 2. – С. 31-36.

3. Спектральная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессах газопорошковой наплавки защитных покрытий / М.В. Радченко, В.С. Киселев, С.Г. Уварова, Ю.О. Шевцов, А.Я. Суранов // Ползуновский альманах /. – Барнаул: АлтГТУ, 2008. – № 3. – С. 73-76.

4. Оптическая эмиссионная спектроскопия сверхзвуковых газовых струй в процессе наплавки защитных покрытий / М.В. Радченко, А.Я. Суранов, Ю.О. Шевцов, В.С. Киселев, В.С. Смолин, С.Г. Уварова // Ползуновский вестник /АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2009. – № 1/2. – С. 279-284.

5. Комплексная диагностика режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.С. Киселёв, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова // Сварка и диагностика. – 2011. – №1. – С. 54-58.

СЕКЦИЯ 3
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭК

SECTION 3
NDT, TECHNICAL DIAGNOSTICS AND EXAMINATION OF INDUSTRIAL SAFETY OF EQUIPMENT OF FEC

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF INSTRUMENT-MAKING IN NON-DESTRUCTIVE TESTING

Сясько Владимир Александрович[1,2]
Siasko V.A.
Галкин Денис Игоревич[3]
Galkin D.I.

[1]Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики,
119048, РФ, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр.1.,
[2]ООО «Константа»,
198097, Санкт-Петербург, Огородный переулок, д. 21, литер А, офис 404
[3]ЗАО «НИИИН «МНПО «Спектр»
119048, РФ, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр.1.,
[1]Russian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics
119048, Russian Federation, Moscow, st. Usacheva, 35, building 1.,
LLC "Constant"
198097, St. Petersburg, Ogorodny lane, 21, letter A, office 404
[3]JSC RII «SPECTRUM»
119048, Russian Federation, Moscow, st. Usacheva, 35, building 1.,
e-mail: 9334343@gmail.com, galkin@niiin.ru

Аннотация: *В статье оцениваются перспективы развития приборостроения в неразрушающем контроле, определяемые общими тенденциями цифровизации в Российской Федерации и внедрением в практику отдельных инструментов Индустрии 4.0. Внедрение в практику «интеллектуальных» (smart) средств неразрушающего контроля позволит повысить эффективность процессов стандартизации, планирования, проведения НК и принятия решений по его результатам на всех уровнях взаимодействующих в области НК субъектов: конструкторских организаций, производителей оборудования, метрологических центров, органов по аттестации и сертификации специалистов, заказчиков услуг по НК, исполнителей, эксплуатирующих организации. Важнейшим шагом в данном направлении является установление требований к содержанию протокола обмена данными между участниками рынка НК.*

Ключевые слова: *индустрия 4.0, НК 4.0, цифровизация неразрушающего контроля, интеллектуальные средства НК*

Abstract: The article assesses the prospects for the development of instrumentation in non-destructive testing, determined by the general trends of digitalization in the Russian Federation and the introduction of individual Industry 4.0 tools into practice. The introduction of "smart" non-destructive testing tools into practice will increase the efficiency of standardization, planning, NDT and decision-making processes based on its results at all levels of entities interacting in the field of NDT: design organizations, equipment manufacturers, metrological centers, certification bodies and certification of specialists, customers of NDT services, performers, operating organizations. The most important step in this direction is the establishment of requirements for the content of the data exchange protocol between NDT market participants.

Key words: industry 4.0, NDT 4.0, digitalization of non-destructive testing, intelligent means of NDT

Термин «интеллектуальные» (smart) средства неразрушающего контроля (НК) получил распространение в РФ относительно недавно: в контексте развития идеологии цифровой трансформации, определённой указами Президента Российской Федерации Путина В.В. от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы» [1] и от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [2], а также распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р [3], утверждающего программу «Цифровая экономика Российской Федерации». В этих документах определены национальные цели и стратегические задачи развития Российской Федерации на период до 2030 года. Указанные цели и задачи являются важным посылом для внедрения интеллектуальных систем управления на базе цифровых технологий.

Во исполнение указов и распоряжения [1, 2, 3] госкомпании разработали собственные концепции цифровой трансформации [4, 5, 6]. При реализации этих концепций компании, являющиеся основными заказчиками услуг по неразрушающему контролю, особое внимание уделяют развитию систем диагностики, которые должны «встраиваться» в цифровую экосистему компаний и обеспечивать получение и сбор информации о техническом состоянии эксплуатируемых объектов в режиме реального времени. Последующая автоматизация обработки измерительных данных от средств диагностики позволит повысить эффективность принимаемых управленческих решений. Таким образом, разработка интеллектуальных средств НК является производной задачей цифровой трансформации и драйвером развития здесь выступят именно основные заказчики услуг по НК.

Будущее НК напрямую связано с объединением элементов промышленной автоматики (роботизированного контроля), мониторинговых систем (с подключением к каналам связи) и, собственно, самих методов неразрушающего контроля (рис. 1) [7].

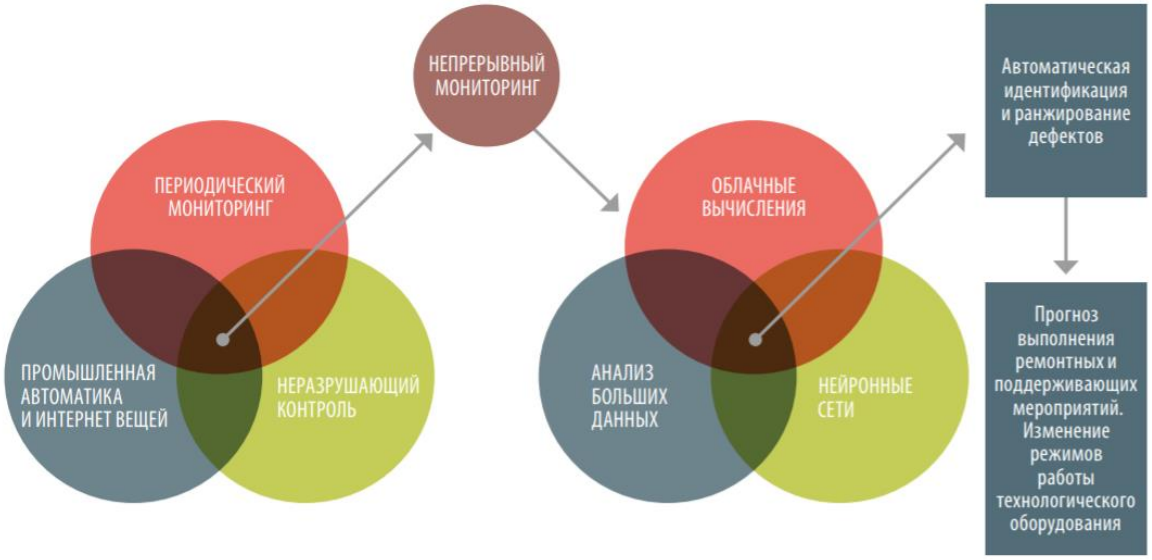


Рисунок 1 – Трендовые изменения в неразрушающем контроле

Это позволит осуществлять постоянный мониторинг технологического процесса или контролируемого объекта с обратной связью (с возможностью изменить параметры работы оборудования) и передачей измерительной информации для принятия управленческих решений, а также хранения данных для последующей обработки. Интеллектуальные системы НК будут естественным образом интегрированы [8] в цепочку жизненного цикла изделия, включающую в себя все этапы создания и эксплуатации. То есть парадигма развития методов и средств НК зависит от активного внедрения базовых элементов Индустрии 4.0.

Но готов ли к таким кардинальной перестройке консервативный рынок НК, в рамках которого любые инновации психологически воспринимаются сразу, а внедряются со значительной задержкой [7]?

В настоящее время рынок неразрушающего контроля переживает рост из-за растущего спроса на новые инфраструктуры и растущей потребности в обновлении существующей устаревшей инфраструктуры. Переход многих крупных производственных компаний на аутсорсинг операций по неразрушающему контролю и развитие промышленного Интернета вещей являются дополнительными факторами, способствующими росту этого рынка. Но несмотря на то, что многие заказчики еще готовы покупать традиционные средства НК в больших количествах, производители средств НК уже сейчас ощущают необходимость изменений. Это связано как с упомянутыми ранее процессами, так и с приходом в отрасль специалистов, выросших в цифровом мире и ожидающих большего удобства от процесса цифровизации НК и меньшей собственной вовлеченности в процесс обработки данных. Это обстоятельство оказывает существенное воздействие на вхождение инструментов Индустрии 4.0 в неразрушающий контроль. Нежелание брать личную ответственность при проведении диагностических работ, отсутствие опыта и фундаментальных инженерных знаний у вновь приходящих сотрудников способствуют измерению направления развития неразрушающего контроля.

Маркетинговое агентство Frost and Sullivan назвало сложившуюся тенденцию «Неразрушающим контролем 2.0» и считает, что она может вызвать трансформационные последствия для всей системы НК. Предположительно, они затронут методы и средства НК, будут способствовать преобразованиям в области технического регулирования, изменят и бизнес-модель проведения НК [9].

Устойчивым трендом становится производство приборов НК, имеющих каналы передачи измерительной информации. Это еще не интеллектуальные средства НК, так как поступающая с них информация носит разрозненный характер и качество этой информации оставляет больше вопросов, чем ответов. Но это уже серьезный шаг в направлении «Неразрушающему контролю 2.0». Следующим этапом станет разработка требований к протоколу передачи данных, применение которого позволит получать с приборов НК качественные данные. В итоге это приведет к тому, что обработка результатов контроля будет осуществляться не только на месте проведения работ, но и на стороне заказчика работ. Анализ поступающих данных в режиме реального времени будет проводиться с использованием технологии искусственного интеллекта, применение которой позволит значительно сократить вовлеченность человека в процесс интерпретации результатов НК и минимизировать риск ошибки. При накоплении информации в базах данных естественными становится решения по разработке приложений (с использованием открытого API) для автоматического оформления протоколов контроля, фильтрации его результатов и их представления в виде инфорамм. Цифровые данные, получаемые при проведении диагностики в течение длительного периода, позволит моделировать режимы, вероятность отказа, управление надежностью, то есть не просто анализировать какие-то документы из прошлого, а предсказывать будущее на основании риск-ориентированного подхода. Это радикально изменит процессы управления системами. Совершенно другим становится

отношение к диспетчеризации, планированию ремонтов, переключению режимов оборудования, уровень автоматизации процессов будет доведен до состояния, условно называемого «умная эксплуатация» [6]. Эти возможности будут востребованы и на уровне государственных органов, осуществляющих контрольно-надзорную деятельность за эксплуатацией промышленных объектов.

Кроме очевидных ожиданий, есть еще и те, о которых не принято упоминать в официальных документах. Заказчикам услуг по НК нужны также решения, с помощью которых можно будет получить уверенность в том, что:

- исполнитель имеет технические и функциональные возможности для оказания услуг
- применяемое исполнителем оборудование может решить конкретную задачу
- контроль был фактически проведен и полученные результаты корректны
- на объекте работает квалифицированный персонал
- минимизировано влияние «человеческого фактора» на результаты работ.

Не имея данной уверенности, заказчик услуг по НК вынужден выполнять непрофильные функции и затрачивать дополнительные ресурсы на контроль за проведением НК (дополнительная сертификация оборудования, допуск специалистов, контроль за деятельностью лабораторий) и оформление результатов этого контроля.

Ведущие производители средств неразрушающего контроля в полной мере осознают необратимость процесса цифровизации и инвестируют в разработку приборов и IT-решений, применение которых позволяет осуществлять сбор и обработку данных неразрушающего контроля [10, 11]. Предлагаемые решения, однако, носят локальный характер и ограничены по перечню подключаемых к системе приборов (как правило, номенклатурой конкретного производителя). Это объясняется следующими факторами:

- отсутствием единых требований к протоколу передачи данных неразрушающего контроля;
- естественным желанием поставщика сформировать «зависимость» клиента от предлагаемых производителем современных, высокотехнологичных решений.

Данная концепция позволит использовать в подобных приборах и умные (smart) стандарты, которые приборы будут учитывать при непосредственном взаимодействии, под контролем, но без прямого участия человека. Все что потребуется от оператора – это задать информацию об объекте и нормативном документе, выбор же условий, схемы, зон, объема контроля, параметров и необходимого оборудования будет выполнен «интеллектуальным» прибором, который также и проконтролирует корректность выполненных специалистом операций при проведении НК.

Учитывая изложенное, вопрос появления стандарта, устанавливающего требования к содержанию протокола обмена данными между участниками рынка НК, а следовательно, и полноценных интеллектуальных средств НК – вопрос времени. Будет ли это национальный стандарт или серия стандартов организаций зависит от того, кто быстрее сможет реально оценить перспективы цифровизации в НК: сообщество организаций – разработчиков оборудования и технологий НК или заказчики услуг по НК. Очевидным, однако, представляется тот факт, что внедрение интеллектуальных средств НК является неотъемлемой частью цифровой трансформации отраслей. Упорядоченный сбор и передача данных, получаемых со средств НК, позволит решить как оперативные вопросы по допуску подрядчиков к проведению контроля и оценки достоверности выполняемых работ, так и последующей обработки полученных данных для предиктивной аналитики.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203
2. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204

3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р

4. Концепция «Цифровая трансформация 2030» (ПАО «Россети»). url: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 24.02.2022)

5. Концепции развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 года. url: https://docs.cntd.ru/document/420365526 (дата обращения: 24.02.2022)

6. Мигалин С. Цифровая платформа // РЭА. Ежемесячный журнал атомной энергетики России. № 11, 2018. С. 5-10. url:

https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/568/5689d09fee116963b9e0b58ee5181e9c.pdf (дата обращения: 21.11.2021)

7. Крень А., Дендик М., Иванов В. Индустрия 4. 0: трансформации в неразрушающем контроле // Наука и инновации, №2, 2019. С. 28 – 32

8. Гоголинский К.В., Сясько В.А. От неразрушающего контроля к мониторингу состояния. Тенденции развития цифровой экономики // В мире НК, № 1, 2020. С. 4-8

9. Global Non-Destructive Testing Inspection Services Market, Forecast to 2022

10. Olympus Scientific Cloud. url: https://www.olympus-ims.com/ru/the-olympus-scientific-cloud/ (дата обращения: 24.02.2022)

11. GE is shifting the strategy for its $12 billion digital business. url: https://www.businessinsider.com/r-ge-shifts-strategy-financial-targetsfor-digital-business-after-missteps-2017–8 (дата обращения: 24.02.2022).

ПОДХОДЫ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКЕ РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

APPROACHES BASED ON DIGITAL TECHNOLOGIES IN COMPREHENSIVE DIAGNOSIS BY VARIOUS PHYSICAL METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

Алешин Николай Павлович1
Aleshin N. P.,
Крысько Николай Владимирович1
Krysko N. V.,
Щипаков Никита Андреевич1
Shchipakov N. A.,
Кусый Андрей Геннадьевич1
Kusyy A. G.

[1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),
105005, город Москва, Бауманская 2-я улица, дом 5 строение 1
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia
e-mail: kryskonv@bmstu.ru1

***Аннотация**: Информация, полученная в результате проведения контроля одним из методов, ограничена в силу его физических возможностей, может быть неполной или неоднозначной. Так же, данные, полученные несколькими методами неразрушающего контроля, могут быть противоречивыми, если анализировать их по отдельности. Поэтому целесообразно применение комплексной диагностики несколькими методами неразрушающего контроля, где при принятии решения о наличии и типе дефекта могут быть применены цифровые технологии сочетания данных. В работе приведены особенности легко автоматизируемых методов неразрушающего контроля, пригодных для выявления и классификации поверхностных объемных и плоскостных дефектов. Представлены особенности и параметры их сигналов. Так же в работе показаны подходы, позволяющие производить принятие решений по результатам комплексной диагностики, а именно подходы на основе статистических алгоритмов, теории нечетких множеств и машинного обучения.*

Ключевые слова: сочетание данных, неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, вихретоковый метод, поверхностные дефекты

Abstract: The information obtained as a result of testing by one of the methods is limited due to its physical capabilities, may be incomplete or ambiguous. Also, the data obtained by several methods of non-destructive testing can be contradictory if they are analyzed separately. Therefore, it is advisable to use complex diagnostics by several methods of non-destructive testing, where digital technologies for combining data can be used when deciding on the presence and type of a defect. The paper presents the features of easily automated non-destructive testing methods suitable for detecting and classifying surface volumetric and planar defects. The features and parameters of their signals are presented. The paper also shows approaches that allow making decisions based

on the results of complex diagnostics, namely approaches based on statistical algorithms, fuzzy set theory and machine learning.

Key words: data fusion, non-destructive testing, ultrasonic testing, eddy-current testing, surface flaws.

Введение

Сегодня перед производителями оборудования для неразрушающего контроля стоят задачи автоматизации не только процессов сканирования, но и процедуры интерпретации результатов контроля [1, 2]. Поскольку каждый метод неразрушающего контроля имеет свои преимущества и недостатки, то для полноценной диагностики объекта контроля по большинству действующих документов регламентировано поочередное применение нескольких методов. Информация, полученная в результате проведения контроля одним из методов, ограничена в силу его физических возможностей, может быть неполной или неоднозначной. С другой стороны, данные, полученные несколькими методами неразрушающего контроля, могут быть противоречивыми, если анализировать их по отдельности. При проведении комплексной диагностики несколькими методами неразрушающего контроля для принятия решения о наличии и типе дефекта могут быть применены цифровые технологии сочетания данных.

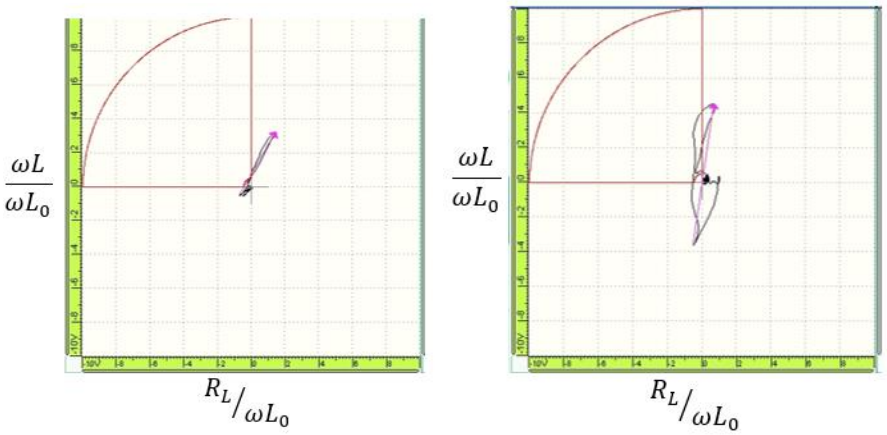
Сочетание цифровых данных при комплексной диагностике определяется как синергетический процесс объединения цифровых данных от отдельных источников для получения более согласующейся, точной и полезной информации, чем информация от одного источника [3]. Сочетание цифровых данных от различных источников широко применятся в военной промышленности и робототехнике, а сегодня и в неразрушающем контроле. Применение такого подхода анализа результатов неразрушающего контроля может позволить повысить эффективность их интерпретации и увеличить вероятность обнаружения и интерпретации типа дефекта.

В данной работе описаны возможности сочетания данных вихретокового и ультразвукового методов неразрушающего контроля для выявления дефектов основного материала, выходящих на поверхность с использованием цифровых технологий.

Методика экспериментального исследования

При неразрушающем контроле основного металла важно иметь возможность автоматического определения типов эксплуатационных дефектов, таких, как «трещина» и «язва», так как они имеют разные степени опасности. К методам неразрушающего контроля, позволяющим выявлять поверхностные дефекты и легко поддающимся автоматизации можно отнести вихретоковый, ультразвуковой. При анализе данных контроля каждого из перечисленных методов по отдельности, возникает множество неоднозначностей при определении типа поверхностного дефекта.

Вихретоковый метод неразрушающего контроля является высоко производительным бесконтактным методом, сигнал которого представляется в виде изменений электромагнитного импеданса на комплексной плоскости, действительная ось которой является нормализованным активным сопротивлением вихретокового преобразователя (ВТП) ($\frac{R_L}{\omega L_0}$), а мнимая ось – нормализованным индуктивным сопротивлением ВТП ($\frac{\omega L}{\omega L_0}$) и имеет две основные характеристики: амплитуду и фазу. По типу представляемого сигнала вихретоковые преобразователи разделяются на абсолютные (рисунок 1 - а) и дифференциальные (рисунок 1 - б) [4].



а) б)

Рисунок 1 – Пример вихретокового сигнала. а) – абсолютного ВТП, б) – дифференциального ВТП

Для обнаружения поверхностных дефектов ультразвуковым методом применяются поверхностные волны. Ввод ультразвуковых поверхностных волн может быть реализован с помощью либо пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), либо с помощью электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП). ЭМАП позволяет проводить сканирование с большей скоростью, т.к. не требует применения контактной жидкости [5]. При контроле поверхностными волнами ультразвуковой сигнал имеет только единственный параметр – амплитуду, пример ультразвукового сигнала представлен на рисунке 2.

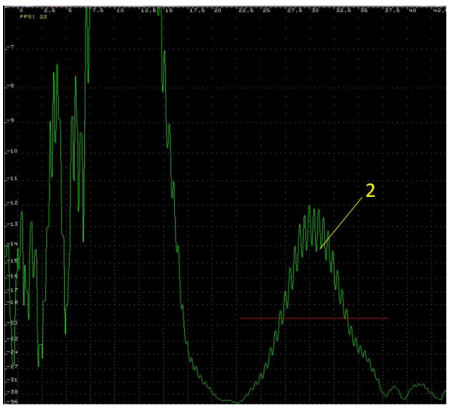


Рисунок 2 – Пример ультразвукового сигнала.

В данной работе было произведено сканирование 216 поверхностных плоскостных и объемных дефектов. При ультразвуковом контроле фиксировалась амплитуда сигнала, а при вихретоковом контроле фиксировались амплитуда и фаза сигнала.

Результаты и обсуждение

Результаты сканирования были нанесены на трехмерный график и представлены на рисунке 3.

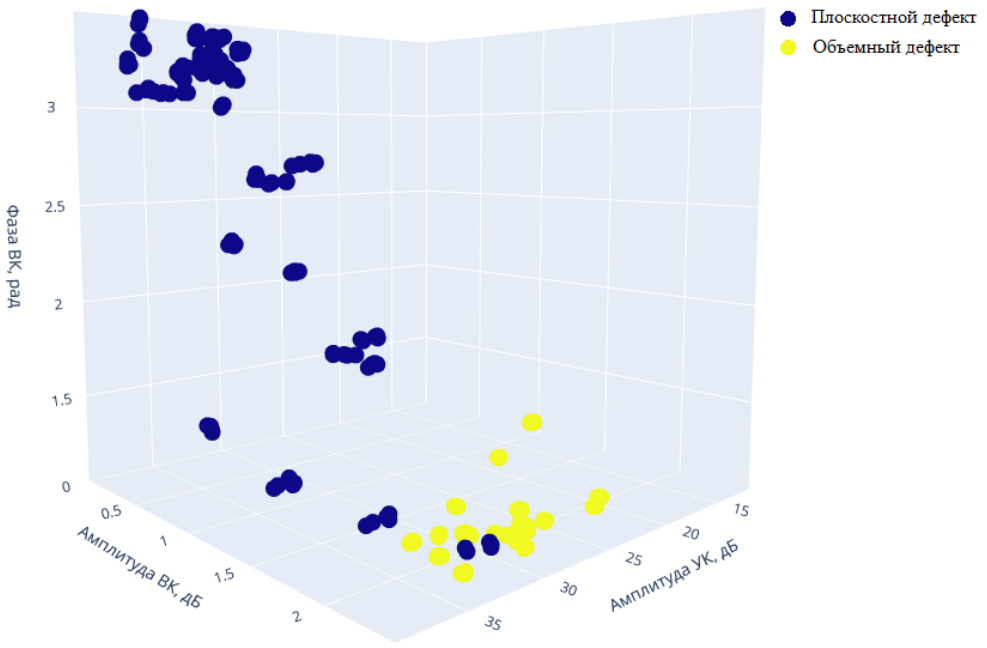


Рисунок 3 – Представление результатов сканирования

Как видно из рисунка 3, существует область неоднозначности для идентификации типа поверхностного дефекта по двум параметрам вихретокового контроля и одному параметру ультразвукового контроля. Для построения классификатора подобных данных (которые содержат неоднозначность) могут быть применены следующие подходы, а именно на основе статистических алгоритмов, теории нечетких множеств и машинного обучения.

Наиболее распространенными алгоритмами сочетания данных являются алгоритмы на основе Байесовского вывода или теории Демпстера — Шафера.

Принцип использования Байесовского вывода для сочетания данных от нескольких систем неразрушающего контроля основан на том факте, что Байесовский вывод позволяет объединять априорную и выборочную информации. Классифицируемые типы дефектов представляются как пространство гипотез $\{\boldsymbol{C_1}, \boldsymbol{C_2}, \dots, \boldsymbol{C_m}\}$, которые должны быть взаимоисключающими и исчерпывающими. Здесь C_i является заранее определенным типом дефекта, который должен удовлетворять условию $\sum_i \boldsymbol{P(C_i)} = \boldsymbol{1}$ [6], и

$$\boldsymbol{P(C_j|S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_n)} = \frac{\boldsymbol{P(C_j)}\left[\boldsymbol{P(S_1|C_j)P(S_2|C_j)\dots P(S_n|C_j)}\right]}{\sum_i \boldsymbol{P(C_i)}\left[\boldsymbol{P(S_1|C_i)P(S_2|C_i)\dots P(S_n|C_i)}\right]} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{P(C_i)}$ - априорная вероятность того, что тип дефекта определен правильно, а $\boldsymbol{P(S|C_i)}$ - вероятность наличия сигнала S, если известно, что в данной области находится дефект, относящийся к типу C_i.

В Байесовском выводе все вероятности должны быть взаимоисключающими и исчерпывающими. Теория Демпстера — Шафера вместо вероятностей использует функции масс, которые позволяют присвоить значение любому подмножеству [6]. Механизм для обновления значения массы представлен в (2):

$$\boldsymbol{m_{12}(A_k)} = \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A_k} \boldsymbol{m_1(A_i)m_2(A_j)}}{\boldsymbol{1} - \sum_{A_i \cap A_j = 0} \boldsymbol{m_1(A_i)m_2(A_j)}} \quad (2)$$

где $\boldsymbol{m_1(A_i)}$ и $\boldsymbol{m_2(A_j)}$ - функции массы по результатам измерений двух систем неразрушающего контроля, соответственно. Выходное значение $\boldsymbol{m_{12}(A_k)}$ содержит

информацию о том, насколько значения параметров сигнала соответствуют распределению определенных типов данных.

Выводы

В работе приведены особенности легко автоматизируемых методов неразрушающего контроля, пригодных для выявления и классификации поверхностных объемных и плоскостных дефектов. Представлены особенности и параметры их сигналов.

Так же в работе представлены результаты сканирования вихретоковым и ультразвуковым методами неразрушающего контроля 216 поверхностных плоскостных и объемных дефектов. Показана неоднозначность в классификации данных.

Показаны подходы для построения классификатора для подобных данных (которые содержат неоднозначность), а именно подходы на основе статистических алгоритмов, теории нечетких множеств и машинного обучения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00524, https://rscf.ru/project/22-29-00524/

Список литературы

1. McNab A, Dunlop I. Advanced visualisation and interpretation techniques for the evaluation of ultrasonic data: the NDT workbench, May 1993, The British Journal of Non Destructive Testing, 35(5), 233-40.
2. Smith RA. Evaluation and accuracy assessment of Andscan - a portable non-destructive scanner - Part 1: Andscan hardware and software, April 1995, Insight, 37(4), 284-9.
3. Haghighat M., Abdel-Mottaleb M., Alhalabi W. Discriminant Correlation Analysis: Real-Time Feature Level Fusion for Multimodal Biometric Recognition // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2016. — Т. 11, issue. 9.
4. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля: монография. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 288 с.
5. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. 2¬е изд., перераб. и доп. — М.: Инновационное машиностроение, 2019. — 576 с.: ил.
6. Challa, S., and D. Koks. 2004. Bayesian and Dempster–Shafer fusion. Sadhana 29(2):145−76.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ШАБЛОНЫ ВИК

Universal gauge used in visual and measuring control

Шубочкин Андрей Евгеньевич[1],
Shubochkin A. E.

[1]ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР»,
119048, РФ, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр.1.
RII MSIA “SPECTRUM”,
119048, Russia, Moscow, st. Usacheva, 35, building 1.
e-mail: sae@niiin.ru.

Аннотация. *В статье рассмотрены технические возможности наиболее известных универсальных шаблонов импортной разработки, применяемых при проведении визуального и измерительного контроля для определения геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных поверхностных несплошностей. Продемонстрировано, что упомянутые шаблоны не позволяют обеспечить требования действующих в РФ нормативных документов к допускаемой погрешности измерений.*

Новый Универсальный шаблон специалиста неразрушающего контроля «TapiRUS», созданный в Научно-исследовательском институте интроскопии (ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр») для замены многочисленных шаблонов и приспособлений, используемых при визуальном и измерительном контроле (ВИК) качества сварных соединений, обеспечивает жесткие требования нормативных документов к погрешности измерения параметров сварных соединений и габаритных размеров обнаруженных дефектов.

Шаблон позволяет производить с точностью, требуемой в нормативных документах, более 40 измерений, ряд из которых не доступны другим средствам измерения. Он снабжен полноценной методикой проведения измерения на всех этапах изготовления и эксплуатации сварных соединений. Доступна онлайн версия методики контроля и калькулятор для расчета ряда параметров, не подлежащих прямому измерению.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, визуальный и измерительный контроль, сварные соединения, погрешность измерения, универсальный шаблон, TapiRUS.*

Abstract. The article gives the detailed description of technical capabilities of the well-known universal gauges of foreign design such as WG-1 and BRIDGE CAM, used in visual and measuring control to determine the geometric parameters of the welded joint and detected surface discontinuities. It is shown that the considered calibers can't ensure the requirements of the normative documents, which are in force in the Russian Federation, to the permissible measurement error. The term “measurement error” used by the sellers of these universal gauges is in fact only the part of instrumental error of these control means.

The welding gauge TapiRUS for NDT Specialists developed at the Scientific Research Institute of Introscopy (RII MNPO "Spectrum") with the intention to replace the numerous patterns and devices used in visual inspection and conducting quality control of welded joints, secures strict requirements of regulatory documents to the measurement error of the parameters of welded joints and the overall dimensions of the detected defects. The TapiRUS gauge is a new and more accurate measuring instrument. It’s equipped with a complete methodological manual for measurement at all stages of the manufacture and operation of welded joints. The gauge allows you to make more than 40 measurements with the accuracy required in regulatory documents, some of which are not

available to other measuring tools. The online methodological manual and online calculator for calculating parameters not subject to direct measurement are available. This manual is available on the website both in the PC and mobile versions and for download. It can be used as a training tool for training specialists in the field of welding and non-destructive testing.

Key words: non-destructive testing, visual and measurement control, welded joints, universal gauge, measurement error, TapiRUS.

Введение

Нормативные документы ([1], [2], [3], [4]) в области визуального и измерительного неразрушающего контроля (ВИК) устанавливают жесткие требования к допускаемой погрешности измерений геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных поверхностных несплошностей [5]. Так, при измерении ряда параметров погрешность не должна превышать 0,1 мм. Строгие требования к качеству ответственных сварных соединений применяются не только на железнодорожном транспорте [6, 7] и в атомной промышленности [4], но и нефтегазовой отрасли. Такие же требования остаются и в подготавливаемому к выпуску новому СТО Газпром 15-Х.Х-004-20ХХ «Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Неразрушающие методы качества сварных соединений промысловых и магистральных газопроводов» на замену [3] и разрабатываемому Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации межгосударственному стандарту ГОСТ ВИК_v1.5_21.12.2021_МТК «Визуальный и измерительный контроль продукции, применяемой на атомных энергетических установках. Унифицированная методика контроля». При этом для измерения геометрических параметров кольцевых сварных соединений и оценки их качества следует применять шаблоны, в том числе универсальные

Следует отметить, что погрешность измерения является одним из значимых факторов контроля и, наряду с отклонениями формы, размеров несплошностей и др., влияет на назначение критериев отбраковки. При этом нормативные документы не предоставляют возможности самостоятельно выбирать уровни отбраковки в зависимости от точностных характеристик использованного оборудования при измерениях. В соответствии с [8] под погрешностью понимают разность между измеренным и опорным значением величины (в нашем случае истинное значение величины - значение, которое идеальным образом определяет величину при тех условиях, при которых эту величину рассматривают [9], [10]). Допускаемая погрешность измерения состоит из случайной и неучтенной систематических погрешностей измерения [11] и включает погрешности от средств измерений, установочных мер, температурных деформаций, измерительного усилия, базирования детали.

Размеры, по которым производится приемка изделий, следует, в соответствии с [12], устанавливать с учетом влияния допускаемой погрешности измерений. При назначении критериев отбраковки по результатам измерительного контроля учитываются не только влияние отклонений формы и величины поверхностных дефектов на функциональные свойства продукции и другие значимые для разработчика (конструктора, проектировщика) факторы, но и возможные погрешности измерений. Таким образом, при применении средств контроля и методик, не обеспечивающих требуемую погрешность измерений, ужесточаются нормы отбраковки, а в случае регламентирования требований к погрешности измерения подобные средства контроля использовать невозможно.

На практике принятые руководящие документы и стандарты, регулирующие нормы отбраковки, не допускают вариативность в данном вопросе, а значит и возможность применения таких средств контроля исключена!

В связи с изложенным, особую актуальность приобретает вопрос корректного выбора средств, применяемых при проведении визуального и измерительного контроля качества сварных соединений.

Применяемые универсальные шаблоны сварщиков и специалистов неразрушающего контроля. На практике сварщики и специалисты неразрушающего контроля (НК) применяют универсальные шаблоны. Следует обратить внимание, что ни один из используемых сегодня шаблонов комплексно не решает задачу контроля. С точки зрения нормативных документов, шаблоны УШС-3, Красовского, BridgeCam и др. являются устаревшими, поскольку на них нанесены шкалы с шагом 1 мм. Шаблоны Ушерова-Маршака, УШС-4, WG-1, WG-2 и др., имеющие шкалу с нониусом, ориентированы на измерение одного линейного значения и не в состоянии решить все задачи контроля. Более того, на рынке средств НК представлены шаблоны импортного производства серий WG-1, BridgeCam, HJC40 и пр. В документации производителей и на сайтах поставщиков погрешность измерения шаблонов подменяется на часть их инструментальной погрешности (точность считывания шкал в лабораторных условиях или на допустимое отклонение шкал) [13]. Для сравнения следует привести ГОСТ Р 50.05.08-2018 [14] в «приложении Б» которого для шаблонов WG1, WG2, MG8 в графе «Погрешность измерения» заявляется лишь цена деления их шкал равная 1 мм. Другие шаблоны, такие как универсальный шаблон для стыковых швов УШС-3, УШС-4; шаблоны Ушерова-Маршака, Красовского, V-Wac, INOX, HI-LO имеют узкую область применения либо только миллиметровые шкалы и не могут в достаточной мере удовлетворить требованиям, предъявляемым к ВИК сварных конструкций и соединений. Многие схемы измерений нереализуемы вышеприведенными шаблонами и калибрами в принципе.

Метрологические предпосылки для работы с более точными средствами измерения. Введение в эксплуатацию новых более точных средств измерения линейных размеров сварных соединений является очевидным шагом развития ВИК. Однако на практике нововведения вызывают непринятие со стороны сварщиков и контролеров. Многие считают, что при использовании более точных средств измерения увеличится число забракованных сварных соединений и, как следствие, уменьшится производительность и оплата труда.

Но так ли это на самом деле? Согласно нормативным документам, для каждого измеряемого параметра задается допустимый диапазон его значений либо порог отбраковки — граничные величины, позволяющие отделить годные сварные соединения от брака. При задании граничных условий учитывается достаточно большое число влияющих факторов: свойства материалов и прочностные расчеты, условия и режимы эксплуатации металлоконструкций, экономическая целесообразность и т. д. Кроме вышеперечисленных факторов, в итоговом значении граничных условий принимаются в расчет средства и методики измерения контролируемых величин, их метрологические характеристики. Рассмотрим степень влияния метрологических характеристик средств измерения. Для каждого параметра существует его истинное значение, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину, однако оно может быть получено только в результате бесконечных измерений с постоянным совершенствованием методов и средств. В общем случае для каждого средства измерения можно определить вероятность попадания истинного значения в заданный доверительный интервал. Таким образом, чем больше погрешность измерения у используемого средства, тем шире доверительный интервал, соответствующий заданной вероятности, и тем более значительную поправку требуется вносить в граничные условия параметра. Хорошо известно, что при любом измерении могут возникнуть ошибки первого и второго рода, т. е. годное сварное соединение ошибочно относят к браку либо признают браком. Для уменьшения вероятности возникновения ошибки первого рода в нормативных

документах закладывается процент перебраковки — величина, прямо пропорциональная интервалу измерительной погрешности методики и (или) измерительного инструмента и влияющая на величину порогов отбраковки.

Именно улучшение метрологических характеристик средств измерения позволяет более корректно определить границы отбраковки и тем самым снизить процент признания годных изделий браком, не опасаясь за пропуск брака.

Универсальный шаблон специалиста неразрушающего контроля TapiRUS. В сложившейся ситуации, когда в организациях, проводящих контроль сварных конструкций и соединений, отсутствуют средства измерения, удовлетворяющие требованиям стандартов ВИК, встала острая необходимость в новом универсальном измерительном устройстве.

В Научно-исследовательском институте интроскопии (НИИИН МНПО "Спектр") для замены многочисленных шаблонов и приспособлений, используемых при визуальном и измерительном контроле качества сварных соединений разработан Универсальный шаблон специалиста неразрушающего контроля TapiRUS, который обеспечивает требования по погрешности измерения и позволяет реализовывать более 40 схем измерения (рисунок 1).

TapiRUS позволяет определять большинство геометрических параметров сварных соединений и поверхностных дефектов: ширина и выпуклость шва, глубина подреза, величина смещения кромок, катет углового шва, угол скоса, зазор и др.

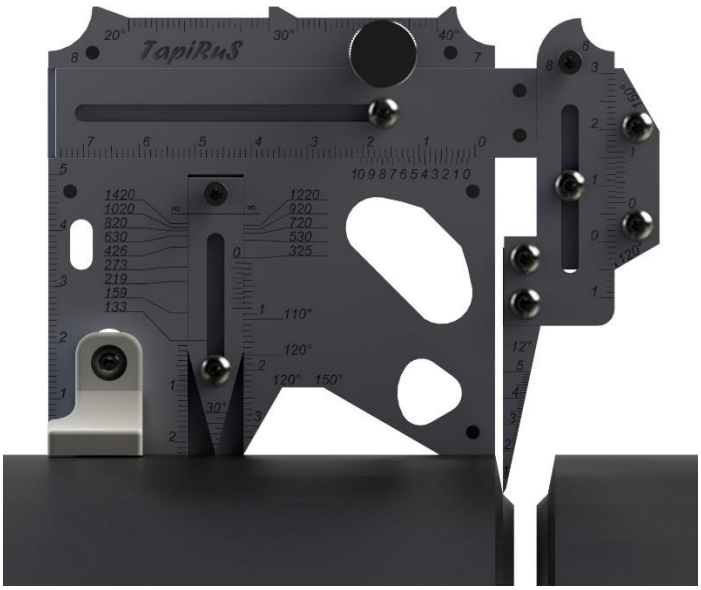


Рисунок 1 – Универсальный шаблон специалиста НК “TapiRUS”

Впервые разработана подробная инструкция, представленная на сайте шаблона (https://www.tapirus.info), в которой содержатся схемы измерения параметров сварных соединений, контролируемых на всех стадиях применения ВИК; полное описание работы шаблона и его шкал с примерами. Кроме прямых измерений шаблон TapiRUS позволяет реализовывать и сложные схемы с непрямыми измерениями. Для удобства пользователей на сайте шаблона встроен калькулятор для расчета подобных измерений: угол скоса в сложных разделках, угол между элементами конструкции, перелом оси, угловое смещение, выпуклость при сварке разнотолщиных элементов, диаметр трубы, расчет высот и глубин при контроле продольного шва труб и пр.

Новый шаблон TapiRUS – полностью отечественное изделие. Он изобретен, спроектирован и изготавливается на территории России. Стоит отметить, что разработка,

подготовка к производству и изготовление проведены исключительно в цифровом формате. При производстве шаблонов TapiRUS применяются новейшие лазерные и аддитивные технологии: используются станки высокоточной лазерной резки в инертном газе, пяти-осевые обрабатывающие ЧПУ центры, сверхточная цветная лазерная гравировка всего изделия в собранном виде, SLS печать - селективное лазерное спекание, технология послойного синтеза материала из порошкового материала.

Патент РФ. ГРСИ. Конструкция шаблона защищена патентом на изобретение РФ «Универсальный шаблон специалиста неразрушающего контроля» № RU 2714458. от 18.02.2020 (заявка 20.09.2019). Универсальный шаблон специалиста НК TapiRUS внесен в Государственный реестр средств измерений под номером: ГРСИ РФ 82433-21.

Заключение

УШС НК TapiRUS, созданный для замены многочисленных шаблонов и приспособлений, используемых при визуальном и измерительном контроле качества сварных соединений, является не только новым и более точным средством измерения, но и вехой перехода в область цифровых технологий. Вместе с измерительным инструментом специалисты в области сварки и ВИК получают доступную, современную методику контроля на всех этапах производства и эксплуатации сварных соединений (представлена также в формате pdf); онлайн калькулятор, позволяющий рассчитать ряд параметров, не доступных прямому измерению. Пользователь доступно в любое время учебное пособие с полным описанием работы шаблона TapiRUS и его шкал с примерами. Универсальность шаблона обеспечивается возможностью реализации более 40 схем измерения при соблюдении требования по погрешности измерения.

Список литературы

1. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Введ. 11.06.2003. М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004.
2. РД-25.160.10-КТН-016-15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов. Введ. 16.04.2015. Изм. 21.12.2017. 195 с.
3. СТО Газпром 2-2.4-715-2013. Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов: стандарт организации / Разработан научно-исследоват. ин-том природ. газов и газовых технологий. - Взамен СТО Газпром 2-2.4-083-2006 / Введ. 2014-03-17. - Москва: ОАО "Газпром", 2014. - VI, 226 с.
4. ГОСТ Р 50.05.08-2018 «Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Визуальный и измерительный контроль».
5. Основы диагностики технических устройств и сооружений: монография / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 445 с.
6. ГОСТ 33976-2016 «Соединения сварные в стальных конструкциях железнодорожного подвижного состава. Требования к проектированию, выполнению и контролю качества».
7. ТИ 07.186-2018 «Технологическая инструкция по визуальному методу неразрушающего контроля деталей локомотивов при выполнении ремонтов».
8. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
9. ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93) Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.
10. ISO 3534-1:1993 Statistics-Vocabulary and symbols - Part 1: Statistical methods. Terms and definitions.

11. ГОСТ 8.051-81 (СТ СЭВ 303-76) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.

12. РД 50-98-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (По применению ГОСТ 8.051-81).

13. О погрешности измерения геометрических параметров сварного соединения с использованием шаблонов / А.Е. Шубочкин, М.А. Прилуцкий, Г.В. Зусман, Б.М. Кантер // Сварка и Диагностика. 2019. № 6. С. 41—45.

14. ГОСТ Р 50.05.08-2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Визуальный и измерительный контроль.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

THE POSSIBILITY OF USING THE METHOD OF MAGNETIC STRUCTUROSCOPY TO CONTROL OF STRESS-STRAIN STATE IN STRUCTURAL STEELS AND ALLOYS

Ефимов Алексей Геннадьевич[1]
Efimov A.G.

[1] ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР»,
119048, РФ, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр.1.,
[1] JSC RII «SPECTRUM»
119048, Russian Federation, Moscow, st. Usacheva, 35, building 1.
e-mail: efimov@niiin.ru.

Аннотация: *Контроль напряженно-деформированного состояния, действующих напряжений, накопленной усталостной поврежденности является одной из задач неразрушающего контроля. В данной статье рассмотрены современные исследования в области магнитного метода неразрушающего контроля, направленные на решение задачи контроля накопленной поврежденности в конструкционных сталях и сплавах. Рассмотрены исследования и их практическая реализация для метода коэрцитивной силы, метода контроля по остаточной намагниченности. Рассмотрены физические основы указанных методов неразрушающего контроля, проведен их краткий сравнительный анализ. Приведены примеры контроля изделий ответственного назначения, таких как действующие нефте- и газопроводы, сосуды под давлением, детали кранового хозяйства и др. Приведены примеры статических и усталостных испытаний образцов из различных сталей и сплавов: Ст.3, Ст.20, Ст.45, Д16Т, АМг6, АМг6Н, 12Х18Н9Т, 08Х18Н9, 40Х, Р91. Рассмотрены вопросы метрологии, приведены примеры мешающих параметров, влияющих на погрешность измерения. Для ряда методов представлены примеры используемой аппаратуры. Сделаны выводы о границах применимости указанных методов и существующих ограничениях. Приведены ссылки на исследования в данной области, имеющие значение на практического внедрения приборов, основанных на магнитном методе неразрушающего контроля.*

Ключевые слова: *напряжённо-деформированное состояние, пластичность, разрушение, накопление повреждений, малоцикловая усталость, долговечность, ресурс, неразрушающий контроль. электромагнитный контроль, магнитный контроль.*

Abstract: Control of the stress-strain state, compressive and tension stresses, accumulated fatigue damage is one of the tasks of non-destructive testing. This review discusses modern research in the field magnetic methods of non-destructive testing, aimed at solving the problem of monitoring the accumulated damage in structural steels and alloys. Investigations and their practical implementation for the method of coercive force, the method of control by remanence are considered. The physical foundations of non-destructive testing methods are considered, their brief comparative analysis is carried out. Examples of non-destructive testing of critical units, such as

operating oil and gas pipelines, pressure vessels, crane parts, etc. are given. Examples of static and fatigue tests of samples from various steels and alloys are given: St.3, St.20, St.45, D16T, AMg6, AMg6N, 12X18N9T, 08X18N9, 40X, P91. Metrology issues are considered, examples of interfering parameters affecting the measurement error are given. Examples of the equipment used are presented for a number of methods. Conclusions are drawn on the limits of applicability of these methods and the existing limitations. The review article cites references to works in the field of magnetic structurescopy and the research in this field, which are of importance for the practical implementation of devices based on magnetic non-destructive testing methods.

Key words: stress-strain state, ductility, fracture, damage accumulation, low-cycle fatigue, durability, resource, non-destructive testing, magnetic control.

Введение

Неразрушающий магнитный контроль механических свойств ферромагнитных материалов основан на корреляции между магнитными и физико-механическими свойствами, когда они одновременно зависят от одних и тех же факторов: химического состава, режима термической обработки, пластической деформации, микро- и макронапряжений, расположения дислокаций и др.

В случае углеродистых малолегированных сталей вышеперечисленные факторы одновременно и однозначно влияют на механические и магнитные свойства металла. Поэтому неразрушающий магнитный метод может успешно применяться для контроля напряженно-деформированного состояния металла, уровня пластической деформации и усталостных повреждений наиболее нагруженных узлов металлоконструкций, работающих в условиях длительного циклического нагружения.

Микро- и макродефекты структуры, накапливаясь в металле в процессе циклического нагружения при растяжении, сжатии, изгибе или кручении, как бы собирают и хранят информацию, однозначно связанную с максимальными величинами действовавших нагрузок, в результате чего структура металла стальной детали конструкции выполняет функции своеобразного запоминающего датчика пикового значения силы. А ряд магнитных параметров, однозначно связанных с количеством нарушений структуры металла, таким образом, является своеобразным отображением силового режима работы конструкции.

Материалы и экспериментальные процедуры

В основе метода коэрцитивной силы (Нс), лежит взаимосвязь между магнитными свойствами металлов и сплавов, их структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами. Корреляционные зависимости между коэрцитивной силой и степенью остаточной деформации образцов позволяют установить степень поврежденности металла и его упругой пластической деформации. Также можно говорить об оценке остаточного ресурса конструкции. Для ряда конструкционных сталей, например, таких как Ст3, данная взаимосвязь является однозначной и подлежит численной оценке. Установлено, что для малоуглеродистых и низколегированных сталей средний размер ферритного зерна является основным параметром, который определяет их прочностные и магнитные свойства.

Для большинства низкоуглеродистых сталей, используемых в конструкциях ответственного назначения, как правило, существует корреляция между механическими свойствами материала и его магнитными свойствами. Метод коэрцитивной силы успешно применяется для установления начала пластической деформации в крановом, лифтовом хозяйстве и при контроле сосудов, находящихся под давлением.

Существует несколько факторов, влияющих на погрешность измерения коэрцитивной силы, основными являются: толщина объекта контроля и величина немагнитного зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью. Настройка

и поверка всех коэрцитиметров происходит на стандартных образцах, имеющих строго определенные геометрические размеры (комплект стандартных образцов коэрцитивной силы СОКС), в этом случае никак не учитывается погрешность, вызванная влиянием толщины изделия в зоне контроля на показания магнитных структуроскопов. Разница показаний на тонком листе и массивной плите, изготовленных из одного и того же материала может достигать 20%. Не рассматривая крайний случай, при уменьшении толщины лабораторных образцов в 2 раза (5 мм вместо 10мм), значение измеренной коэрцитивной силы меняется на 5%, что сравнимо с допускаемой основной погрешности измерения прибора. Расчет дополнительных экспериментально полученных поправок представлен в работе [1].

В работе [2] было проведено исследование влияния немагнитного покрытия на поверхности металла на результаты коэрцитиметрии. Такие исследования особенно важны для магнитного контроля конструкций с защитными покрытиями, например нефтегазовых трубопроводов. Пассивная защита труб от коррозии предполагает применение антикоррозионного покрытия. Удаление покрытия для проведения измерений (в т.ч. локальное) требует его обязательное восстановление. Рассмотрено влияние структуры трубных сталей на анизотропию коэрцитивной силы при продольном растяжении.

В основном на глубину промагничивания металла влияют габаритные размеры полюсной системы преобразователя и сила тока намагничивания, для большинства портативных коэрцитиметров этот параметр не превышает 20-30 мм [2].

Интересные результаты получены в диссертационной работе [2], посвященной оценке НДС нефте- и газопроводов с помощью метода коэрцитивной силы. Были получены экспериментальные зависимости показаний магнитного структуроскопа (коэрцитиметра) от величины касательных напряжений, измерение коэрцитивной силы проводилось в двух, взаимно перпендикулярных направлениях вдоль образующих трубы. Было подтверждено увеличение разности значений коэрцитивной силы, полученных для продольного и поперечного расположения преобразователя при росте значений касательных напряжений. Также, с точки зрения практики полезным следует считать предложенную методику определения максимальной величины относительной деформации материала, которая на основании полученных значений коэрцитивной силы в четырех точках одного сечения трубопровода, позволяет рассчитать значение коэрцитивной силы ненагруженного металла и оценить параметры напряженно-деформированного состояния конструкции.

Схожие исследования были проведены в публикациях [3, 4], в которой были рассмотрены аналитические зависимости между остаточной намагниченностью, коэрцитивной силой и максимальной магнитной проницаемостью металла, полученные для напряженного и ненапряженного состояния. Исследования проводились для трубных сталей, особое внимание уделялось околошовной зоне. Было доказано, что механические напряжения не изменяют характер установленной ранее взаимосвязи между магнитными характеристиками, полученной для ненапряженного состояния металла.

В исследовании [5] рассмотрена применимость магнитных параметров для контроля остаточных напряжений в ферромагнитных конструкционных сталях. Установлена однозначная корреляция коэрцитивной силы, начальной магнитной проницаемости, обратимой магнитной проницаемости в остаточном состоянии и отношения начальной и обратимой проницаемости с уровнем микронапряжений для железа Armco. Таким образом, продемонстрированы перспективы использования этих параметров для оценки остаточных напряжений в ферромагнитных конструкционных материалах. Показано, что отношение обратимой магнитной проницаемости в остаточном состоянии к начальной магнитной проницаемости более чувствительно к изменению микронапряжений чем традиционно используемая коэрцитивная сила.

В работе [6] Показано, что механические свойства стали 40Х монотонно изменяются при изменении температуры отпуска после закалки и имеют корреляционную зависимость. Получены уравнения линейной регрессии, определены коэффициенты корреляции и итоговая расчетная погрешность. Показано, что твердость HRC стали 40Х не имеет однозначной зависимости с ее коэрцитивной силой во всем диапазоне изменения температуры отпуска, при этом значительная погрешность измерения не позволяет использовать такой параметр контроля как релаксационная намагниченность для контроля твердости стали 40Х. Для магнитной структуроскопии был предложен параметр Hc1, для расчета которого использована коэрцитивная сила, измеренная на образцах из стали 40Х Hc и отношение остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Показано, что полученные результаты имеют не высокую относительную погрешность и устанавливают однозначную взаимосвязь между Hc1 и температурой отпуска стали 40Х в реально применяемом на практике диапазоне. Доказано, что метод коэрцитивной силы может применяться для контроля твердости стали 40Х.

В работе [7] рассмотрена дополнительная погрешность измерения коэрцитивной силы, вызванная работой по частным кривым намагничивания. Измерения проводились на образцах из стали Q235 при различных значениях тока возбуждения намагничивающего устройства.

В публикации [8] рассмотрено изменение при деформации магнитных свойств нержавеющей стали 08Х18Н9, относящейся к аустенитному классу. Установлена взаимосвязь между действующим напряжениями (деформациями) и измеренными значениями коэрцитивной силы, а также объемом α-фазы в металле. Доказана возможность применения метода коэрцитивной силы для оценки деградации и снижения механических свойств сталей аустенитного класса, подвергающихся деформационным воздействиям в ходе эксплуатационных воздействий.

В исследовании [9] представлены результаты исследования влияния пластической деформации на магнитные свойства образцов из мартенситной стали Р91. Исследования параметров петли гистерезиса и магнитных шумов Баргаузена проводились для случая одноосного растяжения и сжатия с значением пластической деформации ε=10 %. Выбор материала и диапазона деформации объясняется ожидаемыми высокими остаточными напряжениями в материале (как для случая сжатия, так и для растяжения), который не демонстрирует повышения интенсивности магнитных шумов как функции упругих напряжений. Полученные соотношения показывают, что при низком уровне деформации изменения плотности дислокаций могут играть доминирующую роль, однако при более высоком уровне деформации остаточные напряжения становятся доминирующим фактором. Это приводит к значительному уменьшению сигнала шумов Баркгаузена для деформации растяжения и увеличению для случая сжатия. Оба варианта нагружения приводят к увеличению коэрцитивной силы образцов, однако, растяжение сильнее влияет на изменение коэрцитивной силы материала.

Выводы

Метод магнитной структуроскопии (метод коэрцитивной силы) и метод контроля по остаточной намагниченности можно успешно применять для контроля накопленной поврежденности и напряженно-деформированного состояния, однако с учетом имеющихся ограничений. Для данного метода основным ограничением является влияние толщины контролируемого изделия на результаты измерения коэрцитивной силы, а также невозможность локального измерения, т.к. зона, для которой производится интегральная оценка, определяется габаритными размерами магнитопровода преобразователи. Не смотря на указанные ограничения, магнитная структуроскопия успешно применяется для

выявления структурных аномалий металлоизделий в таких отраслях как строительство, крановое и лифтовое хозяйство, сосуды, работающие под давлением и т.п.

Список литературы

1. Агиней Р.В. Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: дисс.канд. техн. наук - Ухта, 2005 – 143с.

2. Бердник М. М. Развитие метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла», дисс.канд. техн. наук - Ухта, 2010 – 175 с.

3. Сандомирский С.Г. Взаимосвязь между магнитными параметрами металла околошовной зоны трубных сталей при действии касательных и нормальных напряжений/ Деформация и разрушение материалов. 2016, № 10, с. 30-34.

4. Сандомирский С.Г. Взаимосвязь между магнитными параметрами металла трубных сталей в напряженном состоянии/ В сборнике: Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций Сборник материалов, Издательство ИМАШ УрО РАН, 2016. с. 121.

5. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., and Goruleva L. S. Correlation of residual stresses with magnetic properties of Armco iron/AIP Conference Proceedings 2053, 030022 (2018);

6. Сандомирский С.Г. Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40х/Механика машин, механизмов и материалов. 2019,. № 3 (48), с. 43-50.

7. V. Zakharov, G. Bezlyudko, R. Solomakha , A. Aman Monitoring of Fatigue and Stress-Strain State of Structures and Equipment with New Magnetic Transducer /WCNDT 2016, Book of Abstracts, I1, P.1-4

8. Нехотящий В.А., Палиенко А.Л., Гопкало А.П. Оценка деградации стали 08Х18Н9 по кинетике коэрцитивной силы/ В мире неразрушающего контроля – 2015, Т.18, №4, с.14-16.

9. L. Piotrowski, M. Chmielewski, Z. Kowalewski The Dominant Influence of Plastic Deformation Induced Residual Stress on the Barkhausen Effect Signal in Martensitic Steels/ Journal of Nondestruct Evaluation №36, 2017, DOI 10.1007/s10921-016-0389-x

РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ ОКОНЧАНИЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS CALCULATION OF TELECOMMUNICATION NETWORKS ANALOG TERMINALS

Батенков Кирилл Александрович[1]
Batenkov K.A.

[1]Академия ФСО России,
302015, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35,
[1]Academy of Federal Guard Service of Russia,
302015, Russia, Oryol, st. Instrument-making, 35
e-mail: pustur@yandex.ru

Аннотация: *В работе показано, что обычно затухание, или частотное искажение, для простого и составного канала тональной частоты имеет нормы, зависящие от количества транзитных каналов тональной частоты. Представлен пример расчета амплитудно-частотной характеристики при номинальных уровнях на входе четырехпроводного канала на заданных частотах и уровнях выходного сигнала.*

Ключевые слова: *амплитудно-частотная характеристика, частотное искажение, норма, канал тональной частоты, цифровая система передач.*

Abstract: The paper shows that usually attenuation, or frequency distortion, for a simple and composite channel of tonal frequency has norms depending on the number of transit channels of tonal frequency. An example of calculating the amplitude-frequency response at nominal levels at the output of a four-wire channel at specified frequencies and output signal levels is presented.

Key words: amplitude-frequency response, frequency distortion, norm, tonal frequency channel, digital transmission system.

Результаты и обсуждение

Амплитудно-частотная характеристика – зависимость остаточного затухания (усиления) от частоты синусоидального сигнала. Обычно затухание, или частотное искажение, представляется в форме логарифмического отношения выходного напряжения $U_{1,02}$ на опорной частоте (номинально 1,02 кГц) к его значению U_f на частоте f [1]

$$\Delta a = 20 \lg \frac{U_{1,02}}{U_f} = a_f - a_{1,02},$$

Предпочтительный уровень входной мощности составляет -10 дБм0 в соответствии с рекомендацией ITU-T O.6 [2].

Отклонение величины остаточного затухания Δa от значения $a_{1,02}$, измеренного на частоте 1,02 кГц, должно укладываться в следующие шаблоны. Для простого и составного канала тональной частоты нормы зависят от количества транзитных каналов тональной частоты (рис. 1, табл. 1) [3, 4]. Для каналов, образованных с помощью цифровых систем

передач нормы зависят от типа аналогового или цифрового окончания [1, 5, 6]. Для аналоговых окончаний нормы менее жесткие (рис. 2), чем для смешанных (рис. 3).

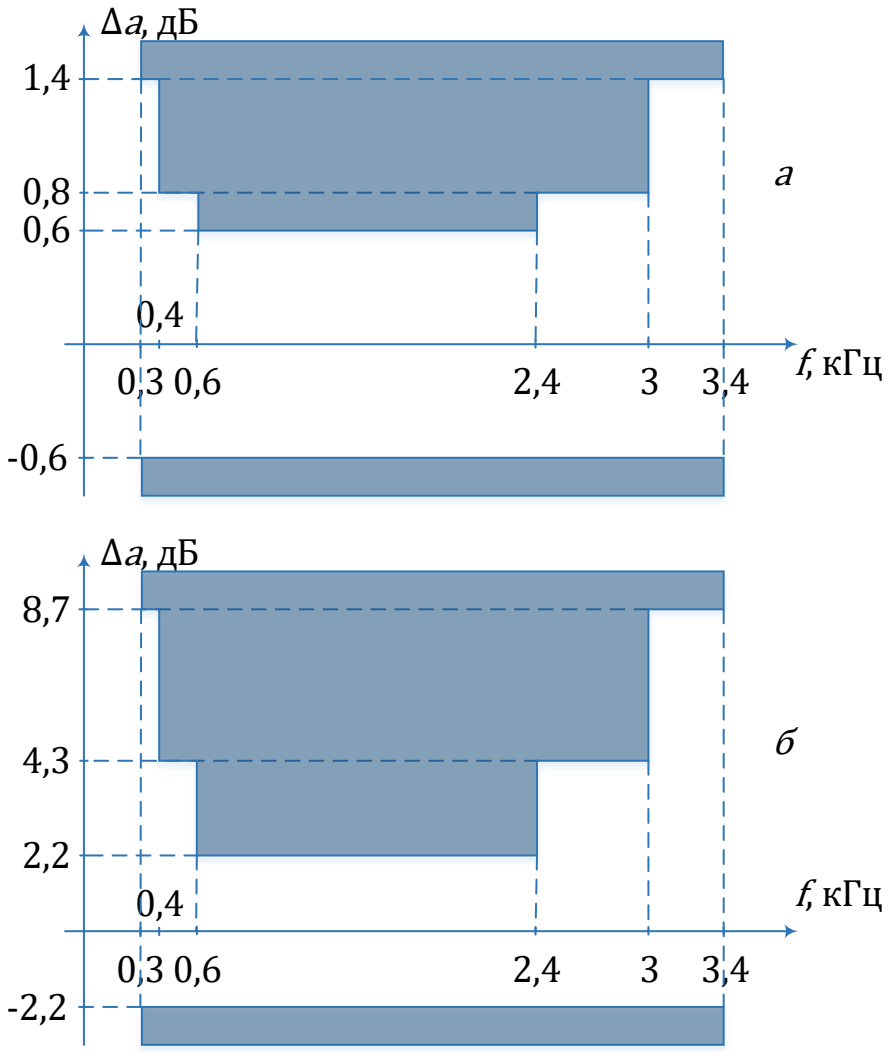


Рисунок 1 – Нормы на отклонение остаточного затухания Δa для простого канала тональной частоты ($а$) и с составного из двенадцати простых ($б$)

Пример.

При номинальных уровнях на входе четырехпроводного канала на частотах 350 Гц, 1,02 кГц и 3,2 кГц были получены следующие уровни выходного сигнала 3,7 дБо, 4 дБо и 4,7 дБо соответственно.

Определить соответствие амплитудно-частотной характеристики нормам для каналов, составленных из двух простых, а также для аналоговых и смешанных окончаний, организованных с помощью цифровых систем передач.

Дано: $L_{0,35} = 3{,}7$ дБо, $L_{1,02} = 4$ дБо, $L_{3,2} = 4{,}7$ дБо, $n = 2$.

Найти: $\Delta a_{0,35}$, $\Delta a_{3,2}$.

Остаточное затухание вычисляется для нормированных уровней ($L_0 = -13$ дБо) на частоте 1,02 кГц

$a = L_0 - L_{1,02} = -13 - 4 = -17$ дБ.

Остаточное затухание на частоте 350 Гц

$a_{0,35} = L_0 - L_{0,35} = -13 - 3{,}7 = -16{,}7$ дБ.

Отклонение остаточного затухания на частоте 350 Гц

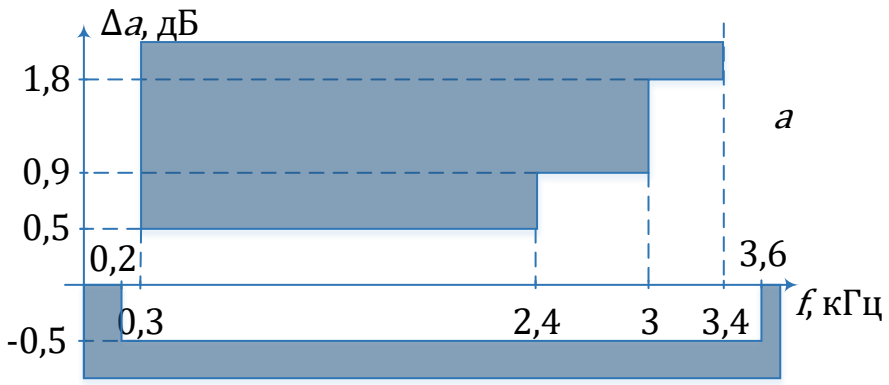
$\Delta a_{0,35} = a_{0,35} - a = -16{,}7 - (-17) = 0{,}3$ дБ.

Остаточное затухание на частоте 3,2 кГц

$a_{3,2} = L_0 - L_{3,2} = -13 - 4{,}7 = -17{,}7$ дБ.

Таблица 1 – Нормы на отклонение остаточного затухания Δa для простого и составных каналов тональной частоты

число простых каналов	полоса частот, кГц			
	верхняя			нижняя
	0,3–0,4; 3–3,4	0,4–0,6; 2,4–3	0,6–2,4	0,3–3,4
1	1,4	0,8	0,6	-0,6
2	2,3	1,2	0,9	-0,9
3	3	1,6	1	-1
4	3,7	1,9	1,2	-1,2
5	4,3	2,3	1,4	-1,4
6	5	2,6	1,5	-1,5
7	5,6	2,8	1,6	-1,6
8	6,2	3,2	1,7	-1,7
9	6,8	3,5	1,8	-1,8
10	7,4	3,7	1,9	-1,9
11	8	4,1	2	-2
12	8,7	4,3	2,2	-2,2



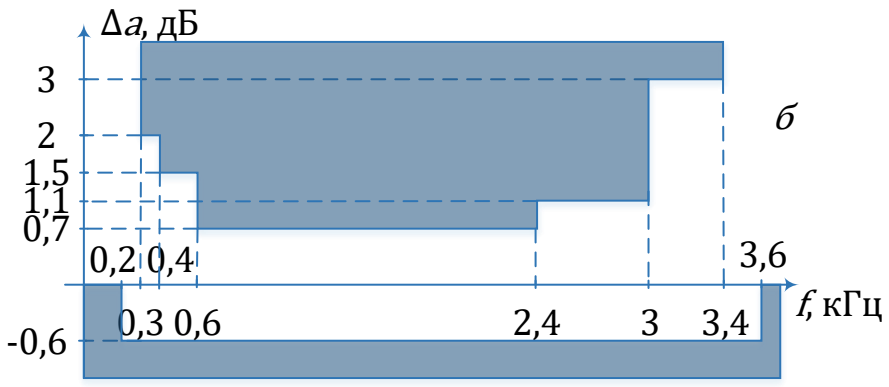


Рисунок 2 – Нормы на отклонение остаточного затухания Δa для аналоговых четырехпроводных (*а*) и двухпроводных (*б*) окончаний

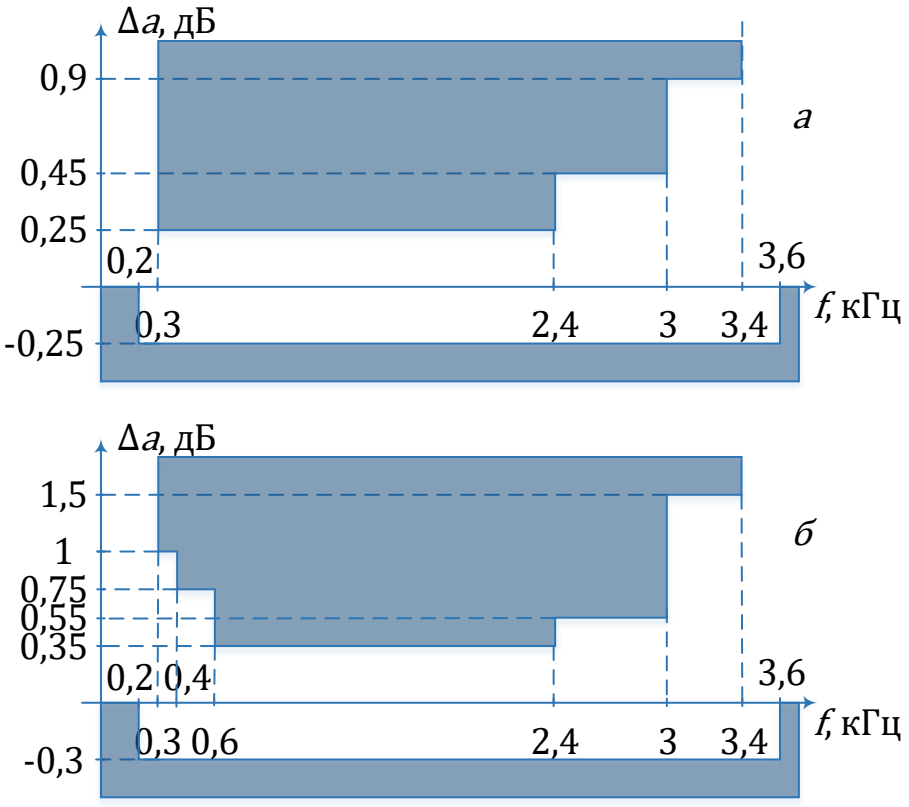


Рисунок 3 – Нормы на отклонение остаточного затухания Δa для каналов с аналоговым и цифровым четырехпроводными (*а*) и с аналоговым и цифровым двухпроводными (*б*) окончаниями

Отклонение остаточного затухания на частоте 3,2 кГц
$\Delta a_{3,2} = a_{3,2} - a = -17{,}7 - (-17) = -0{,}7$ дБ.

Для составного канала ($n = 2$) нормы удовлетворяются (табл. 1): $0{,}3 < 2{,}3$, $-0{,}7 > -0{,}9$. Для канала с аналоговыми окончаниями (рис. 2, *а*) нормы не удовлетворяются: $0{,}3 < 0{,}5$, $-0{,}7 < -0{,}5$, как и для канала со смешанными окончаниями (рис. 3, *а*): $0{,}3 > 0{,}25$, $-0{,}7 < -0{,}25$ (табл. 2).

Таблица 2 – Соответствие нормам амплитудно-частотной характеристики

канал	составной		с аналоговыми окончаниями		со смешанными окончаниями	
частота	350 Гц	3,2 кГц	350 Гц	3,2 кГц	350 Гц	3,2 кГц
показатель	остаточное затухание $\Delta a_{0,35}$, дБ	остаточное затухание $\Delta a_{3,2}$, дБ	остаточное затухание $\Delta a_{0,35}$, дБ	остаточное затухание $\Delta a_{3,2}$, дБ	остаточное затухание $\Delta a_{0,35}$, дБ	остаточное затухание $\Delta a_{3,2}$, дБ
верхняя граница	2,3	-0,9	0,5	1,8	0,25	0,9
нижняя граница	-0,9	-0,9	-0,5	-0,5	-0,25	-0,25
измеренные значения	0,3	-0,7	0,3	-0,7	0,3	-0,7

Список литературы

1. Rec. G.712. Transmission performance characteristics of pulse code modulation channels. – 2001–11. – Geneva : ITU-T, 2001. – 38 p.

2. Rec. 0.6. 1020 Hz reference test frequency. – 1993. – Geneva : ITU-T, 1996. – 3 p.

3. ГОСТ 21655–87. Каналы и тракты магистральное первиной сети единой автоматизированной систмы связи. Электрические параметры и методы измерений. – Введ. 1989–01–01. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 106 с.

4. Батенков К. А. Дискретные отображения модели непрерывного канала связи на основе обобщенного ряда Фурье // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 43. С. 12-20.

5. Батенков К. А. Необходимые условия оптимальности операторов модуляции и демодуляции // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. Сборник статей всероссийской научно-практической конференции. составители: А.В. Калачев, В.В. Белозерских. 2013. С. 58-62.

6. Батенков К. А. Границы вероятности символьной ошибки для канала связи с логнормальными замираниями при использовании предыскажений и помехоустойчивого кодирования / Батенков К.А., Гусев В.В., Илюшин М.В., Катков О.Н., Мельников А.А., Стремоухов М.В. // Телекоммуникации. 2018. № 2. С. 45-48.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF VERTICAL TANKS

Каташинский Сергей Иванович[1]
Katashinskii S.I.
Лось Андрей Владимирович[1]
Los A.V.
Лютарь Виталий Станиславович[1]
Liutar' V.S.
Гаркаев Евгений Александрович[1]
Garkaev E.A.

[1]ООО «РЦ ДИС»,
690001, Россия, г. Владивосток, ул. Карла Либкнехта, 3а
[1]Regional Centre of Engineering Systems Diagnostics, Vladivostok
690001, Russia, Vladivostok, st. Karl Liebknecht, 3a
e-mail: fora27@yandex.ru, rcdis2004@mail.ru, boxvit@bk.ru, fora90@yandex.ru

Аннотация: *Предложен алгоритм оценки остаточного ресурса металлоконструкции вертикальных цилиндрических резервуаров на основе общего и локального коррозионного износа несущих элементов металлоконструкции.*

Ключевые слова*: коррозионный износ; коррозионная язва; коэффициент интенсивности напряжений; пороговый коэффициент; оценка ресурса.*

Abstract: An algorithm for estimating the residual life of the metal structure of vertical cylindrical tanks based on the general and local corrosion wear of the bearing elements of the metal structure is proposed.

Keywords: corrosion wear; corrosion pit; the stress intensity factor; threshold factor; resource estimation.

Введение

Остаточный ресурс емкостей для хранения жидкостей различного назначения определяется двумя основными факторами:

1) общий коррозионный износ несущих элементов конструкции;
2) образование локальных очагов коррозии, которые являются концентраторами напряжений.

Опасность первого фактора можно оценить по следующему условию:

$$T = \frac{\delta_{\min} - [\delta_{\min}]}{C} \quad (1)$$

где: T – ресурс резервуара, *год*; δ_{min} – минимальная измеренная толщина наиболее нагруженного элемента конструкции; $[\delta_{min}]$ – минимально допустимая величина; C – средняя скорость коррозии, *мм/год*.

Как следует из условия (1), определение остаточного ресурса предполагает знание напряженного состояния элементов конструкции и среднюю скорость коррозии наиболее нагруженной части конструкции.

Оценка влияния второго фактора на остаточный ресурс значительно сложнее.

Развитие эксплуатационного концентратора напряжения (рост коррозионной язвы) приводит к повышению параметров напряженно-деформированного состояния в его вершине. В конечном счете, может наступить такой момент, когда напряжения станут равны или больше уровня критических напряжений, при которых образуется макротрещина.

Сопротивляемость металла образования макротрещины целесообразно оценивать с помощью порогового коэффициента интенсивности напряжения K_{th}, который для конструкционных сталей определяется по зависимости (2):

$$K_{th} = 0{,}948\sigma_{0,2} \cdot \sqrt{\pi d_з} \cdot \left(\frac{R_{MCe} \cdot D}{\sigma_{0.2}} \right)^{\frac{m+1}{2m}} \qquad (2)$$

где: $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; $d_з$ – размер зерна металла; R_{MCe} - сопротивление микросколу; D – коэффициент перенапряжения для многоосного состояния; m – показатель упрочнения.

K_{th} можно рассчитать зная лишь стандартные механические характеристики металла. Так зависимость R_{MCe} от $\sigma_в$ и φ записывается:

$$R_{MCe} = 1{,}6R_{MC}, \text{ где } R_{MC} = \frac{\sigma_в}{1-\varphi_к^{\,2}} = 5{,}7d_з^{-1/2} \quad (\varphi_k \text{ – поперечное сужение}).$$

В свою очередь коэффициент перенапряжения [1]:

$$D = \frac{(1+m)(1-2\mu)}{2} \qquad (3)$$

где: μ - коэффициент Пуассона ($\mu = 0{,}257$); m – показатель упрочнения.

Если m неизвестен, то его можно оценить по зависимости:

$$m = 0.75 \left\{ \frac{\lg\left[\frac{\sigma_в}{\sigma_{0,2}}(1+1{,}4\varphi_к)\right]}{\lg\left[\left(10^5 ln\frac{1}{1-\varphi_к}\right)/(200+0{,}5\sigma_{0,2})\right]} \right\}. \qquad (4)$$

Таким образом, знание стандартных характеристик конструкционной стали ($\sigma_{вр}$, $\sigma_{0,2}$, φ), позволяет рассчитать пороговый коэффициент интенсивности напряжений K_{th}, который является физико-механической характеристикой металла.

В работе [1] показано, что предел выносливости (минимальный уровень переменных напряжений, при которых зарождаются трещины), можно оценить по зависимости:

$$\sigma_{Fr} = 0{,}7\sigma_{0.2}\left[\pi l_0\left(\frac{0{,}7\sigma_{0,2}(1-r)}{\Delta K_{thr}}\right)^2 + \left(1-\mu+\mu^2\right)\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (5)$$

где: r – коэффициент асимметрии цикла переменных напряжений; K_{thr} - пороговый коэффициент интенсивности напряжений при соответствующей асимметрии цикла $K_{thr} = \dfrac{\Delta K_{thr}}{(1-r)}$.

Используя приведенную формулу по известному K_{thr} мы легко можем определить ΔK_{thr} для любого r[1].

При наличии концентратора напряжений справедливо равенство[2]:

$$\beta \cdot K_{thk} = \mathrm{K}_{\mathrm{th0}} \quad (6)$$

где: K_{thk} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений в зоне концентратора; β – пороговый коэффициент концентрации напряжений, который равен:

$$\beta = 1{,}085\,\alpha_T \cdot \sqrt{\frac{2d_{cmp}}{L}} \quad (7)$$

где: $\alpha_T = \dfrac{\sigma_{ik}^{ynp}}{\sigma_{icp}^{ynp}}$; σ_{ik}^{ynp} - интенсивность напряжений в зоне концентрации напряжений;

σ_{icp}^{ynp} - средняя интенсивность напряжений в элементе конструкции.

Так как K_{tho} определяется по зависимости (2), то для определения K_{thk} необходимо знать σ_{ik} и σ_{icp} в элементах конструкции, где обнаружен концентратор.

При известном K_{thk} по уравнению (6) можно оценить опасный уровень эксплуатационных напряжений для элементов конструкции с концентратором напряжений.

Оценка влияния на остаточный ресурс первого и второго фактора связано с определением параметров напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции, а также параметрах локального напряженно-деформированного состояния в области обнаруженных эксплуатационных концентраторов напряжений.

Для определения указанных параметров была разработана программа на базе метода конечных элементов, которая позволяет определить наиболее нагруженный элемент резервуара.

Анализ напряженно-деформированного состояния корпуса резервуара показал, что нижний пояс резервуара наиболее напряжен и максимальные напряжения возникают в уторном узле. На рис. 1 приведено распределение напряжений в уторном узле с учетом краевого момента от действия гидростатического давления жидкости, избыточного давления в пространстве под кровлей, а также контурного давления от собственного веса для резервуара РВС-2000 м^3.

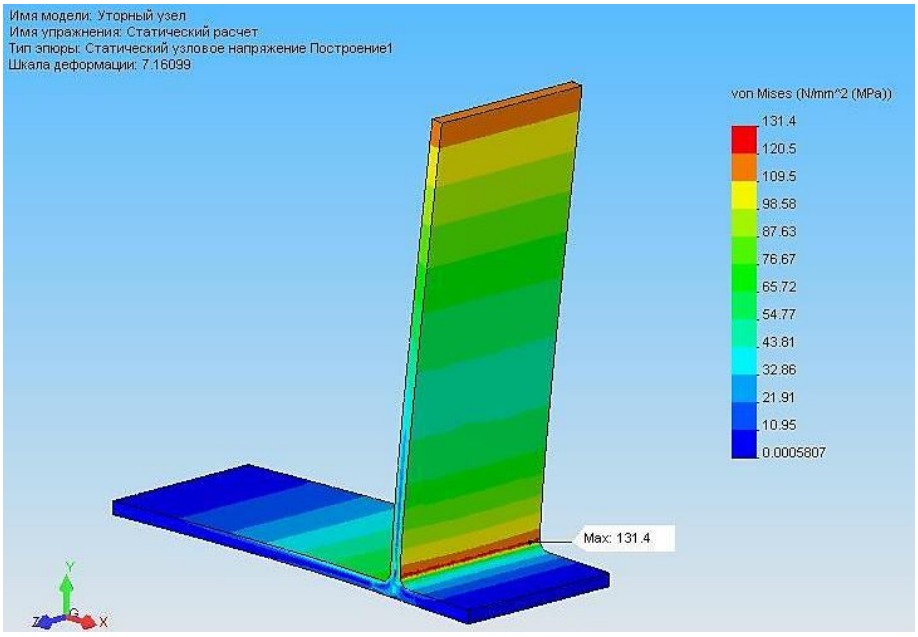


Рисунок 1. Результаты статического расчета уторного узла,
эпюра распределения эквивалентных напряжений

При образовании очаговой коррозии нормальное функционирование резервуара может быть нарушено в результате реализации двух процессов:

а) коррозионная язва прорастает на всю толщину металла, что нарушает герметичность резервуара;

б) по мере роста коррозионного концентратора напряжений в определенный момент, когда β удовлетворяет уравнению:

$$K_{thk} = \frac{1}{\beta} K_{th0} \tag{8}$$

в вершине коррозионного дефекта зарождается трещина, дальнейший рост которой приводит к нарушению герметичности резервуара.

В первом случае остаточный ресурс можно оценить, используя условия (1).

Во втором случае остаточный ресурс складывается из стадии роста коррозионной язвы до размеров, при которых в ее вершине $K = K_{thk}$, и стадии развития трещины до нарушения герметичности резервуара.

Для малоуглеродистых конструкционных сталей (из которых изготавливают резервуары) развитие трещины легко оценить, используя закон развития разрушения (закон Париса):

$$\frac{dl}{dN} = C\Delta K^n. \tag{9}$$

Можно записать:

$$N = \int_{\delta_{кя}}^{\delta_p} \frac{dl}{C\Delta K^n}, \tag{10}$$

где: N - количество циклов, необходимое для роста трещины от $\delta_{кя}$ до δ_p; $\delta_{кя}$ – глубина коррозионной язвы, при которой в ее вершине образуется трещина; δ_p – толщина стенки резервуара; C и n – постоянные, которые определяются по экспериментальной кинетической диаграмме разрушения.

Необходимо отметить, что значения C и n для широкого класса малоуглеродистых сталей практически одинаковы, что существенно облегчает расчет N по формуле (10). Кинетическая диаграмма разрушения малоуглеродистых сталей приведена на рис.2.

Таким образом, алгоритм оценки остаточного ресурса резервуаров можно представить следующим образом:

1. В результате технической диагностики определяются общие и локальные коррозионные повреждения.
2. Оценивается скорость развития общей коррозии и скорость роста коррозионных язв.
3. Проводят оценку ресурса $T_{кз}$ от действия первого фактора в наиболее нагруженном элементе конструкции, используя формулу (1).
4. Определяют глубину коррозионных язв, при которой возможно образование макротрещины.
5. Оценивают время роста коррозионной язвы $T_{як}$ до критических размеров, при которых зарождается макротрещина.
6. Рассчитывают время роста макротрещины $T_{ртр}$ до нарушения герметичности, используя формулу (10).
7. Сравнивают $T_{кз}$ и $T_{як}+T_{ртр}$:

если $T_{кз}>T_{як}+T_{ртр}$, то ресурс определяется вторым фактором;

если $T_{кз}<T_{як}+T_{ртр}$, то ресурс определяется первым фактором.

8. Определяют остаточный ресурс с учетом принятого коэффициента запаса по наименьшему значению ресурса, определенному в пункте (7).

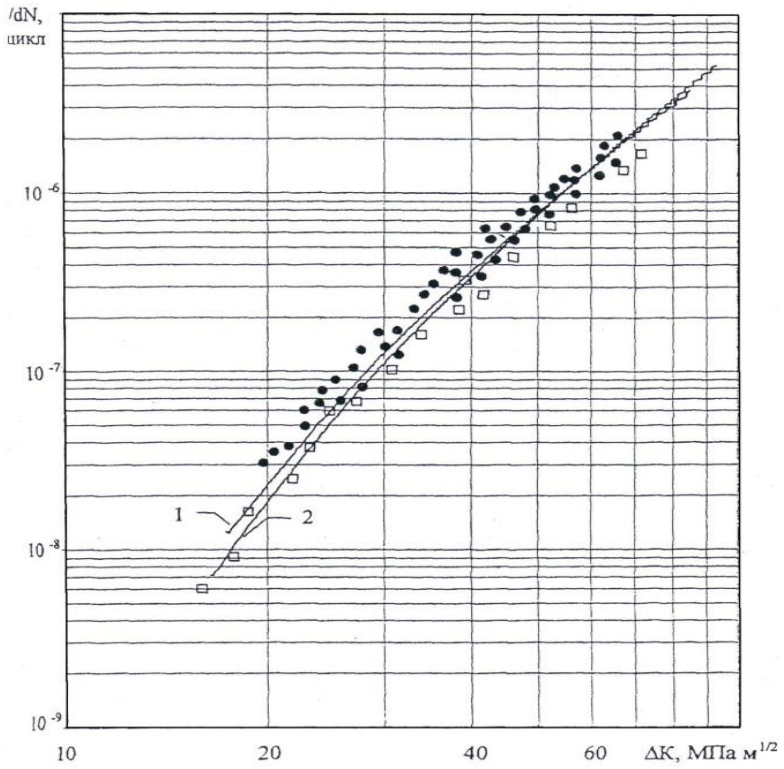


Рисунок 2. Сопротивление развитию усталостной трещины малоуглеродистых феррито-перлитных сталей при r = 0,07 :
1 – сталь 22К; 2 – сталь ВСт3; • – основной металл; □ – сварные соединения.

Список литературы:

1. Матохин Г.В. Оценка ресурса сварных конструкций из феррито-перлитных сталей.- Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2001.- 202 с.

2. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению; монография/ Матохин Г.В., Горбачев К.П..- Владивосток: Дальнаука, 2010.- 281 с.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

TECHNIQUE AND TECHNOLOGY OF NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSTICS OF THE STATE OF METAL ELEMENTS OF WELDED STRUCTURES ABSTRACT

Каташинский Сергей Иванович[1]
Katashinskii S.I.
Лось Андрей Владимирович[1]
Los A.V.
Лютарь Виталий Станиславович[1]
Liutar' V.S.
Гаркаев Евгений Александрович[1]
Garkaev E.A.

[1]ООО «РЦ ДИС»,
690001, Россия, г. Владивосток, ул. Карла Либкнехта, 3а
[1]Regional Centre of Engineering Systems Diagnostics, Vladivostok
690001, Russia, Vladivostok, st. Karl Liebknecht, 3a
e-mail: fora27@yandex.ru, rcdis2004@mail.ru, boxvit@bk.ru, fora90@yandex.ru

Аннотация: *Предложена методика и технология металлографического метода неразрушающего контроля для получения реальной информации о структуре металла работающей конструкции, с целью определения исходных данных для расчета остаточного ресурса.*

Ключевые слова*: металлографический метод; микрошлиф; структура материала; реплика; степень повреждения металла.*

Abstract: The technique and technology of the metallographic method of non-destructive testing for obtaining real information about the structure of the metal of the working structure, in order to determine the initial data for calculating the residual life, is proposed.

Keywords: metallographic method; microsection; material structure; replica; the degree of damage to the metal.

Введение

Структурно-механическая модель процесса разрушения, изложенная в работе [1], позволяет на базе сведений о стандартных механических характеристик металла ($\sigma_{вр}$, $\sigma_{0,2}$, φ, m) и размеров структурных элементов определить критерии конструктивной прочности элементов K_{th}, K_{1c} – пороговый и критический коэффициент интенсивности напряжений соответственно.

Расчетная схема работоспособности сварных конструкций с использованием указанных критериев предполагает, что методы и аппаратура неразрушающей технической диагностики должны обладать такими функциональными возможностями, которые позволяли бы более полно проводить измерение и анализ параметров, сопутствующих

процессу деформирования при статическом и динамическом нагружении элементов конструкции.

Одним из важных критериев для неразрушающих методов является критерий информативности, то есть качественная и количественная оценка контролеспособности объекта (металла). С этих позиций на первое место можно поставить металлографические методы. Ценность оптических исследований с помощью светового микроскопа состоит в их статистической глубине, в возможности оценки общей структуры, характерной для всего объема металла. Наблюдение структурных изменений на поверхности металла с помощью микроскопа дает исключительно “динамическую” информацию о происходящих усталостных процессах в металле.

Применение метода металлографии для диагностики сварных элементов конструкций в эксплуатационных условиях ограничивают следующие причины: трудность проведения наблюдений, сложность и высокая стоимость оборудования, необходимость проведения подготовительных операций (шлифовка, полировка, травление). Однако имеются возможности по их устранению.

В настоящее время приготовление микрошлифов непосредственно на конструкции производится с использованием шлифовки и механической (электрической) полировки. Для приготовления шлифов непосредственно на трубах пользуются переносной шлифовальной машинкой с гибким валом. Шлифование выполняется войлочным кругом с наклеенным на него слоем абразивного порошка. Полировку производят войлочным кругом с применением пасты ГОИ или алмазных паст.

Один из способов электрохимической полировки на поверхности конструкции заключается в том, что к поверхности через кольцевую изолирующую прокладку прижимается сосуд, являющийся электролизером. Стенки этого сосуда образуют катод, а анодом служит полируемое изделие. В дне электролизера имеется отверстие, размер которого соответствует площади шлифа.

При другом способе используется электролиз в тонкой пленке электролита между полируемой поверхностью и накладным катодом. Катод представляет собой стержень или пластину из нержавеющей стали. Используемые переносные приборы состоят из блока питания, тампона с катодом и кюветы для электролита. Данный способ дает возможность получать микрошлифы на участках деталей и конструкций самой различной конфигурации.

Необходимую информацию о структуре в любой точке конструкции можно получить, используя метод реплик. Метод реплик состоит в том, что с поверхности объекта с помощью какого-либо вещества получают отпечаток, воспроизводящий рельеф поверхности. Практическая значимость этого метода определяется, с одной стороны, тем, что позволяет получить информацию о структуре реальной, работающей конструкции, а с другой - широким диапазоном размеров составляющих структуры, выявляемых репликой от микрон (оптическая микроскопия) до сотен ангстрем (растровая и просвечивающая электронная микроскопия).

Процедура получения реплик состоит из следующих операций:

-металлографической подготовки, включающей шлифование, полирование, травление;

- подготовки самой реплики;

- отделения ее от объекта.

При этом к качеству шлифов, предназначенных к исследованию с помощью реплик, предъявляются следующие требования:

1. На поверхности шлифа не должно быть наклепанного слоя, наличие которого при последующем травлении не позволит четко выявить мелкие детали структуры металла и получить конкретное изображение.

2. При полировании и травлении шлифов не допустимы выкрашивания частиц избыточных фаз карбидных, интерметаллидных и неметаллических включений.

3. Поверхность шлифа должна быть чистой от посторонних частиц и каких-либо продуктов травления, которые могут привести к загрязнению реплик и внесению дополнительных данных, не относящихся к структуре исследуемого материала.

4. На поверхности шлифа после травления должен быть рельеф, точно соответствующий структуре исследуемого объекта.

Для усиления контраста обычно специально оттеняют рельеф лаковой реплики косым напылением тяжелого металла в вакууме. При этом основное преимущество способа - простота - теряется. Поэтому метод лаковых реплик заменяется другим, более совершенным методом.

Когда необходимо оценить процесс образования вторичных фаз, а также появление микронесплошностей в силовых элементах реальных конструкций, наиболее эффективен метод двусторонней реплики. Он состоит в том, что сначала получают отпечаток первой ступени, затем на него в вакууме напыляют металл или уголь. После этого отпечаток первой ступени растворяют и полученную металлическую или угольную пленку (собственно реплику) которую исследуют с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Разрешающая способность у этих реплик такая же, как у лаковых и полистироловых.

Материалом для приготовления односторонней реплики служит полистирол. Полистирол нарезают на квадраты 10×10 мм и тщательно обмывают в спирте. После этого полистирол помещают в бензол до размягчения верхнего слоя, а затем накладывают на подготовленную поверхность исследуемой области конструкции при некотором давлении. После высыхания отпечаток отделяют от конструкции простым сдиранием и на него в вакууме напыляют металл.

Полистироловые реплики имеют важное значение при металлографическом исследовании зернограничной структуры, крупных включений, пор, трещин, а также при необходимости качественного изучения одного и того же участка структуры в диапазоне увеличений от 100 до 20000 в растровом электронном микроскопе.

Для получения двусторонних реплик применяют двухступенчатый способ. Для приготовления пластического отпечатка первой ступени используется основа рентгеновской пленки. Пленку отмывают от фотографической эмульсии в горячей воде, а затем промывают в спирте. На пленку наносят несколько капель ацетона и через 20-30 секунд накладывают на поверхность исследуемой области конструкции при некотором давлении. После затвердевания размягченного слоя пленка легко отделяется.

Отпечаток второй ступени представляет собой угольную пленку, которую получают на установке ВУП-5 распылением угольных электродов в вакууме $1\text{-}10^{-4}$мм рт.ст.

Исследование некоторых физических процессов и целого ряда технических задач сводится к анализу микроструктурных изображений, то есть изображений, содержащих множество однотипных элементов, линейные размеры которых малы по сравнению с областью анализа. В качестве примера на рис. 1 приведена структура комплекса оборудования для оценки размера структурного элемента.

Вышеперечисленные методики дают возможность устранить некоторые недостатки металлографического метода и сделать его пригодным для диагностических целей. Основным недостатком метода является то, что для принятия решения о состоянии конструкции требуется наличие моделей разрушения и расчетных схем, куда, как исходные данные, должны входить измеренные напряжения, определить которые в местах концентрации на реальной конструкции довольно сложно. Если даже принятая модель достаточно совершенна, но при расчете использовались приближенные исходные данные, то можно говорить лишь о расчетной приближенной оценке ресурса.

Необходимо отметить, что в настоящее время еще не разработан надежный метод, который был бы лишен указанного недостатка.

Металлографический метод является основой для построения экспериментального закона распространения длин поверхностных микротрещин. Подготовленную для микрошлифа поверхность можно обрабатывать методами люминесцентной или цветной капиллярной дефектоскопии, которые выявляют поверхностные трещины длиной в несколько десятков микрон.

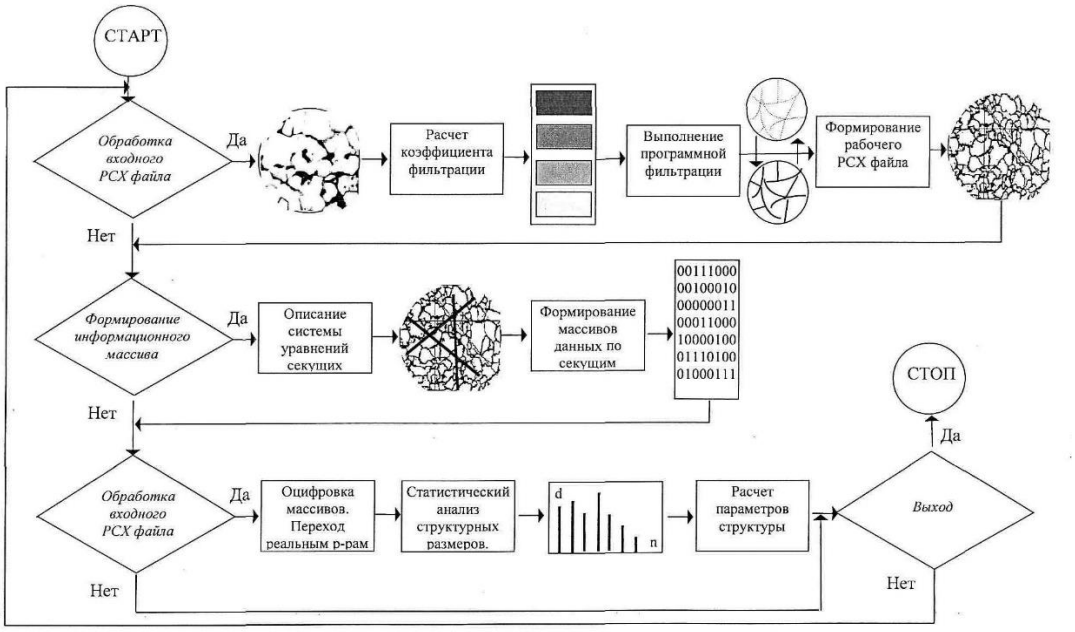


Рисунок 1 – Схема оценки размера структурного элемента

Весьма успешно и интенсивно в настоящее время развивается метод акустической эмиссии. Некоторые исследователи предполагают, что в будущем после совершенствования теоретической и технико-методической базы этот метод позволит без многоступенчатых расчетов выдавать окончательное решение о состоянии объекта.

Отметим, что глубокие фундаментальные исследования, вскрывающие сущность процесса образования и развития разрушения, требуют больших интеллектуальных и материальных затрат и поэтому трудно ожидать законченного решения задачи для практики в ближайшее время.

С другой стороны, экспериментально установленные четкие корреляционные связи между процессами, протекающими в материалах при их деформировании, и акустическими сигналами, сопровождающими эти процессы, дают возможность выбрать определенные характерные признаки, определяющие степень повреждения металла, которые могут использоваться для распознания состояния конструкции.

Широко используемый на практике для обнаружения дефектов ультразвуковой метод может также применяться и для оценки физико-механических свойств металлов: модулей упругости, текстуры, величины зерна, предела прочности и текучести и т.д. Использование метода основано на корреляционной зависимости свойств материала с его акустическими характеристиками. Однако существующая аппаратура обеспечивает надежную работу только в области обнаружения дефектов.

Перечисленные методы имеют свои недостатки и преимущества, но при всем многообразии методов контроля максимальный эффект достигается совместным их

использованием, когда решения принимаются на основе применения разных методов с учетом информации, получаемой от нескольких средств контроля.

Список литературы:

1. Матохин Г.В. Оценка ресурса сварных конструкций из феррито-перлитных сталей.- Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2001.- 202 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОПРОВОДОВ С ВЫПОЛНЕНИЕМ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ВИЗУАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО, РАДИОГРАФИЧЕСКОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДОВ

THE DEVELOPMENT OF NON-DESTRUCTIVE TESTING WELDED JOINTS OF GAS PIPELINES WITH THE IMPLEMENTATION OF JOINT DATA ANALYSIS OF VISUAL INSPECTION, RADIOGRAPHIC AND ULTRASONIC METHODS

Артемьев Руслан Евгеньевич [1]
Artemev R.E.
Атрощенко Валерий Владимирович [1]
Atroshenko V.V.
Савичев Максим Павлович [1]
Savichev M.P.

[1] Уфимский государственный авиационный технический университет (ФГБОУ ВО "УГАТУ", кафедра "Современных методов сварки и контроля конструкций" на базе ООО "АЦ СваркаТехСервис")
450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12
[1] Ufa State Aviation Technical University
450008, Republic of Bashkortostan, Ufa, K. Marx str., 12
e-mail: aruslan98@mail.ru, 91250@mail.ru, savichevmax@mail.ru

Аннотация: *Подход к контролю качества сварных соединений, при котором рассмотрение результатов контроля осуществляется совместно, с учетом возможностей и ограничений методов контроля, позволяет: снизить перебраковку, повысить выявляемость дефектов, точно определять вид и размеры дефекта, Нормы, по которым дается оценка качества сварного соединения с использованием методики совместного рассмотрения [1], разрабатываются с учетом возможностей конкретных методов контроля и предполагают, что преимущество в отбраковке имеет тот метод, который в данном случае наиболее информативен и точен.*

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, магистральные трубопроводы, ультразвуковой контроль, радиографический контроль.*

Abstract: The approach to quality control of welded joints, in which the examination of the results of the control is carried out jointly, taking into account the possibilities and limitations of control methods, allows: to reduce false defect indication, increase the detection of defects, accurately determine the type and size of the defect. The standards by which the quality of the welded joint is assessed using the joint review methodology [1], are developed taking into account the possibilities of specific control methods suggest that the method that is most informative and accurate in this case has an advantage in defect indication.

Key words: non-destructive testing, trunk pipeline, ultrasonic control, radiographic control

Введение

Существующая практика НК кольцевых сварных соединений трубопроводов большого диаметра предполагает проведение визуально-измерительного контроля (ВИК) каждого соединения. В случае, если по результатам ВИК стык признан годным, выполняется радиографический контроль (РК) и автоматизированный или механизированный ультразвуковой контроль (УЗК). Сопоставление данных ВИК, РК и УЗК стало возможным в связи активным развитием обработки, представления и хранения данных контроля в цифровом формате. Но существует проблема сведения этих данных, полученных в разных форматах.

Преимущества совместной оценки результатов ВИК, УЗК и РК:

- Уточнение глубины дефекта, обнаруженного РК, по результатам последующего УЗК. При проведении неразрушающего контроля качества сварных соединений ультразвуковым и радиографическим методами в случае обнаружения дефекта одновременно средствами УЗК и РК в качестве условной высоты обнаруженного дефекта принимается значение условной высоты, измеренное средствами УЗК [2];
- Исключение ложных дефектов УЗК, вызванных превышением проплава;
- Исключение ложных дефектов УЗК, вызванных смещением кромок. На результатах РК такой дефект будет отсутствовать;
- Дефект УЗК при смещении кромок, который можно принять за “ложный”. Такой непровар при смещении легко отличить по результатам РК;
- Если протяженность дефекта, обнаруженного одновременно УЗК и РК отличается, то за длину дефекта принимается сумма значений протяженностей.

Задачи исследования были поставлены следующим образом:

- Разработать методику обработки и экспортирования результатов цифровой радиографии “Цифракон” в табличном виде в MS Exel с привязкой к координате, указанием вида дефекта и его размеров;
- Разработать методику обработки и экспортирования результатов механизированного УЗК со сканера А1550 “Introvisor” в табличном виде в MS Exel с привязкой к координате с указанием протяженности, глубины залегания (h) и максимальной глубины дефекта (H);
- Разработать алгоритм совместной разбраковки экспортированных результатов неразрушающего контроля в соответствии СТО Газпром 2-2.4-083–2006 Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов.

Материалы и экспериментальные процедуры

Для практической проверки были проконтролированы листы материалом Ст3сп, размером 300х300, толщиной 8мм, сваренные ручной дуговой сваркой (рисунок 1). При этом ВИК, РК и УЗК проводился в единой системе координат.

РК проводился на комплексе “Цифракон”, источником излучения являлся аппарат АРИНА-7. Результаты снимков представлены на рисунке 2. Были подобраны следующие режимы для контроля РК: время экспозиции 10 сек.; 2 кадра на один снимок; фокусное расстояние 400 мм; напряжение на рентгеновской трубке 250 кВ.

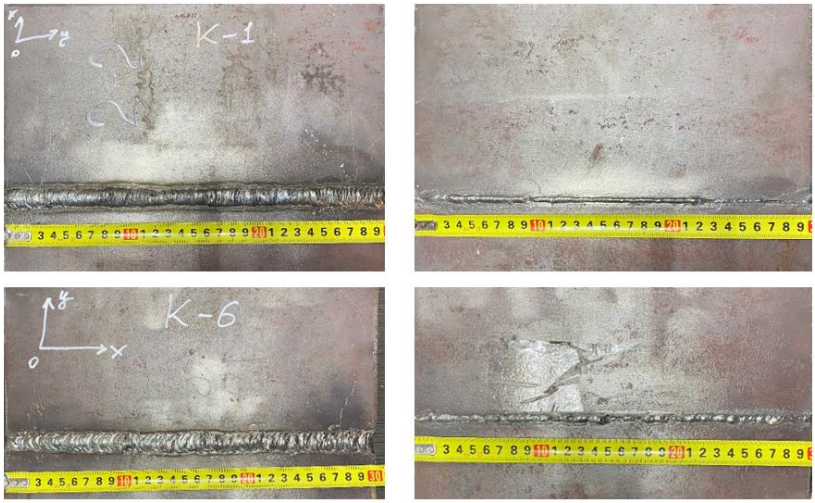


Рисунок 1 – Контрольные образцы

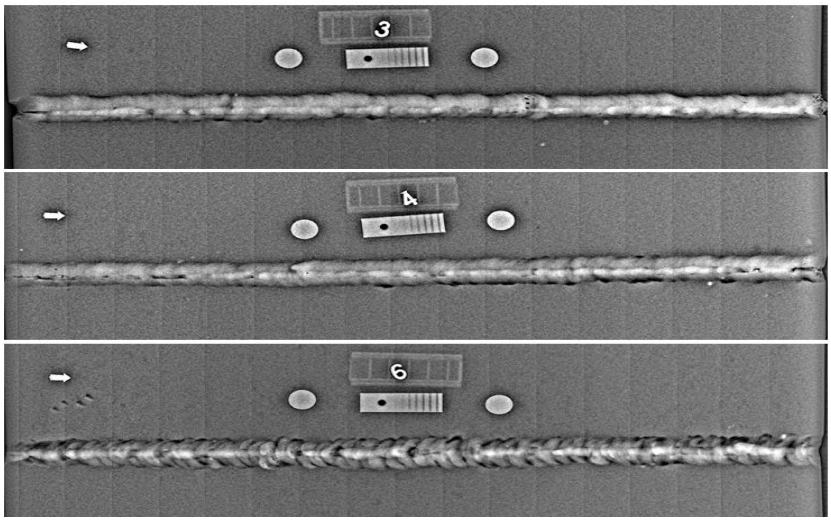


Рисунок 2 – Результаты РК

Обработка снимков проводилась в ПО “Дисофт” (Рисунок 3).

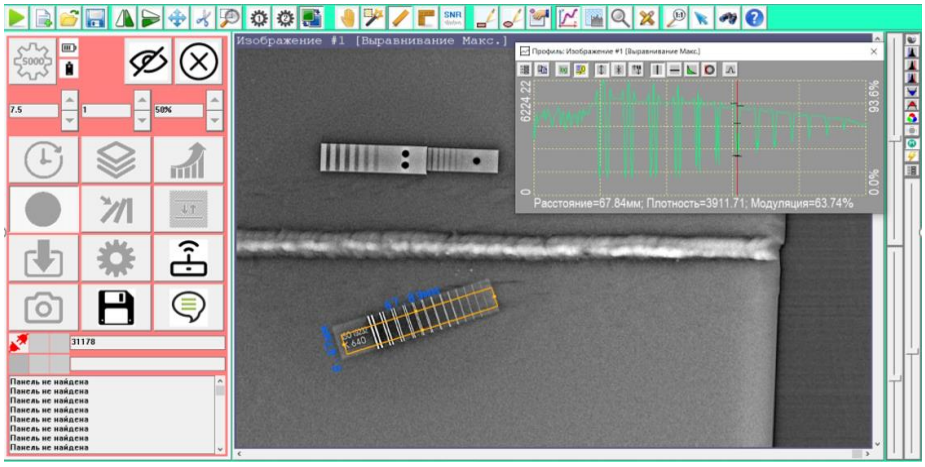


Рисунок 3 – ПО “Дисофт”

Проверка нерезкости снимка проверялось на эталоне типа “Дуплекс”, минимальное значение должно составлять 20%. Контроль выполнен в соответствии с ГОСТ ISO 17636-2-2017.“Радиографический контроль. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов” - по классу качества “А”.

УЗК проводился с помощью дефектоскопа А1550 “Introvisor” с технологией цифрофокусируемых антенных решеток (ЦФАР) в соответствии с методическими рекомендациями [3]. Были использованы: настроечный образец: Ст3, толщина 8 мм, зарубка 2,0×1,5; энкодер (датчик пути). Расшифровка результатов механизированного УЗК проходила в ПО «IntroView Metal» (рисунок 4).

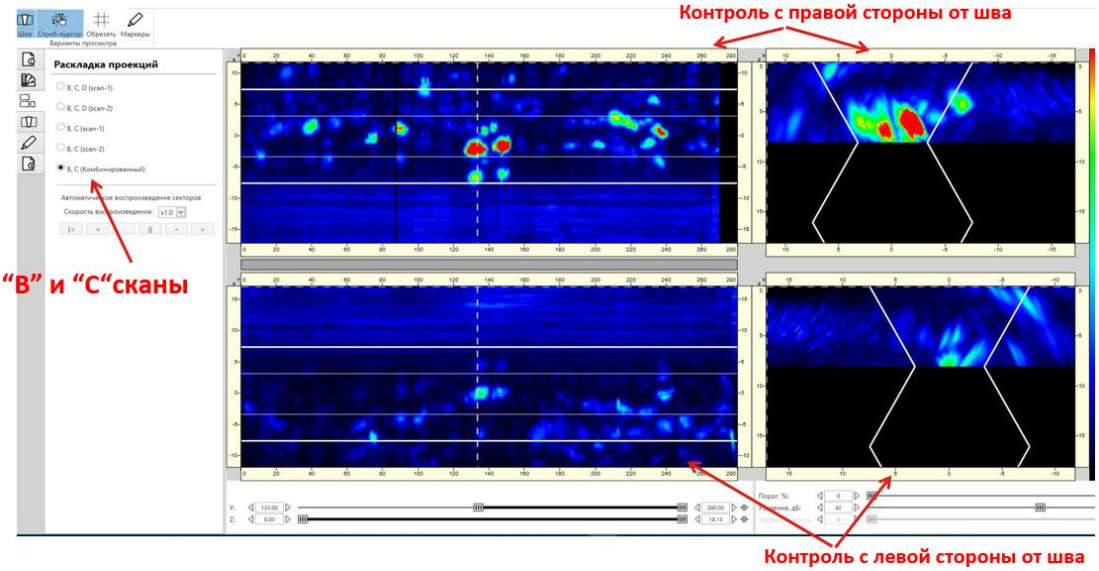


Рисунок 4 - ПО «IntroView Metal»

Расклад проекций выбран комбинированный В и С скан. Далее данные МУЗК экспортировались в Exel. Обработка данных в exel с формированием общего заключения и построением дефектограммы начинается с заполнения данных о сварном шве. Далее идет заполнение дефектов отдельно для ВИК, РК, УЗК (рисунок 5). Для ВИК указываются допустимые дефекты, но оказывающих влияние на интерпретацию результатов РК И УЗК (смещения кромок, утяжины, превышения проплава и др.)

Перечень выявленных дефектов по результатам радиографического контроля

N	Наименование дефекта	Координата начала дефекта	Протяженность дефекта, мм	конец дефекта	высота
1	Ac	42	14	56	1
2	Fa	95	2	97	2,5
3	Aa	160	1,5	161,5	1,5
4	Aa	170	0,6	170,6	0,6
5	Ba	182	2,5	184,5	1,5
6	Aa	201	1	202	1
7	Ba	225	2	227	2,5
8	Da	225	5	230	2
9	Da	265	13	278	2

Перечень выявленных дефектов по результатам визуального и измерительного контроля

N	Наименование дефекта	Координата начала дефекта	Протяженность дефекта, мм	конец дефекта	Глубина (высота), мм
1	Утяжина	94	2	96	1
2	Непровар в корне шва	224	6	230	1
3	Непровар в корне шва	265	13	278	1
4				0	
5				0	
6				0	
7				0	
8				0	
9				0	

Перечень выявленных дефектов по результатам УЗК

N	Наименование дефекта	Координата начала дефекта	Протяженность дефекта, мм	конец дефекта	Максимальная глубина дефекта, мм	Глубина начала дефекта, мм
1	SH	40	5	45	4,2	3,9
2	LH	132	58	190	8	7,3
3	SH	163	7	170	6,1	4,3
4	LH	217	13	230	8	5
5	LH	260	40	300	8	4,5

Рисунок 5 – Обработка дефектов по результатам ВИК, РК, УЗК

Проведение расчетов для построения совместной дефектограммы ВИК+РК + УЗК происходит автоматически - на отдельном листе в MS Exel. После заполнения вышеуказанных данных, автоматически происходит построением дефектограммы (рисунок 6). Заключительным этапом является подсчет суммарной протяженности дефекта в % отношении от периметра стыка сразу по обоим методам (УЗК + РК) и выдача заключения.

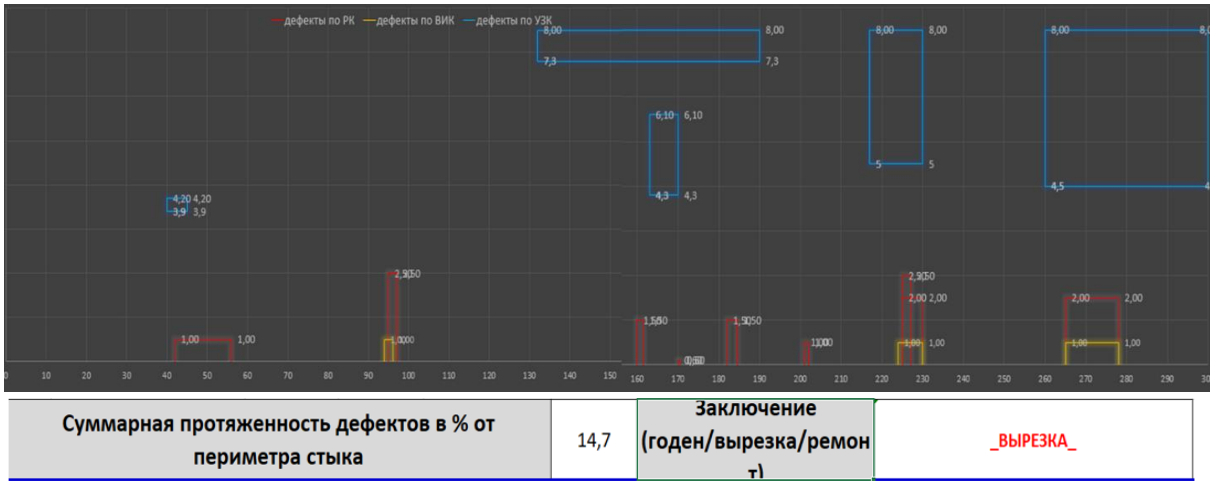


Рисунок 6 – Сводная дефектограмма: ось X – координата по образующей (развертка); Ось Y – глубина дефекта (для УЗК – H и h; для РК – протяженность по глубине; для ВИК – размер по высоте)

Разработка и опробация методики производилась путем металлографического исследования дефектных мест. Макрошлифы изготавливались на плоскошлифовальном станке Lab2x с последующим травлением в 20% водном растворе азотной кислоты. Фотографии шлифов получали на микроскопах МБС-2 и AxioVert.A1 (рисунок 7).

Рисунок 7 – Макрошлиф с дефектом сварки

Результаты и обсуждение

В результате обработки макрошлифов выяснилось, что на некоторых образцах УЗК указывал на ложный дефект в корне, связанный с превышением проплава в этих местах. После удаления усиления и повторного УЗК – дефекты пропали. На макрошлифах дефекты тоже отсутствовали. Превышение проплава при этом определялось по радиографическим снимкам.

Дефекты типа непровара в корне одинаково хорошо определялись методами УЗК и РК. Однако данные по их протяженности отличались. Согласно разработанной методики,

принималась суммарная длина дефекта, выявленная обоими методами. Это оказывало существенное влияние на принятие решения о “вырезке” или “ремонте”.

Также УЗК плохо распознавал дефекты типа одиночных пор и даже скоплений пор, хорошо различимых на радиографическом изображении. С другой стороны, при УЗК других образцов были обнаружены протяженные несплавления по кромке, которые на радиографическом снимке трудноразличимы и были пропущены дефектоскопистом. Это подтверждает требования нормативной документации по применению ультразвукового контроля только совместно с радиографическим контролем.

Выводы

Разработанная методика проведения совместной разбраковки результатов ВИК, УЗК и РК позволяет снизить перебраковку, повысить выявляемость дефектов, точно определять вид и размеры дефекта. Методика реализована в MS Exel с автоматическим построением дефектограммы и формированием общего заключения (протокола сравнения).

Список литературы

1. Нормы оценки качества кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов при применении автоматизированных и механизированных средств неразрушающего контроля. ПАО “Газпром”, г. Москва, 2015г;

2. Интегрированная система неразрушающего контроля качества сварных соединений труб магистральных газопроводов “Унискан МТ”. ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. Спецвыпуск № 3 (773) А.Ю. Кострюков, А.Ю. Скворцов;

3. Методические рекомендации. по применению режима томограф. А1550 IntroVisor. ООО “Акустические контрольные системы”, Москва, 2021г.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTIC OF THE SURFACE LAYER OF SPECIMENS AFTER SURFACE AND MECHANICAL TREATMENT

Бобров Алексей Леонидович[1]
Bobrov A.L.
Кутень Мария Михайловна[1]
Kuten M.M.

[1]Сибирский государственный университет путей сообщения
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
[1] Siberian Transport University
630049 Novosibirsk, Russia, 191 Dusi Kovalchuk Str.,
e-mail: beaver@stu.ru

Аннотация: *В статье проведен анализ факторов, определяющих средства, затрачиваемые на проведение контроля трубопроводов, как основной составляющей эксплуатации и поддержания его работоспособного состояния. Для этого определены затраты на проведение периодического контроля трубопровода и затраты на его непрерывный мониторинг. В статье также приведены условия, при которых стратегия применения непрерывного мониторинга с использованием метода акустической эмиссии становится экономически более оправданной по сравнению с периодической внутритрубной диагностикой.*

Ключевые слова: *авария, затраты, метод акустической эмиссии, мониторинг, перебраковка, периодическое освидетельствование, трубопровод.*

Abstract: The article analyzes the factors that determine the funds spent on pipeline control, as the main component of operation and maintenance of its working condition. To do this, the costs of conducting periodic control of the pipeline and the costs of its continuous monitoring are determined. The article also presents the conditions under which the strategy of applying continuous monitoring using the acoustic emission method becomes more economically justified compared to periodic in-line inspection.

Key words: accident, costs, acoustic emission method, monitoring, over reject, periodical inspection, pipeline.

Введение

Действующие средства и технологии мониторинга [1-3] трубопроводов весьма затратные и не решают главной задачи – предотвращение утечек. Между тем Современное состояние технических систем мониторинга неразрушающими методами [4, 5], разработанных методик и технологий [6-8] позволяет их применять для мониторинга ответственных объектов. В работе [9] приводится мнение, что безопасность эксплуатации трубопроводов целесообразно обеспечивать как периодическими обследованиями, так и с помощью мониторинговых систем. Вместе с тем, следует помнить, что в стоимость действующей системы неразрушающего контроля входят и потери, которые возникают при

ошибках I и II рода [10], которые неизбежны в силу самой природы применяемых методов контроля, обладающих всеми признаками косвенных методов измерений и оценки.

С экономической точки зрения и с учетом обеспечения безопасности эксплуатации трубопроводов и для человека, и для окружающей среды крайне желательно использовать методы, имеющие высокую надежность при определении критических участков трубопроводов, на которых реальная вероятность появления течи резко возрастает. Использование таких методов позволит существенно снизить ущерб. Однако, применение таких методов уместно тогда, когда совокупная «цена вопроса» (имея ввиду и совокупность экономической составляющей, безопасность и экологические последствия аварий) при реализации такого мониторинга меньше используемых технологий периодического контроля и мониторинговых предприятий, направленных на выявление уже осуществившегося факта утечки.

В теории и практике неразрушающего контроля известно, что к методам контроля, которые позволяют оценивать и структурное состояние металлов [11], и параметры коррозии [12], и стадии развития усталостных трещин [13] относится акустико-эмиссионный метод, применение которого осуществляется и при периодическом обследовании таких объектов.

Материалы и экспериментальные процедуры

Рассмотрим экономический аспект проблемы перехода на мониторинговую систему диагностирования. Традиционно считается [14], что совокупные затраты на систему контроля связаны с включением в стоимость внедрения и обслуживания системы затраты, возникающие из ошибок I и II рода. Затраты на эти ошибки — это дополнительные потери организации, направленные на возмещение средств и связанные с перебраковкой объектов и ликвидацией аварийных ситуаций и простоев в результате пропусков дефектов, из-за которых объект переходит в неработоспособное состояние.

Исходя их приведенных аргументов можно представить математическую модель затрат на систему для случая периодической диагностики $З_п$ за какой-то значимый период времени t:

$$З_п = З_к^п + \sum_{\Delta t=1}^{t}(З_т^п + З_{It}^п + З_{IIt}^п), \quad (1)$$

где $З_к^п$ – капитальные затраты на запуск системы; $З_т^п$ – текущие затраты на контроль в каждый интервал времени Δt, для удобства интервал Δt может быть равен времени проведения диагностирования; $З_{It}^п$ – затраты на проведение ненужных работ по ремонту участков или замене элементов оборудования, связанных с перебраковкой за интервал времени t; $З_{IIt}^п$ – затраты на ликвидацию аварий и простои трубопровода в процессе ликвидации аварийных ситуаций. При расчете затрат на такую систему контроля следует понимать, что время проведения контроля, например, магистральных трубопроводов, назначается в зависимости от дефектности объекта по результатам последнего обследования. Как правило, интервал времени между обследованиями составляет от 1 года (например, в соответствии с СП 86.13330.2014 «Магистральные трубопроводы») до 5 лет (например, по СТО Газпром 2-2.3-095-2007 «Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов»), и в процессе эксплуатации участка трубопровода постепенно этот интервал времени зачастую сокращается ввиду постепенного развития коррозии, усталости и износа материала.

Затраты на проведение непрерывного мониторинга $З_м$ несколько отличаются:

$$З_м = З_к^м + t \cdot З_т^м + З_{It}^м + З_{IIt}^м, \quad (2)$$

где $З_к^м$ –затраты на запуск системы; $З_т^м$ – текущие затраты на мониторинг за единицу времени; $З_{It}^м$ – затраты на проведение ненужных работ по ремонту участков или замене элементов оборудования, связанных с перебраковкой за интервал времени t; $З_{IIt}^м$ – затраты

на ликвидацию аварий и простои трубопровода в процессе ликвидации аварийных ситуаций за этот же интервал мониторинга.

Затраты, вытекающие из ошибок первого и второго рода достаточно сложно определить, особенно это касается ошибок первого рода, связанных с перебраковкой. Такие ошибки первого рода можно учесть только в специальных дорогостоящих предварительных испытаниях методов диагностирования, либо манипулируя в процессе разных этапов диагностики критериями оценки состояния объекта, получить статистически значимую информацию о динамике инцидентов и аварий, вызванных этими ошибками, то есть их надо еще идентифицировать в потоке таких инцидентов. Поэтому ошибки первого рода примем равными в обоих случаях и далее пренебрежем ими.

Затраты, вытекающие из ликвидации последствий ошибок второго рода, можно оценить как стоимость потерь с учетом рисков возникновения аварий различной степени опасности:

$$З^{п}_{IIt} = \sum_{n=1}^{k} p_n(t)\, З^{п}_{n}, \qquad (3)$$

где $p_n(t)$ – вероятность наступления аварийного события за интервал времени t; $З^{п}_{n}$– издержки, возникшие из аварийной ситуации; k – общее число типов рассматриваемых, экономически значимых аварийных ситуаций. Понятно, что мониторинговая система должна иметь преимущество в части снижения именно этой составляющей затрат, в противном случае ее применение сомнительно.

Следует отметить, что в качестве интервала времени t видимо удобнее всего использовать интервал эксплуатации между проведением капитального ремонта. При капитальном ремонте происходит существенная модернизация трубопровода.

К указанному достоинству мониторинговой системы диагностирования можно добавить еще одно обстоятельство – текущие затраты, как правило, на отлаженную систему мониторинга в интервале времени между проведением периодического контроля меньше, чем затраты на каждое из этих мероприятий.

Однако, существуют и недостатки, которые не позволяют активно внедрять путь мониторинга трубопроводов.

В первую очередь это:

- относительно высокая стоимость внедрения $З^{м}_{к}$;
- непредсказуемые дополнительные затраты на отладку таких систем, которые несколько повышают текущие затраты на начальном этапе функционирования мониторинговой системы.

Результаты и обсуждение

Качественно нарастание затрат на периодический неразрушающий контроль и мониторинг во времени, изменяющиеся по формулам 1 и 2 можно представить в графической форме (рисунок 1). Приведенные на рисунке 1 данные учитывают, что запуск мониторинговой системы в два раза выше, а текущие затраты наоборот в два раза меньше. Кроме того, на рисунке 1 заложены скачки затрат, связанных с простоями и ликвидациями аварийных ситуаций.

Анализируя представленную модель затрат следует понимать, что базовая стоимость внедрения мониторинговой системы может существенно превышать стоимость оборудования периодического контроля, возможно даже на порядок или два порядка, если протяженность трубопровода очень большая, так для контроля километрового участка трубопровода необходимо около 400 датчиков и каналов акустико-эмиссионного оборудования и применение его для магистрального участка будет нести сомнительную выгоду, если только этот участок не находится в условиях сильно удорожающих периодический контроль (например, на дне водоема, или участка с сильно пересеченной местностью и т.п.).

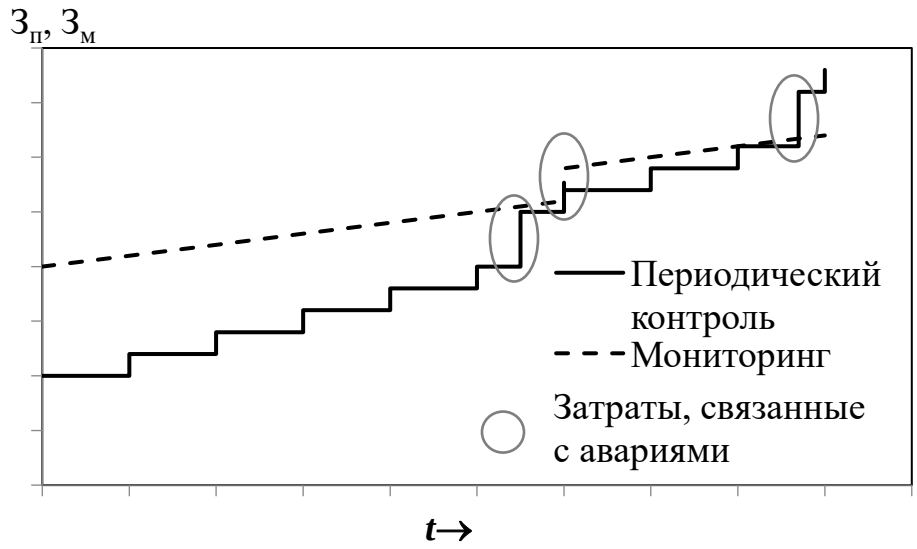


Рисунок 1 – Сравнительная модель нарастания затрат во времени на периодический контроль участка трубопровода и непрерывный мониторинг

Выводы

Акустико-эмиссионный метод обладает высоким потенциалом [13] для прогнозирования разрушения стальных трубопроводов и использования его для мониторинга таких объектов с целью выявления и отслеживания развития дефектов усталостного и коррозионного происхождения.

Перевод системы контроля с периодического обследования на мониторинговые рельсы с применением акустико-эмиссионного метода требует тщательного взвешивания экономической составляющей.

Удешевление как оборудования акустико-эмиссионного контроля, так и текущих расходов на мониторинг способствует повышению рентабельности мониторинга и замене им системы периодического обследования трубопроводов.

С другой стороны, более глубокие оценки ущерба для экологии и повышение ценности сохранения экосистем в местах, где проложены трубопроводы, неизбежно, со временем, приведет к замене системы на мониторинговую.

Список литературы

1. Ангалев А.М., Бутусов Д.С., Топилин А.В. Комплексный подход к решению проблемы коррозионного растрескивания под напряжением на трубопроводах компрессорных станций ОАО "ГАЗПРОМ" // Территория Нефтегаз. 2015. № 4. С. 52-60.

2. Голофаст С.Л., Владова А.Ю. Интеграция результатов мониторинга технического состояния магистральных трубопроводов // Экспозиция. Нефть. Газ. 2017. № 5 (58). С. 76-81.

3. Айроян З.А., Коркишко О.А., Сухарев Г.В. Мониторинг магистральных нефтепроводов с помощью беспилотных летательных аппаратов // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 179.

4. Multichannel strain-gauging system equipped with microprocessor for strength measurements of structures / Stepanova L.N., Lebedev E.Yu., Kabanov S.I., and oth. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2001. Т. 37. № 4. С. 306-312.

5. Bashkov O.V., Zaikov V.I., Khun K., Bashkov I.O., Romashko R.V., Bezruk M.N., Panin S.V. Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. Т. 53. № 6. С. 415-421.

6. Pozharkova I.N. Efficiency improving of emergency monitoring and forecasting based on the information system // Siberian Journal of Science and Technology. 2020. Т. 21. № 3. С. 323-332.

7. Выплавень В.С., Бехер С.А., Коломеец А.О. Обнаружение дефектов поверхности катания колесных пар грузовых вагонов в движении с использованием тензометрии / В сборнике: Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов. В 9-и частях. Под редакцией А.В. Гадюкиной. 2019. С. 12-14.

8. Банькова К.Ю., Никитина А.В., Ем Ю.М. Обзор способов мониторинга трубопроводов и обнаружения утечек нефти // Научный альманах. 2021. № 4-2 (78). С. 35-39.

9. Скворцов А.П., Озёрин И.А. Проблемы повышения защищенности трубопроводного транспорта // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 10 (27). С. 14.

10. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / под. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.

11. Стадийность деформации поликристаллических материалов. исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В., и др. – Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2014. – 301 с.

12. Медведева М.Л., Ратанова М.Д. Выявление основного источника акустической эмиссии при общей коррозии углеродистой стали // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2014. № 2 (275). С. 94-102.

13. Степанова Л.Н., Кутень М.М., Бобров А.Л. Использование амплитудного анализа сигналов акустической эмиссии при циклическом и статическом нагружении стальных образцов // Дефектоскопия. 2021. № 9. С. 18-26.

14. Кулешов В.К., Шумихин В.Ф. Организация службы неразрушающего контроля качества: Уч. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999, – 152 с.

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛА ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF METAL PERFORMANCE OF LONG-TERM POWER EQUIPMENT

Абабков Николай Викторович[1,2,3]
Ababkov N.V.
Смирнов Александр Николаевич[2,3]
Smirnov A.N.
Фольмер Сергей Владимирович[2,3]
Folmer S.V.
Пимонов Максим Владимирович[1,2,3]
Pimonov M.V.

[1]Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
650065, Кемерово, пр-т Советский, 18
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28
[1]ООО «Кузбасский центр сварки и контроля»,
650040, Россия, Кемерово, ул. Радищева, 1Б
[1]The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS,
650065, Russia, Kemerovo, Sovetskiy Ave., 18
[2] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
650000, Russia, Kemerovo, Vesennyaya Str., 28
[3]OOO Kuzbass Centre for Welding and Quality Control,
650055, Russia, Kemerovo, Radishev str., 1B
e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Аннотация: *Представлен новый подход к оценке работоспособности и ресурса металла потенциально-опасного оборудования тепловых электростанций, основанный на выявлении закономерностей изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений в длительно работающем металле спектрально-акустическим методом с учетом структурно-механического коэффициента. Приведены сведения об изменении структурного состояния металла в процессе длительной эксплуатации теплоустойчивых сталей.*

Ключевые слова: *спектрально-акустический метод, структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений, длительная прочность, сварные соединения, теплоустойчивые стали, паропроводы.*

Abstract. A new approach to assessing the performance and service life of the metal of potentially hazardous equipment of thermal power plants is presented, based on identifying patterns of changes in the structural-phase state and internal stress fields in a long-term working metal using the spectral-acoustic method, taking into account the structural-mechanical coefficient. Information is given on the change in the structural state of the metal during long-term operation of heat-resistant steels.

Keywords: spectral-acoustic method, structural-phase state, internal stress fields, long-term strength, welded joints, heat-resistant steels, steam pipelines.

Введение

Основная часть (более 80 %) оборудования предприятий электроэнергетики России была введена в эксплуатацию в период с 1960 по 1985 г., следовательно, его наработка составляет от 30 до 50 лет [1]. После этого периода случилось существенное замедление ввода новых генерирующих мощностей, задержка с разработкой и созданием современного экономичного оборудования ТЭС [2–4] при сохранении регламентированных требований по его безопасности. В результате комплекса масштабных исследований, проведенных специалистами многих ведущих организаций страны, было внедрено понятие «парковый ресурс», что позволило в 1,5–2,0 раза увеличить срок службы основного оборудования ТЭС [4]. Понятие «паркового ресурса» было распространено на наиболее ответственное тепломеханическое оборудование ТЭС [5], преимущественно работающее в условиях ползучести или при жестких условиях нагружения, вызывающих потенциально опасную повреждаемость металла.

В науке и технике используют большое количество методов и подходов к оценке работоспособности жаропрочных материалов.

Методы, основанные на использовании уравнения состояния, считаются наиболее разработанными. В работах В. И. Ковпака [6 – 10] предложен и обоснован метод обработки экспериментальных данных и прогнозирования длительной прочности материалов, основанный на гипотезе эквивалентной повреждаемости. Для оценки результатов испытаний на длительную прочность наиболее распространены зависимости Ларсена-Миллера и Мансона-Хаверда [5].

Для решения производственных задач, зачастую, многие вышеперечисленные методы бывают неприемлемыми из-за большой длительности испытания. В связи с этим в последнее время широкое развитие получили экспресс-методы оценки жаропрочности, базирующиеся на изменении различных механических, структурных и физических характеристик материала.

В. И. Куманин [4, 12, 13] предложил метод оценки эксплуатационной надежности жаропрочных материалов путем определения его плотности. В. Ф. Злепко и Н. В. Бугай [14] предложили оценивать длительную прочность по пределу текучести и относительному удлинению после испытаний при комнатной температуре. В работах [15 – 18] проводили оценку длительной прочности по комплексу кратковременных механических характеристик. Аллен и Форрест [16] установили, что зависимость между пределом длительной прочности и пределом усталости, определенном как при изгибе, так и при растяжении. А. А. Бочваром [17] предложен метод оценки жаропрочности по длительной твердости. Е. Я. Векслер и С. П. Голянский [19], Е. И. Крутасова [20, 21] использовали метод горячей твердости для определения предела длительной прочности стали 12Х1МФ с применением параметра Ларсена-Миллера [22].

Существует ряд работ у авторов: В. Ф. Злепко с сотрудниками [23, 24], Ю. М. Гофман [25] о взаимосвязи эксплуатационной надежности, предела длительной прочности с различными структурными параметрами сталей.

Одним из недостатков экспресс-методов является преимущественное выделение одного или нескольких факторов (содержание легирующих элементов в карбидном осадке, плотность карбидных частиц и т.д.) из всего комплекса характеристик исследуемого материала, определяющих жаропрочность.

Теоретическая часть

Для более достоверной оценки работоспособности необходим интегральный физический метод исследований, базирующийся на регистрации изменений механических и структурных характеристик металла в процессе длительной эксплуатации энергооборудования.

Развиваются подходы к прогнозированию работоспособности и оценке остаточного ресурса на основе методов неразрушающих испытаний, связанных со структуроскопией. Разработан ряд критериев предельного состояния длительного работающего основного металла и сварных соединений.

Критерий оценки ресурса сварных соединений паропроводов. В сварных соединениях паропроводов уровень полей внутренних напряжений оказывает существенное влияние на акустические характеристики, в частности на время распространения волн Рэлея. При исследовании металла сварных соединений обнаружена анизотропия акустических свойств вдоль и поперек сварного шва. На основе результатов измерений времени распространения волн на поверхности сварного соединения в исходном состоянии и на поверхности исследуемого (контролируемого) сварного соединения (после определенного срока эксплуатации) разработан критерий оценки ресурса сварных соединений K.

Под исходным состоянием сварного соединения понимается сварное соединение, выполненное из тех же основных и сварочных материалов по той же технологии, что и контролируемое. Разработанный критерий оценки ресурса сварных соединений K выражается формулой (1):

$$K = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{t01} \cdot R_{t02}}, \quad (1)$$

где R – среднестатистическое время распространения волн Рэлея: вдоль сварного соединения в исходном состоянии – R_{01} и в контролируемом элементе – R_{t01}; R_{02} – распространяющихся перпендикулярно сварному соединению в исходном состоянии и в контролируемом элементе - R_{t02}, нс.

Зависимость критерия K от величины локальных полей внутренних напряжений в сталях 20, 09Г2С, 12Х1МФ показана на рисунке 1. Оценка технического состояния сварных соединений паропроводов по критерию K применена на ряде сварных соединений паропроводов ТЭС Кузбассэнерго. Экспериментально доказано, что при $K \leq 0{,}98$ металл сварных соединений выработал свой ресурс и необходимо выполнение ремонтно-восстановительных мероприятий.

Результаты исследований сварных соединений разработанным методом структуроскопии положены в основу методических рекомендаций по оценке ресурса сварных соединений трубопроводов ТЭС. Методические рекомендации и критерий оценки ресурса сварных соединений реализованы при техническом диагностировании сварных соединений трубопроводов ТЭС Кузбассэнерго совместно с ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность».

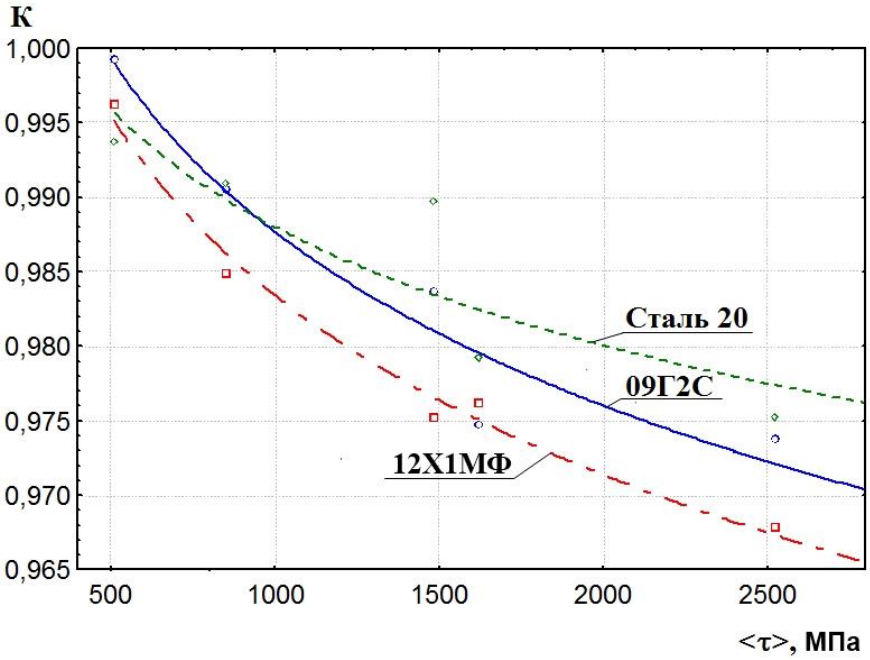


Рисунок 1 – Связь критерия оценки ресурса сварных соединений K с величиной локальных полей внутренних напряжений $<\tau>$

Критерий оценки ресурса сварных барабанов котлов. В сварных соединениях барабанов котлов высокого давления, изготовленных из сталей 22К и 16ГНМ и специальной молибденовой стали, наряду с оценкой локальных полей внутренних напряжений, исследовали структуру и фазовое состояние, как основного, так и наплавленного металла после ремонта сваркой дефектных сварных соединений [26]. Анализ поверхностных слоев образцов длительно работающего основного и наплавленного металла сварных барабанов котлов показал, что в них формируются дальнодействующие поля внутренних напряжений, источниками которых являются крупные скоагулированные карбиды M_3C и цепочки карбидов по границам фрагментов, а также деформации по границам зерен. Увеличение в структуре металла числа источников внутренних напряжений (плотности дислокаций и выделений карбидов) и изменение характера их распределения приводит к повышению величины полей внутренних напряжений.

После комплекса акустических исследований было установлено, что в основном и наплавленном металле барабанов котлов высокого давления, поля внутренних напряжений оказывают существенное влияние на акустические характеристики, в частности на время распространения рэлеевских волн. Все полученные результаты были учтены в разработке критерия оценки ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления.

Для акустического критерия, за величину степени поврежденности длительно работающего металла сварных барабанов котлов высокого давления было принято отношение анизотропии акустических свойств в наплавленном металле к анизотропии свойств длительно работающего металла. Кроме этого, разработанный критерий также учитывает степень изменения локальных внутренних напряжений в длительно работающем металле до и после ремонта.

С учетом того, что исследуемый длительно работающий металл акустически анизотропен, то разработанный критерий оценки ресурса сварных барабанов котлов (F_c) представлен в относительных единицах и выражается:

$$F_c = \gamma \cdot K_C^{-1}, \qquad (2)$$

где K_C – коэффициент, учитывающий анизотропию акустических свойств; γ – коэффициент, учитывающий изменение величины внутренних напряжений в исследуемом металле. Коэффициент γ выражается формулой (3):

$$\gamma = \frac{\tau_{вн}^{0} - \tau_{вн}}{\tau_{вн}}, \quad (3)$$

где $\tau_{вн}^{0}$ – величина внутренних напряжений в исследуемом металле до ремонта, $\tau_{вн}$ – величина внутренних напряжений в исследуемом металле после ремонта. Коэффициент K_C выражается формулой (4):

$$K_C = \frac{\Delta R_1}{\Delta R_2}, \quad (4)$$

где ΔR_1 и ΔR_2 – анизотропия акустических свойств в металле после ремонта и в длительно работающем металле до ремонта соответственно. Данные величины рассчитываются как разница времен распространения рэлеевских волн в металле перпендикулярно и параллельно сварному шву:

$$\Delta R_1 = \left|\Delta \bar{R}_1^{перп} - \Delta \bar{R}_1^{пар}\right|, \quad \Delta R_2 = \left|\Delta \bar{R}_2^{перп} - \Delta \bar{R}_2^{пар}\right| \quad (5)$$

Разработанный критерий апробирован на длительно работающем и наплавленном металле ряда барабанов котлов высокого давления. Экспериментально установлено, что при γ>0,13, металл находится в критическом состоянии, при этом K_C должен находиться в пределах 0,64<K_C<1. Расчеты F_c показали, что при F_c>0,22, исследуемый металл барабана котла находится в стадии предразрушения и необходимо проведение ремонтно-восстановительных мероприятий (рисунок 3).

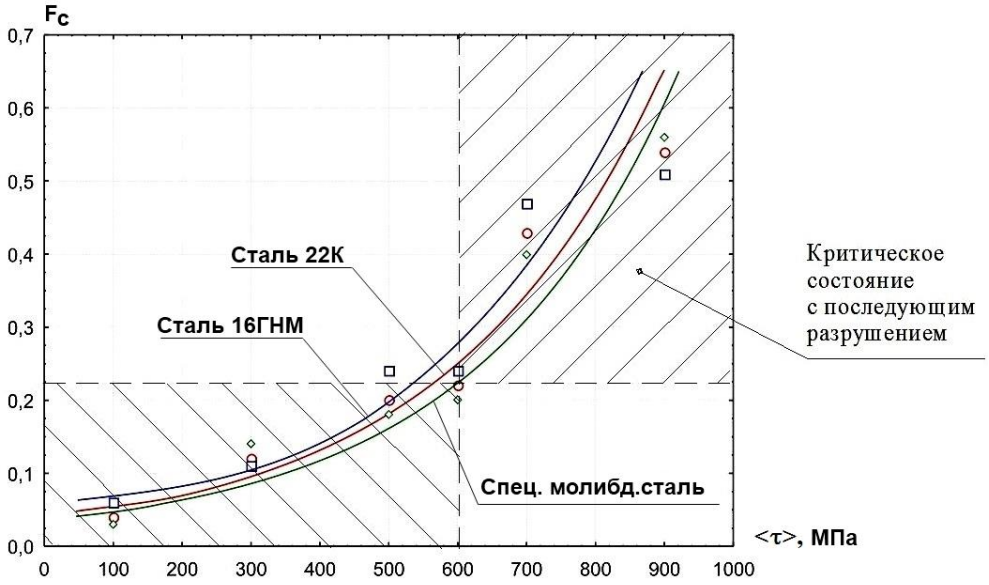


Рисунок 3 – Связь критерия оценки ресурса сварных барабанов котлов F_C с изменением величины локальных полей внутренних напряжений <τ>

Комплексный критерий предельного состояния длительно-работающего металла. Полученные зависимости позволили разработать комплексный критерий предельного состояния K_f длительно-работающего металла (6), который определяется временем

распространения рэлеевских волн (W_0) в металле с исходным состоянием структуры, в металле, исчерпавшем свой ресурс работоспособности (Wf) и в контролируемом металле (W_τ):

$$K_f = \frac{W_\tau - W_0}{W_f - W_0} \cdot \frac{W_f}{W_\tau} \cdot \gamma \quad , \tag{6}$$

где γ – коэффициент, учитывающий изменение величины локальных полей внутренних напряжений в контролируемом металле.

Комплексный критерий K_f апробирован на ряде разрушенных элементов энергооборудования ТЭС. Найдено, что при $K_f \geq 0{,}7$ металл достигает предельного состояния. Критерий применен при экспертизе длительно-работающих и разрушенных гнутых участков паропроводов из сталей 20, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и труб поверхностей нагрева из стали 12Х2МФСР котлоагрегатов ряда электростанций Сибири.

С уменьшением длительной прочности теплоустойчивых сталей происходит рост времени распространения рэлеевских волн, вызванный увеличением плотности источников внутренних полей напряжений. Максимальному времени распространения рэлеевских волн ΔW соответствуют минимальная длительная прочность $\sigma_{10^4}^{600}$ (рисунок 4).

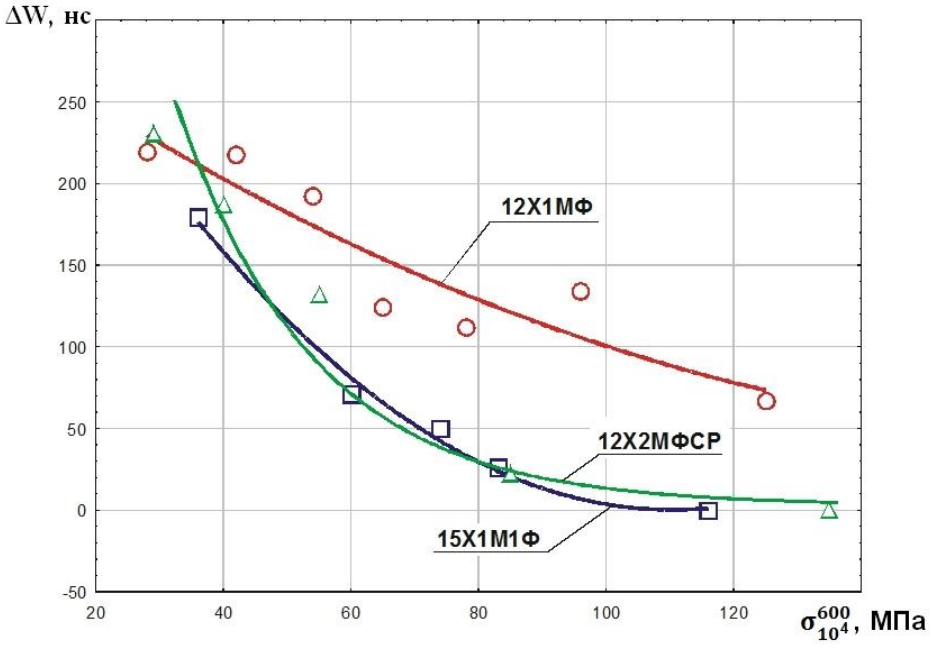


Рисунок 4 – Связь длительной прочности теплоустойчивых сталей и времени распространения рэлеевских волн

Установленные зависимости между длительной прочностью хромомолибденованадиевых сталей, определяемой уровнем локальных полей внутренних напряжений, подтвердили, что для конструкционных сталей величина внутренних напряжений и характер распределения их источников является важнейшим показателем работоспособности для оценки ресурса паропроводов ТЭС [26, 27].

Количественно оценить время, а также место будущего разрушения можно путем установления зоны устойчивой локализации деформаций. Научным коллективом лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН предложен подход к наблюдению деформаций Чернова-Людерса в процессе одноосного растяжения под лазером и при

скоростной киносъемке. Одним из главных преимуществ такого подхода является принципиальная возможность обнаружения места будущего разрушения образца – зону устойчивой локализации деформации до образования «шейки» (коллапс автоволны).

Больший научный и практический интерес представляет использование акустических и магнитных методов неразрушающих испытаний для обнаружения зон устойчивой локализации деформации с целью оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего оборудования [3].

Разработан структурно-механический критерий [28], отражающий выявленные взаимосвязи между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний в металле длительно работающего энергооборудования из сталей 20 и 12Х1МФ.

Текущее состояние оборудования в момент диагностирования характеризует показателем $K_т$, который можно представить, как

$$K_т = f(K_{стр}, K_{реж}, K_{деф}, K_{мех}), \quad (7)$$

где $K_{стр}$ – параметры структуры металла в текущем состоянии, определяемые при помощи металлографии; $K_{реж}$ – режимы эксплуатации (температура, давление (нагрузка), цикличность, среда), $K_{деф}$ – наличие дефектов изготовления, монтажа и ремонта, выявляемых физическими методами неразрушающих испытаний; $K_{мех}$ – характеристики металла, полученные разрушающими испытаниями.

В связи с тем, что ранее предложенные комплексные критерии степени поврежденности металла в относительных единицах и основанные на применении времени задержки поверхностной акустической волны (R, нс) не могут применяться, когда металл находится в области пластических деформаций ($\sigma_{0,2}<\sigma<\sigma_в$), то нами предлагается ввести в эту систему (2) структурно-механический критерий локализованной деформации металла в текущем состоянии ($K_{с.-м}$), определяемый методом просвечивающей электронной микроскопии и учитывающий деформационные показатели, а также степень достижения устойчивой зоны локализации деформации (9):

$$K_T \rightarrow f(K_{с.-м}, K_{реж}, K_{деф}) \quad (8)$$

$$K_{с.-м} = f(\sigma_л, \sigma_д, \rho_{\pm}, \rho\ , a_1, a_2, \sigma_{0,2}/\delta) \quad (9)$$

где $\sigma_д$ – амплитуда полей внутренних напряжений, МПа; $\sigma_л$ – касательные напряжения, МПа; $\rho_{\pm}$ – избыточная плотность дислокаций, см$^{-2}$; ρ – скалярная плотность дислокаций, см$^{-2}$; a_1 и a_2 – деформационные показатели, отражающие степень достижения устойчивой зоны локализации деформации, $\sigma_{0,2}/\delta$ – отношение предела текучести к относительному удлинению (определяются при комнатной температуре).

Для изученных сталей предложен структурно-механический критерий, который был отработан на длительно работающих теплоустойчивых сталях энергооборудования на всех стадиях жизненного цикла (от исходного состояния без эксплуатации до достижения предельного состояния и разрушения) и который имеет следующий вид:

$$K_{с.-м} = \left(\frac{\sigma_л}{\sigma_д} + \frac{\rho}{\rho_{\pm}}\right) \times \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1} \cdot \ln\frac{\sigma_{0,2}}{\delta} \quad (10)$$

При расчетах установлены значения структурно-механического критерия, соответствующие моменту устойчивой локализации деформации: для стали 20 при значениях $K_{с.-м} \le 0{,}35$, проверяемый узел оборудования рекомендуется подвергать замене в связи с исчерпанием ресурса работоспособности; для стали 12Х1МФ проверяемый узел оборудования рекомендуется подвергать замене в связи с исчерпанием ресурса работоспособности при значениях $K_{с.-м} \le 0{,}38$.

Общее время эксплуатации любого оборудования (11) складывается из времени наработки оборудования до момента обследования (текущего состояния) $\tau_{тек}$ и дальнейшего

времени работы оборудования до достижения предельного состояния $\tau_{ост}$ (остаточный ресурс):

$$\tau_{п.с} = \tau_{тек} + \tau_{ост}, \quad (11)$$

При условии сохранения относительного постоянства $K_{реж}$ и $K_{деф}$ на всем протяжении срока эксплуатации оборудования выражения (7) и (11) можно записать в виде:

$$K_T \to f(K_{с.-м}) \quad (12)$$

$$\frac{\tau_{ост}}{\tau_{тек}} = \frac{K_{п.с.} - K_{с.-м}}{K_{п.с.}}, \quad (13)$$

где $K_{п.с.}$ – коэффициент, характеризующий техническое состояние оборудования в момент достижения предельного состояния.

Момент достижения устойчивой локализации деформации может использоваться для оценки и прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса технического устройства. С учетом этого, остаточное время эксплуатации можно разделить на время до достижения устойчивой локализации деформации ($\tau_{ост.скорр}$ – скорректированный остаточный ресурс) и время от устойчивой локализации деформации до разрушения ($\tau_{улд}$). Тогда выражение (11) примет вид:

$$\tau_{тек} + \tau_{ост.скорр} + \tau_{улд} = \tau_{п.с}. \quad (14)$$

Так как вместо предельного использовалось состояние устойчивой локализации деформации, то формула (13) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\tau_{ост.скорр}}{\tau_{тек}} = \frac{K_{улд} - K_{с.-м}}{K_{улд}}, \quad (15)$$

где $K_{улд.}$ – коэффициент, характеризующий техническое состояние оборудования в момент достижения устойчивой локализации деформации.

Из формулы (15), проведя математические преобразования и подставляя в формулу результаты расчетов и исследований, получен искомый результат – остаточное время эксплуатации оборудования.

$$\tau_{ост.скорр} = \frac{\tau_{тек}(K_{улд} - K_{с.-м})}{K_{улд}}. \quad (16)$$

Процесс расчета структурно-механического критерия и прогнозирование работоспособности на его основе требует высокой квалификации оператора и занимает относительно продолжительное время. Поэтому для упрощения процесса расчета и уменьшения трудоемкости была разработана автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего энергооборудования на базе критериев предельного состояния и структурно-механического критерия.

Автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности была апробирована в промышленных условиях на ряде участков паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из сталей 20 и 12Х1МФ. Так для 36 паротводящих труб, изготовленных из стали 20, после эксплуатации в 219–242 тыс. часов, была произведена оценка остаточного ресурса, которая показала, что для 70 % труб остаточный ресурс составил 50–75 тыс. часов, 20 % – 25–50 тыс. часов, а для 10 % необходимо произвести замену в связи с исчерпанием ресурса работоспособности. Для 29 паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из стали 12Х1МФ после эксплуатации 180–263 тыс. часов, расчет показал, что для 60 % паропроводов остаточный ресурс составил 50–70 тыс. часов, 25 % – 25–50 тыс. часов, а для 15 % необходимо произвести замену в связи с связи с исчерпанием ресурса работоспособности.

Результаты расчета остаточного ресурса по структурно-механическому критерию были сопоставлены с результатами, полученными экспертной организацией при выполнении экспертизы промышленной безопасности. Совпадение результатов оценки остаточного ресурса составило 95 %.

Выводы

1. При сопоставлении результатов расчета остаточного ресурса энергетического оборудования в автоматизированной системе установлена высокая сходимость с результатами, полученными при расчете непосредственно параметрам микроструктуры (электронная микроскопия) и деформационным показателям.

2. Предложенный и обоснованный подход к оценке и прогнозированию работоспособности и остаточного ресурса длительно работающего энергооборудования, основанный на выявленных взаимосвязях между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний и расчете структурно-механического критерия был применен на ряде электростанций Кемеровской области-Кузбасса.

3. Однако, структурно-механический критерий требует большого числа расчётов, которые можно автоматизировать с применением интеллектуальных систем.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, соглашение № 22-29-20192.

Список литературы

1. Гринь, Е. А. Повышение рабочего ресурса элементов теплосилового оборудования электростанций с учетом макроповреждаемости металла» автореферат дис. ... доктора технических наук,

2. Резинских, В.Ф., Гринь, Е.А. Современные проблемы обеспечения безопасности тепломеханического оборудования при продлении сроков его службы // Теплоэнергетика, 2013. – №1. – С. 17–24.

3. Смирнов, Александр Николаевич Эволюция микроструктуры и критерии предельного состояния при прогнозировании работоспособности теплоустойчивых сталей : диссертация ... доктора технических наук : 05.16.01, 05.02.11 Новосибирск 2004 397 с.

4. Бугай Н.В. Шкляров М.И. Неразрушающий контроль металла теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 177с.

5. Куманин В.И. Структура, поврежденность и работоспособность теплостойкой стали при длительной эксплуатации//МиТОМ.-1980.-№12.- С.26-29.

6. Ковпак В. И., Марусий О. И. Об эквивалентной повреждаемости при испытаниях на длительную прочность. - Проблемы прочности,1972, № 4, с.15-17.

7. Ковпак В. И., Олисов А. Н. Некоторые особенности высокотемпературной ползучести сплавов на никелевой основе. - Проблемы грочности,1973, №2, с. 21-25.

8. Ковпак В. И. О пересчете показателей жаропрочности на различные температуры. - Заводская лаборатория, 1971, № 12, с. 1113-1119.

9. Ковпак В. И. К вопросу об оценке и прогнозировании статистик характеристик длительной прочности жаропрочных металлических материалов. Проблемы прочности, 1977, №7, с. 49-57.

10. Ковпак В. И. К вопросу о прогнозировании остаточной долговечности металлических материалов. - Проблемы прочности, 1981, № 10, с. 95-99.

11. Антикайн П. А., Зыков А. К. Изготовление объектов котлонадзора. Справочное издание. Металллургия, 1988. - 328с.

12. Куманин В.И. Структура, поврежденность и работоспособность теплостойкой стали при длительной эксплуатации//МиТОМ.-1980.-№12.- С.26-29.

13. Куманин В. И., Шкляров М. И., Ковалева Л. А. О характере разрушения гибов паропроводных труб//Теплоэнергетика.- 1979.- №7.- С. 56-58.

14. Злепко В. Ф. Бугай Н. В. О связи длительных и кратковременных свойств прочности трубных сталей. - Энергетик, 1970, №11, с.14-17.

15. Методические рекомендации по оценке длительной прочности жаропрочных сплавов по результатам кратковременных испытаниях / Институт проблем прочности АН УССР: Сост. В. В. Кривенюк. - Киев; 1978. - 37 с.

16. Бугай Н. В., Кривенюк В. В., Авраменко Д. С. Об использовании кратковременных механических характеристик для оценки длительных прочностных свойств стали 12Х1МФ// Проблемы прочности.-1980.- №3.- С.54-56.

17. Бочвар А. А. Зависимость жаропрочности алюминиевых сплавов от времени старения//Известия АН СССР.- 1947.- №10.- С. 2-4.

18. Кривенюк В. В. О связи кратковременных механических характеристик с длительной прочностью. - Проблемы прочности, 1974, №3, с. 31-35.

19. Векслер Е. Я., Голянский С. П. Определение длительной прочности стали 12Х1МФ методом горячей длительной твердости// Электрические станции.-1965.- №2.- С.23-26.

20. Крутасова Е. И. Надежность металла энергетического оборудования. - М.: Энергоиздат, 1981. - 237 с.

21. Крутасова Е. И., Талова Т. М. Надежность работы металла паропроводов после расчетного срока службы. - Электрические станции, 1968, №2, с. 15-19.

22. Рохлин И. Н. Ускоренный метод определения длительной прочности путем измерения твердости. - Заводская лаборатория, 1960, №7, с. 850-852.

23. Злепко В. Ф., Захарова А. И. Критерий эксплуатационной надежности стали 12Х1МФ. - Электрические станции, №4, 1970, с. 32-34.

24. Злепко В. Ф., Самсонов В. П., Швецова Т. А. и др. О корреляции структуры, физических свойств и жаропрочности хромомолибденованадиевой стали в условиях ползучести. - В кн.: Жаропрочность и жаростойкость металлических материалов. - М.: Наука, 1976, с. 156-159.

25. Гофман Ю. М. Ускоренный метод определения длительной прочности металла паропроводов из стали 12МХ после продолжительной эксплуатации. - Энергетик, 1969, №6, с. 31-32.

26. Смирнов, А.Н. Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высокого давления /Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Козлов Э.В., Муравьев В.В. // Контроль. Диагностика, №7, 2012. С. 13-17.

27. Смирнов, А.Н. Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению / А.Н. Смирнов, С.В. Фольмер, Н.В. Абабков // Вестник КузГТУ. – 2009. – №3. – С. 28–38.

28. Смирнов, А. Н. Критерии оценки состояния и ресурса длительно работаю-щих барабанов котлов высокого давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Сварка и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 55–58.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГОРНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

STUDY OF THE STRUCTURE OF AUSTENITIC STEELS, USED IN MINING ENGINEERING

Тюрин Сергей Иванович[1],
Tyurin S.I.
Гильманшина Татьяна Ренатовна[1],
Gilmanshina T.R.
Ковалева Ангелина Адольфовна[1],
Kovaleva A.A.
Крицкий Дмитрий Юрьевич[1],
Kritsky D. Yu.
Кашубский Иван Николаевич[1],
Kashubsky I.N.
Баланев Руслан Олегович[1]
Balanev R.O.

[1]Сибирский федеральный университет
660025, Россия, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95,
Siberian Federal University
660025, Russia, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarsky worker, 95,
e-mail: tesvim@mail.ru; gtr1977@mail.ru; angeli-kovaleva@yandex.ru;
dykritskij@gmail.com; 2804460@mail.ru; rbalanev@sfu-kras.ru

Аннотация. *В России в горном машиностроении традиционно широко применяют для изготовления узлов и деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, высокомарганцевые аустенитные стали типа 110Г13Л, наиболее важной характеристикой которых является размер зерна. В настоящее время на рынке представлены программы обработки изображений, в том числе «IMAGE-SP», Видео-ТесТ, Autoscan, SIAMS и др. Все они используют разные принципы распознавания границ зерен. Целью данной работы является определение возможностей программы SIAMS 800 для оценки качества аустенитных сталей.*

Ключевые слова: *горное машиностроение; сталь Гадфильда; структура; размер зерна; метод хорд; визуальный метод; анализ частиц*

Abstract. In Russia, in mining engineering, high-manganese austenitic steels of the 110G13L type are traditionally widely used for the manufacture of units and parts operating under conditions of intense abrasive wear, the most important characteristic of which is the grain size. Currently, there are image processing programs on the market, including IMAGE-SP, Video-TesT, Autoscan, SIAMS, etc. All of them use different principles of grain boundary recognition. The purpose of this work is to determine the capabilities of the SIAMS 800 program for evaluating the quality of austenitic steels.

Key words: mining engineering; Hadfield steel; structure; grain size; chord method; visual method; particle analysis

Введение

Надежность и долговечность работы горного оборудования в значительной степени зависит от износостойкости его узлов и механизмов (траков, передней стенки ковшей экскаваторов, коронок зубьев и т.д.), которые в процессе горных работ подвергаются интенсивному абразивному или ударно-абразивному износу. Выход из строя перечисленных выше узлов и механизмов, вызванный их поломкой или быстрым износом, является основным фактором, определяющим межремонтный срок службы оборудования, и ведет к сокращению объемов добычи сырья, снижает производительность и эффективность производства. Для изготовления таких узлов и механизмов наиболее широко применяют высокомарганцевые стали типа 110Г13Л [1–3].

Сталь 110Г13Л относится к стабильным аустенитным сталям. Деформационные мартенситные превращения в ней не имеют заметного развития и существенное упрочнение достигается после относительно большой деформации (нагружение взрывом и т. п.). Поэтому, эксплуатационная стойкость деталей из этой стали, особенно в условиях преобладания абразивного износа, недостаточна. Повышение абразивной износостойкости аустенитных сталей без заметного снижения основных свойств существенно повысит ресурс работы оборудования, машин, механизмов. Поэтому были разработаны экономно-легированный вариант высокомарганцевых аустенитных сталей типа 110Г13Л – сталь 120Г10ФЛ, а также комплексно-легированные стали марок 110Г13ФТЛ, 110Г13Х2БРЛ, 110Г13ХБРЛ [4–10].

Целью данной работы данной работы является определение возможности программы SIAMS 800 для оценки качества аустенитных сталей.

Методика экспериментального исследования

Для исследований выбрана сталь марки 110Г13Х2БРЛ, химический состав которой приведен в таблице 1. Химический состав стали был определен на спектрометре оптико-эмиссионный переносный мобильный SPECTROTEST.

Таблица 1 – Химический состав образца

Элемент	Содержание, мас.%	Элемент	Содержание, мас.%
C	1,19	Si	0,520
Mn	>16,57	P	0,042
S	0,014	Cr	1,93
Mo	0,15	Ni	0,28
Al	0,066	Co	0,019
Cu	0,025	Nb	<0,03
Ti	0,015	V	0,023
Sn	0,003	Fe	79,1

Микрошлифы изготавливали на автоматизированном шлифовально-полировальном станке Saphir 520, Germany. Травление образцов осуществляли путем втирания травителя ватным тампоном в поверхность шлифа. Состав травителя: $CuSO_4$ – 4 г, HCl – 20 мл, H_2O – 20 мл. Затем образец промывали в проточной воде.

Микроструктуру изучали на инвертированном микроскопе Axio Observer MAT. Для автоматического распознавания и анализа элементов структуры, статистической обработки результатов и формирования отчета в форматах MS Word, PDF, ODT применяли анализатор изображений SIAMS 800, использование которого позволяет:

– строить качественные панорамные изображения путем сканирования образца по произвольной траектории без захвата отдельных кадров, благодаря непрерывному анализу видеосигнала в режиме реального времени;

– проводить интеллектуальную автокоррекцию неравномерности освещенности;

– осуществлять автофокусировку;

– проводить экспресс-оценку микроструктуры в реальном времени;

– использовать быстрые алгоритмы анализа изображений и распознавания образов;

– измерять параметры структуры со статистической обработкой и построением отчетов;

– проводить коллективную работу благодаря удаленному доступу к просмотру изображений, измерениям, методикам анализа.

Определение величины зерна стали производили в соответствии с ГОСТ 5639–82 следующими методами:

1) визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал с определением номера зерна;

2) подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа с определением среднего диаметра и средней площади зерна;

3) подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра в случае равноосных зерен, количества зерен в 1 мм^3 в случае неравноосных зерен;

4) измерения длин хорд с определением относительной доли зерен определенного размера [13].

Результаты и обсуждение

Микроструктура стали 110Г13Х2БРЛ приведена на рисунке 1.

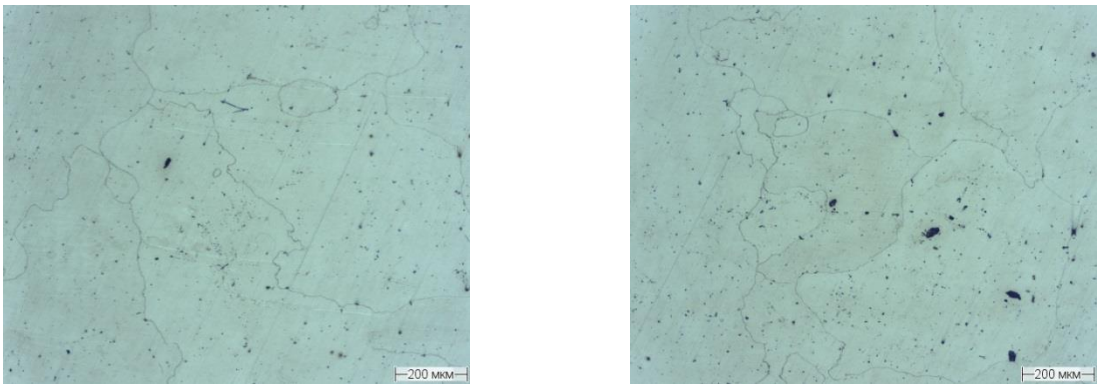


Рисунок 1 – Микроструктура образца

Сталь имеет микроструктуру в виде крупных и мелких неоднородно распределенных аустенитных зерен, внутри и по границам которых располагаются мелкие включения вторичных фаз: карбидов или интерметаллидов.

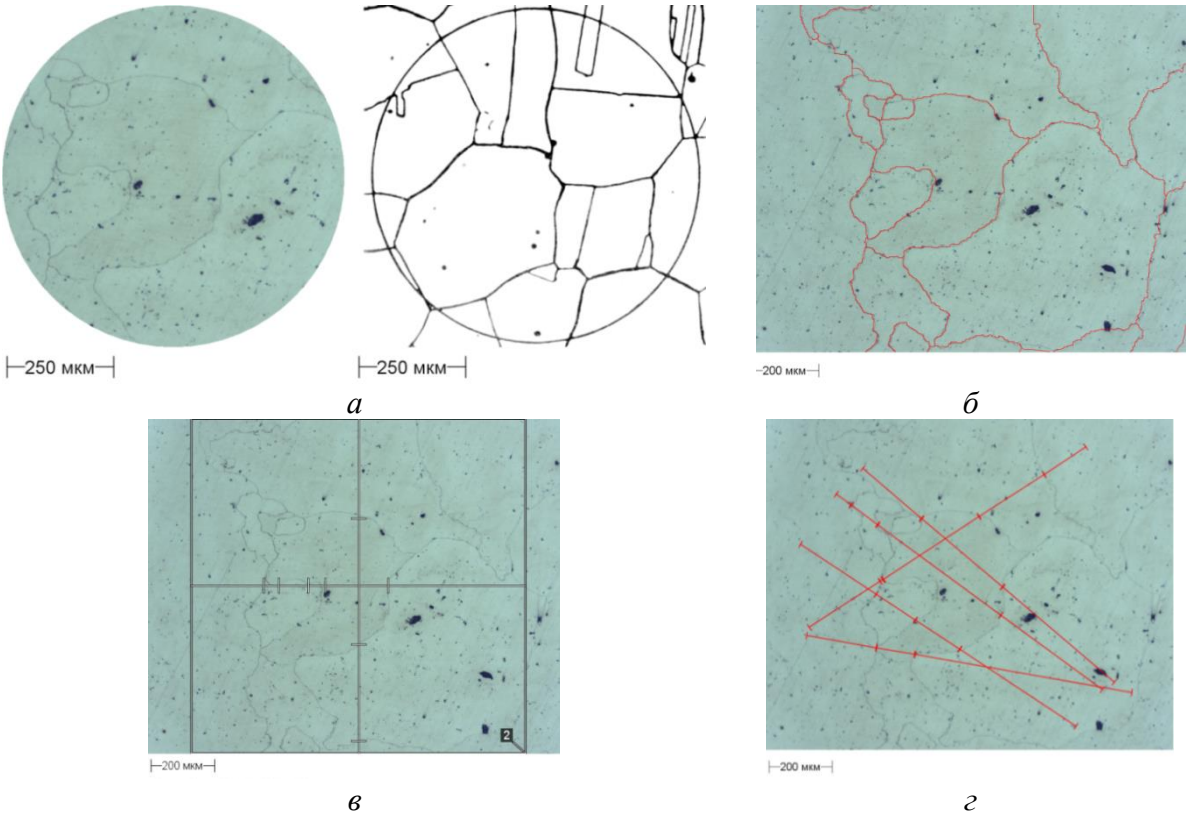
В результате металлографических исследований видно, структура сталей резко изменяется от равномерной крупнозернистой до разнозернистой, с наличием вторичных фаз, имеющих различные величину и строение, по границам зерен включения вытягиваются в строчку, а внутри зерен имеют ограненную форму.

Для определения размера зерна использовали все указанные выше методики. Результаты исследования размера зерна приведены в таблице 2 и на рисунках 2, 3.

Из представленных данных видно, что средний балл зерна стали, определенный разными методами, составляет 0 – 1. Для снижения разброса по среднему размеру зерна необходимо увеличивать площадь анализа.

Таблица 2 – Характеристики зеренной структуры сталей (по ГОСТ 5639–82)

Методы анализа	Средний условный размер зерна, мкм	Номер (балл) зерна
Метод сравнения	–	0,5
Метод подсчета количества зерен	238	0,5
Метод подсчета пересечений	340	0,0
Метод измерения длин хорд	255	0,7



а *б* *в* *г*

Рисунок 2 – Результаты применения методов определения величины зерна по ГОСТ 5639-82 в ПО SIAMS 800: *а* – метод сравнения; *б* – метод подсчета количества зерен путем автоматического восстановления сетки границ зерен; *в* – метод подсчета пересечений; *г* – метод измерения длин хорд

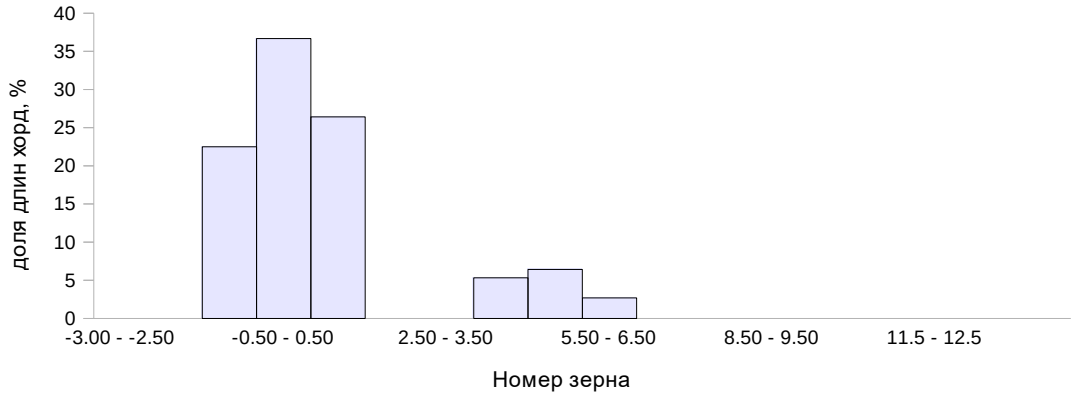


Рис. 3. Распределение зерен по размеру

В этом же образце был проведен анализ частиц фаз. Результаты анализа частиц фаз аустенитных сталей приведены в таблице 3 и на рис. 4, 5.

Результаты анализа частиц вторичных фаз в исследуемом материале в комплексе с результатами других испытаний можно использовать для сравнительного анализа разных образцов с целью оценки эффективности легирования аустенитных сталей.

Таблица 3 – Характеристики частиц фаз аустенитных сталей

Параметры частиц	**Значение**
количество частиц	408
доля площади, занимаемая частицами, %	0,77
количество частиц на кв.мм	151
средняя площадь включения, кв.мкм	51
средняя длина включения, мкм	8
среднее межчастичное расстояние, мкм	379

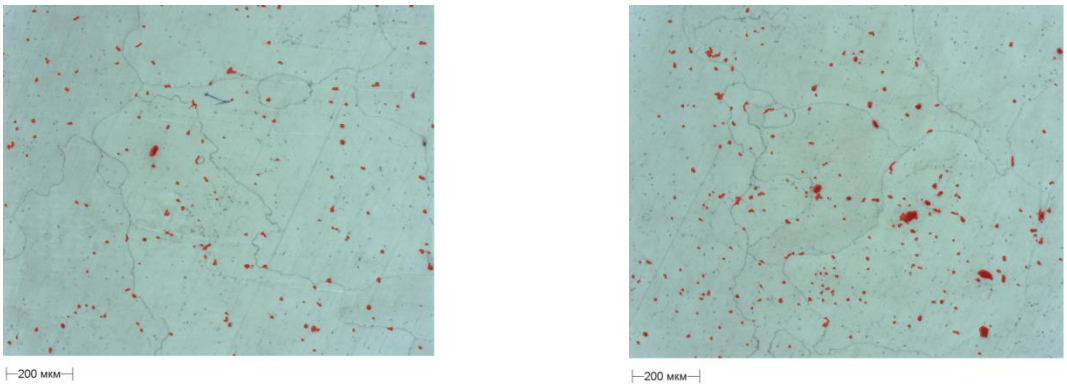


Рис. 4. Результат анализа частиц фаз в ПО SIAMS 800

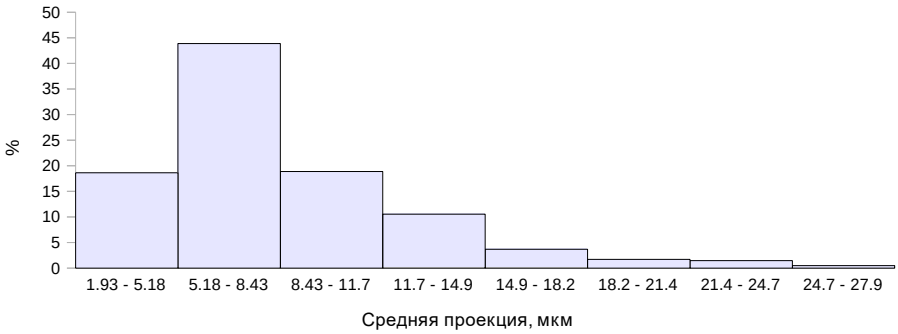


Рис. 5. Распределение частиц по размеру

Выводы

Таким образом, программа SIAMS 800 позволяет одновременно оценивать микроструктуру исследуемых образцов по нескольким параметрам: выявлять размеры зерен в соответствии с разными методами ГОСТ 5639-82, изучать соотношение, расположение, размеры частиц вторичных фаз и их объемную долю. Получение точных результатов анализа по образцам стали, полученной по разным технологиям (различие в химическом составе, термообработке) позволяет выбирать оптимальные технологические режимы производства для повышения эксплуатационных характеристики деталей горного машиностроения.

Список литературы

1. Влияние структуры марганцовистой стали на эксплуатационные характеристики деталей крупногабаритных литых изделий / Д. Ю. Крицкий, С. И. Тюрин, А. А. Ковалева, Т. Р. Гильманшина // Уголь. 2020. № 7. С. 9–12.

2. Исследование возможности повышения надежности литых крупногабаритных изделий для горного оборудования / Т. Р. Гильманшина, Д. Ю. Крицкий, С. И. Тюрин [и др.] // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 105.

3. The service durability assessment and model analysis of die cast part «Shovel tooth» production / V. M. Kolokoltsev, K. N. Vdovin, E. V. Sinitskiy, N. A. Feoktistov // Bulletin of MSTU named after G.I. Nosov. – 2015. – № 4. – P. 61–64.

4. Bringas, E. John Handbook of Comparative World Steel Standards, 2 nd. p.cm – (ASTM data serias; DS 67A).

5. Mulyavko, N. M. The analysis of the service durability of the steel grade 110G13L castings / N. M. Mulyavko // Bulletin of Chelyabinsk scientific centre UrD RAS. – 2001. – № 4. – P. 61–70.

6. The improvement of austenitic structure consistency of the steel grade 110G13L high in manganese / A. A. Belov, R. I. Iskenderov, N. I. Gabelchenko, E. Yu. Karpova // XXVI International innovation-oriented conference of young scientists and students IICYSS-2014 : conference proceedings. – M. : Russian academy of sciences; RFFI; The department of energetic, machinery manufacturing and management processes; The Institute of mechanical engineering named after A.A. Blagonravov RAS, 2015. – P. 21–24.

7. Zykova, A. P. Steel type 110G13L modification / A. P. Zykova // Modern machinery issues : VII International science and technology conference. – P. 86–90.

8. Chumanov, I. V. The issue of the influence of the metal chemical composition on the heat-treatment mode of castings made of steel grade 110G13L / I.V. Chumanov, // Bulletin of the South Ural state university. – 2012. – № 39. – P. 59–63.

9. Tsurkan, D. A. The improvement of the structural strength of the steel grade 110G13L and die cast parts, which are used in custom machines, by alloy addition of Mo, Ni and R3M modification / D. A. Tsurkan, A. N. Leontyev, A. V. Ishkov, // Polzunovskiy bulletin. – 2012. – № 1-1. – P. 334–336.

10. Tsurkan, D. A. Steel grade 110G13L, 38HS, 45HN structure and properties control, that are used for custom machines equipment production / D. A. Tsurkan // Ph.D. thesis in Technical science abstract, Barnaul, 2012. – P. 18.

13. Development of Steelmaking Processes for Producing Various High-Quality Steel Grades at Yawata Works / Sh. Kusunoki, R. Nishihara, K. Kato [et al.] // Nippon steel technical report. 2013. № 104. P. 109–116.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

ESTIMATING TECHNICAL CONDITION OF BEARING ELEMENTS FOR OPEN-PIT DUMP TRUCK METAL STRUCTURES

Герике Борис Людвигович[1,2],
Gerike B. L.,
Швыдкин Сергей Анатольевич[1]
Shvydkin S. A.

[1]Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
650065, Кемерово, пр. Ленинградский, 10
[2]Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
[1]The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
650065, Russia, Kemerovo, 10 Leningradskey Ave.,
[2]T.F. Gorbachyev Kuzbass State Technical University,
650000, Kemerovo, Vessenyaya str. 28
e-mail: gbl_42@mail.ru

Аннотация: *Рассмотрена возможность мониторинга технического состояния несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов методом акустико-эмиссионного контроля (АЭ-контроля). Приведены результаты периодического АЭ-контроля корпуса редуктора мотор-колеса, сведения об обнаруженных дефектах и проведённом ремонте.*

Предложенный метод позволит выполнять диагностику непосредственно во время работы автосамосвала, без вывода его из эксплуатации, ежедневно следить за развитием дефектов, планировать выполнение ремонтных работ, определять участки дорог, на которых происходит развитие дефектов.

При оснащении системами АЭ-контроля всего парка автотранспорта предприятия появляется возможность создать блок АСУ основными фондами Oracle с блоком TOPO для планирования сроков и объемов ремонтных работ, что позволит значительно повысить уровень безопасности при эксплуатации автосамосвалов.

Ключевые слова: *мониторинг, техническое состояние, диагностика, акустико-эмиссионный контроль, карьерный автосамосвал, корпус редуктора мотор-колеса.*

Abstract: The possibility to monitor technical condition of the bearing elements for open-pit dump trucks metal structures applying the method of acoustic-emission control (AE control) was studied. The results of periodic AE-control of power wheel gear box, the data on the revealed faults and maintenance were introduced.

The given method will allow fulfilling the diagnostics in the process of a dump truck operation without stopping it, monitoring the faults development daily, planning the maintenance and defining the sections on the road where the faults development takes place.

When the whole fleet vehicles is equipped with AE-control systems the possibility to create a block of automated control system with Oracle basic assets and TORO block for planning the terms and volumes of maintenance appears. All these will allow improving the safety level when using open-pit dump trucks.

Key words: monitoring, technical condition, diagnostics, acoustic-emission control, open-pit dump truck, motor-wheel gear case.

Постановка задачи

Анализ аварийных отказов большегрузных карьерных автосамосвалов на разрезах Кузбасса показывает, что наибольшее число отказов приходится на механическое оборудование (рисунок 1).

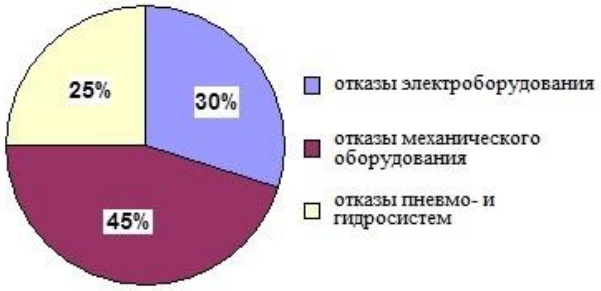


Рисунок 1 – Аварийные отказы большегрузных карьерных самосвалов

В процессе эксплуатации под воздействием различных факторов в несущей конструкции автомобиля происходит постепенное накопление повреждений, которые со временем вырастают в более крупные, несущие в себе угрозу для всей конструкции машины. К основным несущим элементам автосамосвала можно отнести раму, кузов и корпуса редуктора мотор-колеса (далее корпуса РМК).

Методика проведения исследований.

Для выявления дефектов периодически проводится визуальный осмотр [1], применяются различные виды неразрушающего контроля (ультразвуковой [2], капиллярный [3] и т.п.). Несмотря на использование различных методов неразрушающего контроля, иногда происходят аварийные отказы, связанные с внезапным разрушением несущих элементов автосамосвала, для исключения которых предлагается мониторинг их технического состояния методами акустико-эмиссионного контроля (АЭ-контроль) [4-12].

Для экспериментальной апробации предложенного подхода был выбран БелАЗ 75131, грузоподъёмностью 130 тонн, который прежде побывал в аварии, связанной с разрушением (рисунок 2) обоих корпусов редукторов мотор-колес (РМК), в результате которой был сильно повреждён картер заднего моста, что привело к длительному и затратному ремонту.

Рисунок 2 – Разрушенный корпус редуктора мотор-колеса

Результаты исследований.

После проведенного ремонта был проведен АЭ-контроль вновь установленных корпусов РМК с использованием акустико-эмиссионной системы Vulcan 8SM при установке 4 измерительных преобразователей на каждом корпусе РМК (линейная схема локации, рисунок 3).

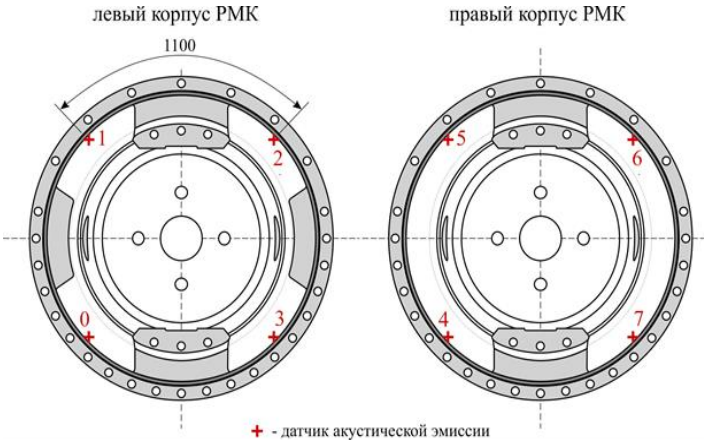


Рисунок 3 – Схема расстановки датчиков АЭ на корпусах РМК

На первых этапах работы оператор присутствовал в кабине автосамосвала для настройки параметров аппаратуры, а в дальнейшем сбор данных происходил в автоматическом режиме. В результате проведённого обследования на левом корпусе РМК была обнаружена одна зона повышенной активности сигналов акустической эмиссии (Зона-1, рисунок 4). Для более точного определения координат дефектов, датчики № 1 и 2 были переустановлены ближе к расположению Зоны-1, чтобы имелась возможность увидеть расположение дефекта на плоскостной локационной картине.

По результатом обследования Зоны-1 с использованием цветной дефектоскопии выявлено большое количество поверхностных металлургических дефектов (усадочные трещины, раковины, шлаковые включения, заливины, наплывы, рыхлоты), большая часть которых была удалена шлифовкой, но остались глубокие дефекты типа рыхлот с отходящими от них лучами трещин (рисунок. 4). Мониторинг технического состояния корпуса левого РМК в течение года показал медленное развитие выявленного дефекта, поэтому ремонт левого корпуса был выполнен во время регламентированного ремонта ПР-1 с выборкой выявленных дефектов и их заваркой.

После проведённого ремонта был выполнен повторный проверочный АЭ-контроль, подтвердивший успешное проведение ремонта (рисунок 5).

Таким образом, была подтверждена возможность и эффективность АЭ-контроля при мониторинге технического состояния металлоконструкций карьерных автосамосвалов в реальных условиях эксплуатации.

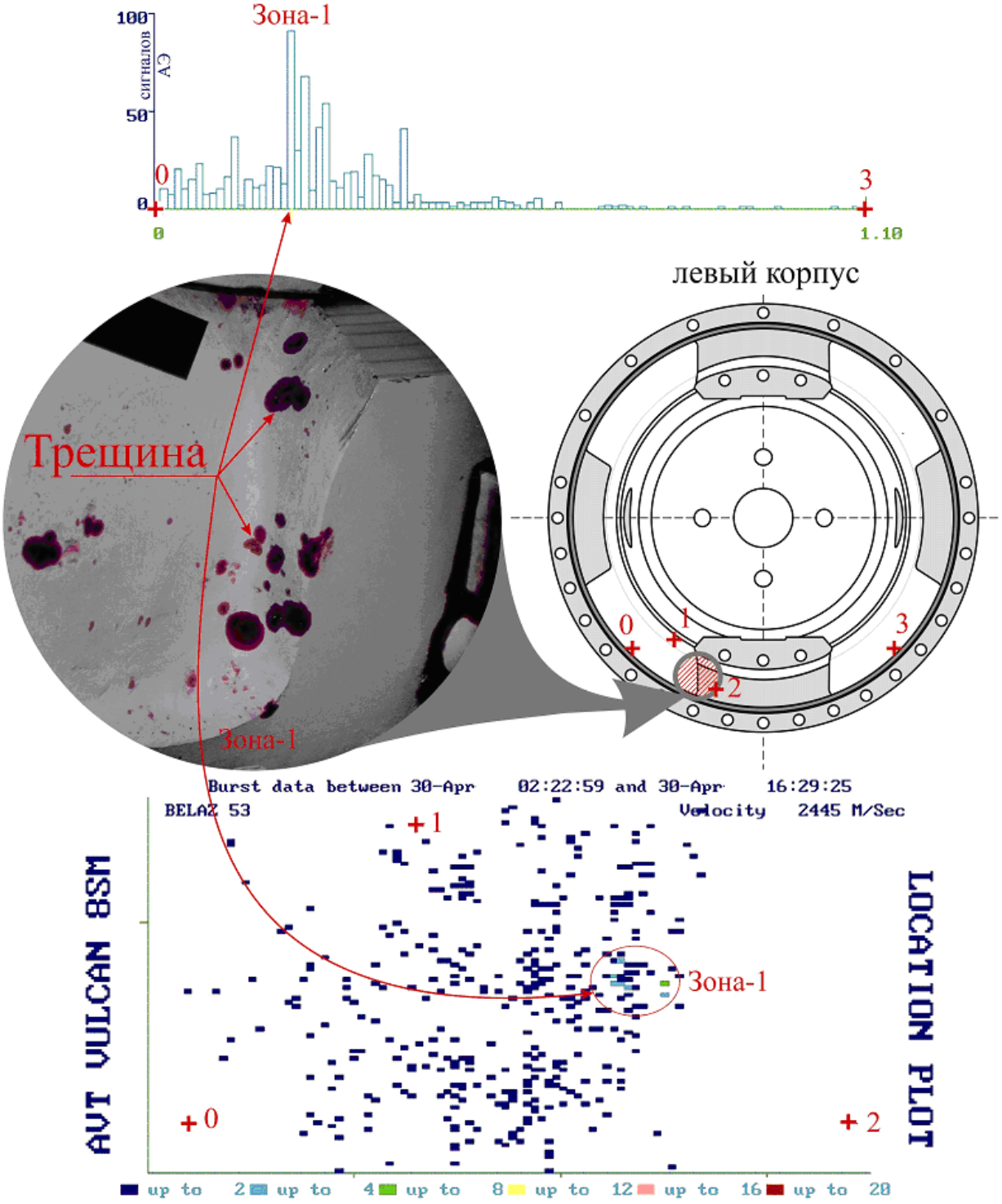


Рисунок 4 – Результаты АЭ диагностики левого корпуса РМК

Схема расположения зон повышенной активности сигналов АЭ.

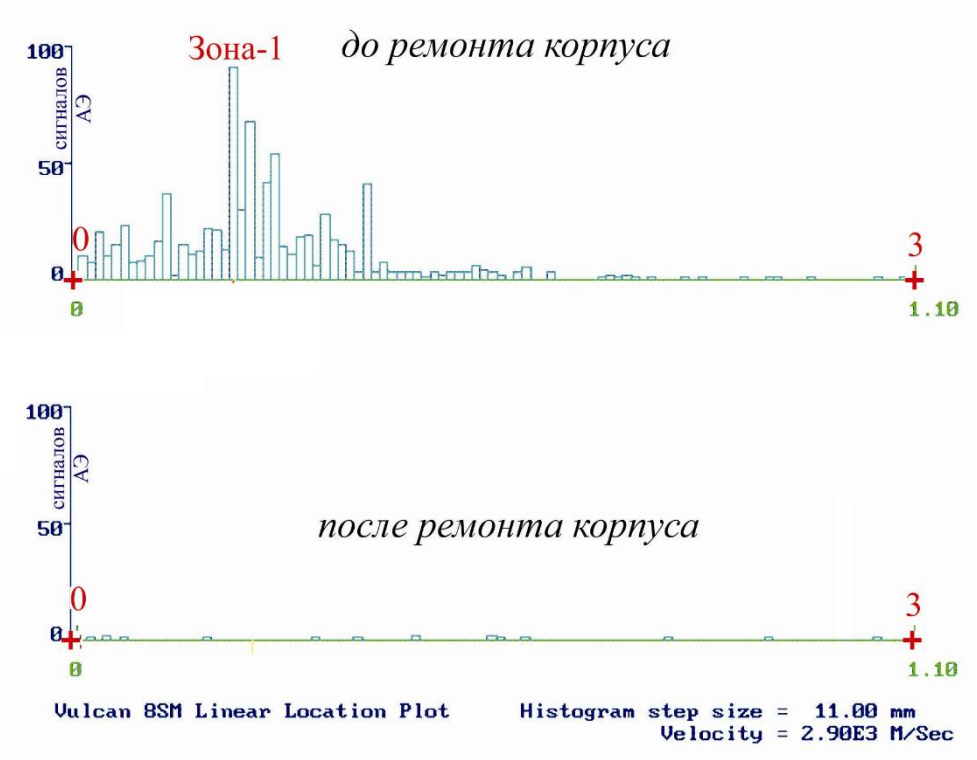


Рисунок 5 – Результаты повторного проверочного АЭ контроля

Обсуждение результатов и выводы

Результаты выполненной работы показывают, что обследования, проводимые с большими перерывами во времени, особенно в конце срока эксплуатации, не гарантируют безотказной работы техники, потому что трудно прогнозировать скорость развития дефектов на очередном временном интервале. Поэтому только внедрение системы мониторинга технического состояния с использованием АЭ-контроля является наиболее надежным и достоверным способом получения информации о фактическом состоянии объекта диагностирования [13-14].

Такой подход, кроме экономии времени, несёт ещё ряд преимуществ [15]:

– при организации передачи данных с системы АЭ-мониторинга на диспетчерский пункт, открывается возможность доступа к этой информации как у специалистов по диагностике, так и у персонала предприятия. Таким образом, будет организовано ежедневное обновление информации о техническом состоянии автосамосвала и планировать выполнение ремонтных работ, что позволит значительно повысить уровень безопасности при эксплуатации автосамосвалов;

– при объединении данных АЭ-мониторинга и спутниковой навигационной системы GPS, появляется возможность ежедневно отслеживать участки дорог, на которых происходит развитие дефектов, что позволит своевременно принимать меры по восстановлению нарушенных участков дорог и уменьшить повреждаемость несущих элементов металлоконструкций автосамосвала;

– при расширении системы мониторинга на весь парк автотранспорта предприятия появляется возможность объединить в единую базу данных информацию о техническом состоянии автосамосвалов, что, в свою очередь, может стать частью АСУ основными фондами Oracle с блоком TOPO для планирования сроков и объемов ремонтных работ.

Наряду со всеми вышеуказанными преимуществами у АЭ-мониторинга есть один существенный недостаток – это высокая стоимость оборудования.

Высокая цена оборудования объясняется использованием высокопроизводительных аналого-цифровых процессоров на каждом канале, а также тем, что АЭ-система – это узкоспециализированное оборудование, которое производят в относительно небольших объёмах.

В качестве компромиссного варианта предлагается разработать систему АЭ-мониторинга на основе универсальных плат аналогового ввода [16, 17]. Эти платы выпускаются относительно большими партиями, имеют низкую цену, но и значительно меньшие возможности для создания систем с параллельным сбором данных.

Однако они вполне пригодны для создания последовательных систем сбора данных при поочерёдном опросе небольших групп АЭ-каналов, что было реализовано в экспериментальном образце системы АЭ-мониторинга для оценки технического состояния металлоконструкций горной техники. В угольной отрасли есть и другие примеры успешного применения акустико-эмиссионного контроля, например, на шагающих экскаваторах [18-19], поэтому мы надеемся, что постепенно, АЭ мониторинг будет всё чаще применяться для диагностики динамического оборудования.

Список литературы

1. РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Утв. постановлением ГГТН РФ от 11.06.03 № 92.
2. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
3. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1980.
4. ГОСТ Р 55045-2012 Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения.
5. Быков С.П., Юрайдо Б.Ф., Иванов В.И. О достоверности акустико-эмиссионного контроля. Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 53-60.
6. Грешников В.А., Дробот Ю.И. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 270 с
7. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. М:. Изд-во стандартов. 1987.
8. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.:ил.
9. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Паньков А.Ф. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций, под редакцией Л. Н. Степановой. Москва, 2000
10. Pollock A. Material brittleness and the energetics of acoustic emission. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series
11. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro S.A. Fracture analysis by use of acoustic emission. Engineering Fracture Mechanics, 1968, V1, N1, pp.105-122
12. Pollock, A. A. Acoustic emission amplitude distribution / - International Advances in Nondestructive Testing, 1981,v.7.
13. Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Самохвалов А.Б., Курносов Д.А., Черниговский В.Ю., «АЭ как комплексный метод мониторинга объектов. Задачи и перспективы.», ООО «ДИАПАК», Москва, Россия, Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021), [Санкт-Петербург], сборник материалов.

14. Шемякин В.В., Стрижков С.А. Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2004. №4. С. 16-19

15. Иванов В. И. Актуальные проблемы АЭ диагностирования, НИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ, Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021), [Санкт-Петербург], сборник материалов.

16. https://www.lcard.ru/portfolio/acoustic_emission

17. https://www.lcard.ru/portfolio/a_e_method

18. Менчугин А. В. Оценка технического состояния несущих металлоконструкций шагающих экскаваторов по параметрам акустико-эмиссионного сигнала. / А. В. Менчугин, Б. Л. Герике, С. И. Протасов, П. В. Буянкин.// М. - Горное оборудование и электромеханика. - № 5. — 2009. — С. 25-30.

19. Менчугин, А. В. Особенности оценки шумов при проведении АЭ контроля стрел карьерных экскаваторов типа драглайн./А. В. Менчугин, С. И. Протасов.// М. - Безопасность труда в промышленности. - № 3. — 2009. — С. 48-51.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЕДИНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF UNIFIED DIAGNOSTIC CRITERIA FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF MINING MACHINES AND EQUIPMENT BY PARAMETERS OF MECHANICAL VIBRATIONS

Герике Павел Борисович[1],
Gerike P. B.,
Герике Борис Людвигович[1,2],
Gerike B. L.,

[1]Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
650065, Кемерово, пр. Ленинградский, 10
[2]Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
[1]The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
650065, Russia, Kemerovo, 10 Leningradskey Ave.,
[2]T.F. Gorbachyev Kuzbass State Technical University,
650000, Kemerovo, Vessenyaya str. 28
e-mail: gbl_42@mail.ru

Аннотация: В рамках решения задачи по обеспечению безопасной эксплуатации предельно изношенного оборудования карьерных экскаваторов была осуществлена разработка методики создания единого диагностического критерия. Показано, что подход, реализующий оптимальную скаляризацию результатов вибромониторинга, может быть использован при диагностике технического состояния подшипников качения, жесткости опорной системы, дефектов электрической природы, поршневых компрессоров и соединительных муфт. При диагностике дисбаланса, расцентровки валопроводов и зубчатых передач должен использоваться иной подход – на основе создания спектральных опорных масок. Рассмотрен пример формирования единого диагностического критерия, для которого использованы четыре единичных показателя – общий уровень несинхронных подшипниковых составляющих, вычисленный по спектру виброскорости, нормированный отфильтрованный общий уровень виброускорения, мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей, и высокочастотный эксцесс, – характеризующих техническое состояние анализируемых узлов. Разрабатываемые критерии позволят снизить требования к квалификации специалистов по вибродиагностике, уменьшить трудоемкость анализа вибрации и минимизировать вероятность возникновение ошибок I и II рода.

***Ключевые слова*:** карьерный экскаватор, механические колебания, мониторинг, техническое состояние, подшипники качения.

Abstract: In the framework of the set task on providing safety usage of the worn-out open-pit dump trucks' equipment the method for creating integrated diagnostic criterion has been worked out. It is demonstrated that the method, which fulfills absolute scalarization of the vibration monitoring results, can be applied while diagnosing technical condition of the rolling-contact bearings, support system stiffness, electric nature faults, reciprocal compressors, and joint sleeves. While defining misbalance, decentering of shaft assembly and toothed gearing another method should be used. It should be a method for creating reference spectral masks. The sample for forming integrated diagnostic criterion, which covers four single indicators, was studied. These four indicators that characterize technical condition of the tested assembly units are: general level of asynchronous bearing components calculated according to vibration velocity spectrum; standardized, filtered off general level of the vibration acceleration, similarity calculated according to the envelop curve spectrum, and high frequency kurtosis.

The worked out criteria allow decreasing the requirements to vibration diagnostic specialists, lessening vibration analysis labour intensity, and minimizing the probability of I-type and II-type error occurrence.

Key words: open-pit dump truck, mechanical vibration, monitoring, technical condition, rolling-element bearings.

Постановка задачи

Анализ результатов вибродиагностических обследований, полученных на выборке из тридцати карьерных экскаваторов, эксплуатируемых на угольных предприятиях Кузбасса (включая преобразовательные агрегаты, тяговые и подъемные лебедки, механизмы напора, подъема, поворота и компрессоры пневматических систем), позволил выявить наличие и оценить степень развития повреждений данного оборудования. Это позволило провести разделение исходных данных по группам в зависимости от фактического технического состояния оборудования и проверить на практике критерий разделяемости диагностической информации, а также подтвердить эффективность предложенного методологического подхода к созданию единых диагностических критериев.

Отсутствие нормативов на допустимые значения диагностических критериев и необходимость их комплексного использования затрудняют формализацию процедуры диагностики, при этом возникает дополнительная сложность, связанная с влиянием человеческого фактора, а именно – с квалификацией оператора-диагноста. Ключевыми факторами, определяющими достоверность анализа, служат накопленный опыт и знания специалиста, производящего диагностику. Особенности работы отдельных групп сложных механических систем, к которым относится энерго-механическое оборудование экскаваторов, не позволяют перенести этот опыт на другие объекты. Именно поэтому возникла необходимость создания группы единых диагностических критериев, способных выполнить автоматизированную оценку технического состояния сложных механических систем.

Разработка метода исследования

На основе анализа результатов обследований основных узлов и агрегатов карьерных экскаваторов был обоснован конкретный набор диагностических методологий, пригодный для создания единых критериев. Результаты выполненного детального анализа различных оценок фактического состояния энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов позволили выявить из большого числа (более 120) диагностических признаков и правил в области оценки параметров вибрации комбинации именно тех признаков, использование которых при расчете единых критериев будет наиболее оптимальным.

Рассмотренные ранее различные оценки [1–7] технического состояния основных агрегатов, установленных на карьерных экскаваторах, позволяют выделить в качестве основных следующие.

Для подшипников качения – четыре критерия оценки их состояния по параметрам вибрации:

– общий уровень несинхронных подшипниковых составляющих, вычисленный по спектру виброскорости;

– нормированный отфильтрованный общий уровень виброускорения;

– мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей;

– высокочастотный эксцесс.

Для выявления нарушения жесткости опорной системы – четыре критерия оценки состояния по параметрам вибрации:

– общий уровень активности гармонического ряда оборотной частоты (вплоть до её двенадцатой гармоники), вычисленный по спектру виброскорости для всех трех пространственных положений диагностируемого агрегата;

– нормированный уровень мощности боковых гармоник, вычисленный по спектру виброскорости (наличие в спектре комбинаторных модуляционных частот);

– мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей в области частот гармонических рядов нарушения жесткости;

– относительный уровень шума, измеренный по параметру виброскорости.

Для выявления дефектов электрической природы выделяются четыре критерия оценки состояния по параметрам вибрации электрических машин, используемых в конструкции карьерных экскаваторов:

– общий уровень активности гармонического ряда электрической частоты, вычисленный по спектру виброскорости для всех трех пространственных направлений вектора вибрации;

– наличие и вклад в общий уровень амплитуд боковых частот электромагнитной составляющей поля;

– мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей в области гармонических рядов пазовых частот;

– вклад в общий уровень сигнала составляющих на частотах, свидетельствующих о нарушении симметрии фаз, которое проявляется как последствие неравномерного распределения сопротивления обмоток по фазам и секциям якорных обмоток.

Для выявления специфических дефектов поршневых компрессоров, используемых на карьерных экскаваторах, можно выделить пять критериев оценки состояния оборудования по параметрам вибрации, регламентированных действующим стандартом [8]:

– оценку пикового значения амплитуд отдельных составляющих в спектре виброускорения (2…10000 Гц);

– оценку пикового значения амплитуд отдельных составляющих в спектре виброперемещения (2…200 Гц);

– оценку среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости в частотном диапазоне 2…1000 Гц;

– оценку СКЗ виброускорения в частотном диапазоне 2…3000 Гц;

– оценку СКЗ виброперемещения в частотном диапазоне 2…200 Гц.

В качестве единого диагностического критерия для выявления дисбаланса вращающихся деталей механизмов карьерных экскаваторов обосновано использование величины вклада в общий уровень виброакустического сигнала совокупности амплитуд виброскорости на первых пяти гармониках оборотной частоты, измеренных во всех трех пространственных плоскостях диагностируемого агрегата.

Результаты анализа существующих диагностических правил, используемых для расцентровки валопродов агрегатов карьерных экскаваторов, свидетельствуют о том, что в качестве единого диагностического критерия целесообразно использовать спектральные маски, полученные на основе статистической обработки результатов вибромониторинга.

Для распознавания дефектов зубчатых передач в составе редукторов электрических карьерных экскаваторов невозможно создать единый диагностический критерий из-за существования большого количества существующих признаков и правил при создании исходного кода для автоматизации постановки диагноза.

Один из наиболее эффективных подходов при формировании обобщенного критерия, т.е. при замене вектора диагностических признаков скалярной величиной – «оптимальная» скаляризация, предложенный Фишером [9] и развитый в трудах Герцбаха [10, 11].

Рассмотрим этот подход более подробно. Пусть существуют две группы объектов: А – «после монтажа» (в хорошем состоянии) и В – «предаварийные» (в крайне неудовлетворительном состоянии). Объекты каждой из групп характеризуются выборками $X_1^A, \dots, X_{NA}^A$ и $X_1^B, \dots, X_{NB}^B$, соответственно, где NA – количество объектов в группе А, а NB – количество объектов в группе В. Каждый вектор в выборке X_j^Z ($j = 1 \dots NZ$, $Z = A, B$) является n-мерным $X_j^Z = \left(X_{j1}^Z, \dots, X_{ji}^Z\right)$, где X_{ji}^Z – i-ый (i=1…n) диагностический критерий j-го объекта. Идея формирования «наилучшей» скаляризации базируется на замене вектора X_j^Z скаляром

$$r_j^z = \sum_i^n l_i X_{ji}^Z, \tag{1}$$

где коэффициенты выбираются некоторым «оптимальным образом» [9].

Наиболее наглядно процедуру определения «наилучшей» скаляризации можно представить, используя геометрическую интерпретацию. Замена вектора диагностических критериев X_j^Z скаляром r_j^z по формуле (1) эквивалентна проектированию каждого вектора X_j^Z на некоторую прямую с направляющим вектором $l = (l_1, \dots, l_n)$.

Фишер предложил выбирать направление l таким образом, чтобы отношение квадратов разностей, спроектированных на l средних значений, к сумме дисперсий спроектированных выборок было максимальным [9]. Предположим, что каждый вектор наблюдений заменен его проекцией на направление l

$$y_j^Z = l_1 X_{j1}^Z + \dots + l_n X_{jn}^Z. \tag{2}$$

В этом случае среднее значение спроектированной выборки равно

$$\bar{y}^Z = \sum_j^{N_z} \sum_k^n l_k \frac{X_{jk}^Z}{N_z} = l\bar{\mu}. \tag{3}$$

Здесь $\bar{\mu}$ – математическое ожидание. По формуле (3) могут быть рассчитаны математические ожидания для каждой группы векторов (А и В).

$$\bar{\mu}_A^i = \sum_m^{N_A} \frac{X_{mi}^A}{N_A}; \quad \bar{\mu}_B^i = \sum_m^{N_B} \frac{X_{mi}^B}{N_B}. \tag{4}$$

Дисперсия проекций обеих выборок

$$D = ll^T \left[\sum_{A,B} (N_z)^{-1} \sum_j^{N_z} \left(X_j^z - \bar{\mu}_z\right)\left(X_j^z - \bar{\mu}_z\right)^T\right] = ll^T (S_A + S_B). \tag{5}$$

Здесь S_A и S_B – суть оценки ковариационных матриц для групп А и В, знак ^{T} относится к транспонированной матрице

$$S_Z = \left\|V_{ij}^Z\right\|, \qquad V_{ij}^Z = N_Z^{-1} \sum_m^{N_Z} \left(X_{mi}^Z - \bar{\mu}_z^i\right)\left(X_{mj}^Z - \bar{\mu}_z^j\right), \qquad i, j = 1 \dots n, \tag{6}$$
$$Z = A, B$$

Таким образом, оптимальный вектор Фишера l максимизирует следующее выражение:

$$D^{\text{опт}} = \frac{[l(\bar{\mu}_A - \bar{\mu}_B)]^2}{ll^T(S_A - S_B)}. \quad (7)$$

Для квадратных матриц, определитель которых отличен от нуля,

$$l^T_{\text{опт}} = \frac{\bar{\mu}_A - \bar{\mu}_B}{S_A + S_B}. \quad (8)$$

Для того, чтобы определить, достаточно ли четко разделены группы А и В, может быть использован следующий полуэмпирический критерий [10]

$$|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2{,}5(S_A - S_B)\,. \quad (9)$$

Алгоритм формирования обобщенного критерия.

Для формирования единого диагностического критерия по множеству имеющихся диагностических признаков предлагается следующий алгоритм (рисунок 1).

На основании полученного множества диагностических признаков для двух групп объектов (A – в хорошем состоянии и B – в неудовлетворительном состоянии) $X_1^A, \ldots, X_{NA}^A$ и $X_1^B, \ldots, X_{NB}^B$ последовательно по формуле (3) рассчитываются соответственно математические ожидания $\bar{\mu}_A$ и $\bar{\mu}_B$, ковариационные матрицы S_A и S_B, матрица обратная их сумме $(S_A + S_B)^{-1}$ и оптимальный вектор Фишера l.

На основании этих данных по формуле (2) вычисляются одномерные выборки единых диагностических критериев y_j^A , y_j^B. Для оценки «разделяемости» групп А и В используется неравенство (9). Если неравенство справедливо, то признаки таковы, что группы А и В достаточно разделены, если нет, то необходимо изменить множества диагностических признаков.

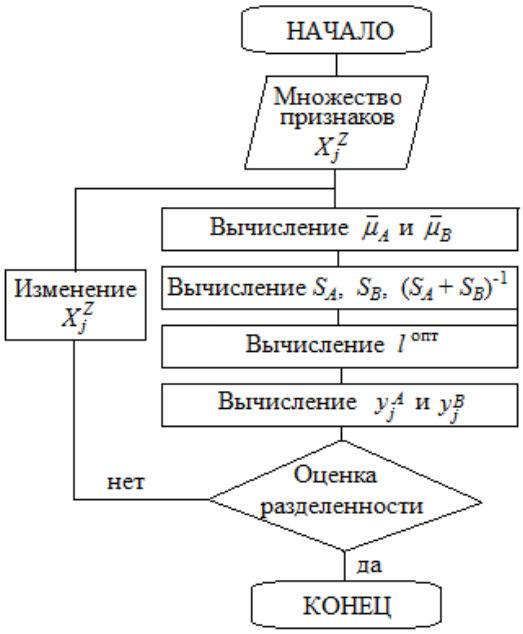


Рисунок 1 – Алгоритм формирования единого диагностического критерия

Пример вибродиагностики подшипников качения, используемых в различных агрегатов карьерных экскаваторов. В таблице 1 приведены результаты проведенных виброизмерений 29 подшипников различных агрегатов, входящих в механическое оборудование карьерных экскаваторов.

Выборки $X_1^A, \ldots X_4^A$ и $X_1^B, \ldots X_4^B$ характеризуют состояние подшипников каждой из групп.

Таблица 1 – Результаты вибрационной диагностики подшипников

№ п/п	Место измерения			Результаты виброобследования				Результаты дефектовки
	Агрегат	Точка Направление	Частота вращения	Спектр *V*	Спектр *a*	Спектр огибающей	Эксцесс	
1	Агрегат 1	3 Рад	750	0,41	0,45	20,9	11,79	Предельное
2		4 Рад	-	0,38	0,25	14,1	3,06	Норма
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	4,68	11,33	44,4	5,46	Норма
4		3 Рад	-	0,47	1,49	13,7	3,18	Норма
5		4 Рад	-	0,53	4,57	15,5	3,25	Норма
6	Агрегат 4	2 Рад	1000	0,97	10	119,5	18,49	Авария
7		3 Рад	-	1,95	2,78	23,1	6,08	Норма
8		4 Рад	-	2,43	4,81	25,0	3,48	Предельное
9	Агрегат 6	2 Рад	750	0,69	6,19	11,4	3,70	Предельное
10		3 Рад	-	0,44	0,97	13,2	3,08	Норма
11		4 Рад	-	0,55	0,33	55,1	3,00	Предельное
12	Агрегат 9	3 Рад	1000	5,33	2,77	17,2	5,48	Норма
13		4 Рад	-	2,91	5,57	10,8	6,27	Норма
14	Агрегат 12	1 Рад	1000	0,86	9,10	16,1	4,08	Предельное
15		2 Рад	-	0,67	4,70	17,2	3,19	Предельное
16		3 Рад	-	1,04	1,56	12,0	4,96	Норма
17		4 Рад	-	0,48	1,49	24,9	3,04	Норма
18	Агрегат 13	1 Рад	1000	1,07	42,88	52,8	3,94	Авария
19		2 Рад	-	0,54	15,20	14,9	3,32	Предельное
20		3 Рад	-	0,69	2,92	4,9	3,05	Предельное
21		4 Рад	-	0,93	3,85	4,6	3,00	Норма
22	Агрегат 14	1 Рад	1000	1,12	7,64	30,0	4,24	Предельное
23		2 Рад	-	0,60	21,88	22,5	3,59	Предельное
24		3 Рад	-	0,69	3,60	23,1	3,09	Норма
25		4 Рад	-	1,04	4,38	13,0	6,00	Авария
26	Агрегат 16	1 Рад	1500	1,05	6,43	10,3	3,1	Норма
27		2 Рад	-	1,43	40,97	7,01	3,29	Предельное
28		3 Рад	-	8,05	125,67	48,2	9,06	Авария
29		4 Рад	-	5,8	65,98	27,7	6,12	Авария

Тогда для групп A и B матрицы диагностических критериев можно представить в виде

$$X_{ij}^{A} = \begin{pmatrix} 0{,}38 & 0{,}25 & 14{,}1 & 3{,}06 \\ 0{,}47 & 1{,}49 & 13{,}7 & 3{,}18 \\ 0{,}44 & 0{,}97 & 13{,}2 & 3{,}08 \\ 0{,}48 & 1{,}49 & 24{,}9 & 3{,}04 \end{pmatrix} \text{ и } X_{ij}^{B} = \begin{pmatrix} 0{,}97 & 10{,}00 & 119{,}5 & 18{,}49 \\ 1{,}07 & 42{,}88 & 52{,}8 & 3{,}94 \\ 1{,}04 & 4{,}38 & 13{,}0 & 6{,}00 \\ 5{,}80 & 5{,}98 & 27{,}7 & 6{,}12 \end{pmatrix}.$$

По одномерным выборкам $\bar{y}_A$ и $\bar{y}_B$ необходимо проверить разделенность выделенных групп A и B, для чего воспользуемся критерием

$$|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2{,}5(S_A - S_B) = \frac{|\bar{y}_A - \bar{y}_B|}{S_A - S_B} = 3{,}21 > 2{,}5,$$

что свидетельствует о достоверности полученного результата.

Результаты визуально-измерительного контроля дефектных подшипников качения (рисунок 2 [12]), выбракованных с использованием единого диагностического критерия, убедительно доказывают достоверность результатов диагностики.

Рисунок 2 – Выявленный дефект подшипника качения

Заключение

Обширный статистический материал, собранный на протяжении 10-летнего наблюдения за работой карьерных экскаваторов, позволил с высокой доверительной вероятностью (P≥0,95) обосновать единый диагностический критерий оценки технического состояния подшипников качения по параметрам механических колебаний и разработать алгоритм ее реализации, который позволит снизить требования к квалификации специалистов по вибродиагностике, уменьшить трудоемкость анализа вибрации и минимизировать вероятность возникновение ошибок I и II рода.

Список литературы

1. Мониторинг технического состояния экскаваторного парка разрезов ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» [Текст]./ В.В. Билибин, Б.П. Демьянов, Б.Л. Герике и [др.]// Безопасность труда в промышленности, №4. – 2005. – С. 22-25.
2. Герике Б.Л., Сушко А.Е., Герике П.Б. Внедрение цифровых технологий в области диагностики, обслуживания и ремонта горных машин и оборудования [Текст].// Техника и технология горного дела. 2018. № 3. – С. 19-28.
3. Герике Б.Л., Клишин В.И., Мокрушев А.А. Об одной оценке технического состояния опорных узлов горных машин.//ФТПРПИ, № 6. – 2019. – С. 106-114.
4. Предложения по внедрению на предприятии концепции технического обслуживания и ремонта горнотранспортной техники и оборудования./ И.М. Щадов, В.Ю. Конюхов, А.В. Чемезов и др.// ГИАБ – № 12. – 2015. – С. 134-143.
5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга [Текст]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 459 с.
6. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Седуш В.Я. Техническое диагностирование механического оборудования [Текст]. – Донецк. Юго-Восток, 2009. – 459 с.
7. Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems [Text]. // Management and Production Engineering Review. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 37–49.
8. ГОСТ 30938-2002. Компрессорное оборудование. Определение вибрационных характеристик малых и средних поршневых компрессоров и нормы вибрации. М.: Стандартинформ, 2002. – 14 с. Актуализирован 01.01.2021.
9. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. М.: Госстатиздат, 1958. – 267 с.

10. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: Монография / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 263 с.

11. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam – New York – Oxford, 1977.

12. Герике Б.Л., Мокрушев А.А. Программный комплекс для выявления дефектов подшипников качения в опорных узлах горных машин. // Подземная угледобыча XXI век-1: ГИАБ (научно-технический журнал). В 2-х томах. – № 11 (специальный выпуск 48). Т. 2. 2018. – С. 381-386.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТРЕСС-ИСПЫТАНИЙ

EVALUATION OF THE RESIDUAL LIFE OF STRUCTURAL STEEL'S PIPELINES DURING STRESS TESTING

Ожиганов Евгений Анатольевич[1]
Ozhiganov E. A.

[1]ООО «Кузбасский центр сварки и контроля»,
650040, Россия, Кемерово, ул. Радищева, 1Б
[1]OOO Kuzbass Centre for Welding and Quality Control,
650055, Russia, Kemerovo, Radishev str., 1B
e-mail: zhigan84@mail.ru

Аннотация: *Предложена методика определения остаточного ресурса трубопроводов после проведения стресс-испытаний, по фактору потери запаса прочности, с использованием критерия предельной деформации.*

Ключевые слова: *акустическая эмиссия, деформация, конструкционная сталь, запас прочности, остаточный ресурс, стресс-испытания.*

Abstract: A method for determining the residual life of pipelines after stress-testing, based on the factor of loss of safety margin, using the criterion of ultimate deformation is proposed.

Key words: acoustic emission, deformation, structural steel, margin of safety, residual life, stress-tests.

Введение

Надёжность и долговечность трубопроводов, работающего под давлением, напрямую зависит от своевременности и качества проведения работ по оценке их технического состояния. Для оценки прочности и герметичности, действующая нормативная документация предусматривает не только стандартные испытания избыточным давлением (1,15÷1,25 от рабочего), но и стресс-испытания повышенным давлением (до 1,1 от предела текучести материала) [1, 2]. В процессе стресс-испытаний трубопроводов должно происходить снижение локальных остаточных напряжений и деформаций, возникших при производстве и монтаже, локализация дефектов. Особую практическую значимость имеет разработка методики оценки остаточного ресурса при проведении стресс-испытаний для повышения надёжности трубопроводов, находящихся в длительной эксплуатации.

Теория

В работах [3, 4] приводится анализ влияния степени пластической деформации конструкционных сталей Ст3сп (ГОСТ 380-2005), 10, 20 (ГОСТ 1050-2013), 09Г2С, 17ГС (ГОСТ 19282-2014) на параметры сигнала акустической эмиссии, на основании которого разработан критерий предельной деформации при проведении стресс-испытании. Достижение уровня A критерия указывает на переход от упругих деформаций к пластическим, то есть соответствует напряжению фактического предела текучести $\sigma_т$, для которого справедливо выражение:

$$\begin{cases} N'(\varepsilon) > 0 \\ N''(\varepsilon) < 0 \\ \bar{U}'(\varepsilon) < 0 \\ \frac{\dot{N}_{\Sigma i+1}}{\dot{N}_{\Sigma i}} \leq 1 \\ \varepsilon > 0 \\ \dot{\varepsilon} = const > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где [5, 6], N – суммарный счет импульсов АЭ, имп.;

$\dot{N}_{\Sigma}$ – активность акустической эмиссии, имп.$^{-1}$;

$\bar{U}$ – средняя квадратическая амплитуда АЭ сигнала, дБ;

ε – степень пластической деформации;

$\dot{\varepsilon} = \varepsilon'(t)$ – скорость деформации, с$^{-1}$.

Практическим применением критерия предельной деформации [3, 4], для находящегося в длительной эксплуатации трубопровода, является определение фактического запаса прочности по пределу текучести.

В общем случае, при расчете на прочность допускаемые напряжения $[\sigma]$ трубопровода определяются отношением нормативного предела текучести $\sigma_{0,2}$ к коэффициенту запаса прочности $n_т$ [7]:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}}{n_т}, \quad (2)$$

где $n_т$ = 1,1÷2,2 – нормативный коэффициент запаса прочности по пределу текучести, назначается при проектировании в зависимости от марки стали и условий эксплуатации трубопровода [8, 9].

Преобразовав формулу 2, находим значение фактического запаса прочности $n_т^ф$:

$$n_т^ф = n_т \frac{\sigma_{Ak}}{\sigma_{0,2}}, \quad (3)$$

где σ_{Ak} – нагрузка, соответствующая уровню A критерия предельной деформации, фактический передел текучести, МПа.

После определения фактического запаса прочности, можно вычислить остаточный ресурс трубопровода $T_{ост}$. В общем виде остаточный ресурс трубопровода по запасу прочности будет определяться как частное разности фактического и предельного коэффициентов запаса прочности к скорости потери запаса прочности, за минусом периода эксплуатации:

$$T_{ост} = \frac{n_т^ф - [n_т]}{V_n} - t_{экс}, \quad (4)$$

где $[n_т]$ – предельное минимально допустимое значение запаса прочности, 1;

V_n – скорость потери запаса прочности, лет$^{-1}$;

$t_{экс}$ – период эксплуатации трубопровода, лет.

Скорость потери запаса прочности определяется как частное разности нормативного и фактического коэффициентов запаса прочности, взятой по модулю, к периоду эксплуатации трубопровода:

$$V_n = \frac{\left|n_т - n_т^ф\right|}{t_{экс}}. \quad (5)$$

Подставив в формулу 4 значения $n_т$, $n_т^ф$ и V_n из формул 2, 3 и 5, соответственно, и преобразовав её, находим формулу определения остаточного ресурса трубопровода:

$$T_{ост} = t_{экс}\left(\frac{\sigma_{Ak} - [\sigma]}{|\sigma_{0,2} - \sigma_{Ak}|} - 1\right). \quad (6)$$

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 изображена зависимость остаточного ресурса от фактического передела текучести σ_{Ak}, для стали 20 с нормативным проектным запасом прочности $n_т$ = 1,1.

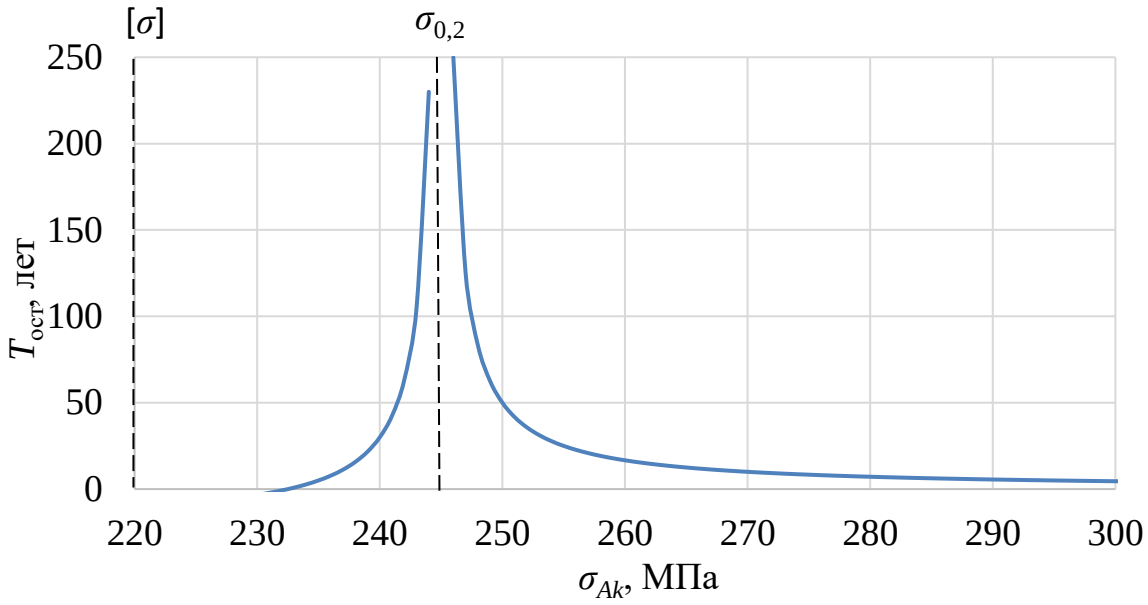


Рисунок 1 – Зависимость остаточного ресурса от фактического предела текучести σ_{Ak}, для стали марки 20 с нормативным проектным запасом прочности $n_т$ = 1,1

Отрицательное значение остаточного ресурса указывает на снижение запаса прочности ниже предельного минимального. В этом случае трубопровод выводится из эксплуатации, либо проводится капитальный ремонт, либо, после расчетов на прочность, принимается решение о снижении рабочего давления.

Значение остаточного ресурса близкое к бесконечному (рисунок 1) указывает на отсутствие снижения запаса прочности. В этом случае трубопровод продолжает эксплуатироваться на рабочих параметрах на период до следующих стресс-испытаний (технического диагностирования или экспертизы промышленной безопасности) согласно действующей НД.

Ограничением применения формулы 6 для расчета остаточного ресурса на практике является то, что в реальных условиях при стресс-испытаниях достаточно трудно адекватно измерить механические напряжения металла стенки трубопровода без использования тензометрии или иных других регламентированных способов. Также применение данной формулы, возможно лишь для трубопроводов с известными проектными (паспортными) характеристиками (механические свойства стали, допускаемое напряжение, дата ввода в эксплуатацию).

Возможная замена механических напряжений металла трубопровода на соответствующее давление среды, в формуле 6, потребует введения дополнительных термодинамических коэффициентов и коэффициентов сжатия среды.

Выводы

Установлены зависимости между нагрузкой, соответствующей уровню *A* критерия предельной деформации, и фактическим запасом прочности. Разработан способ оценки

остаточного ресурса длительно работающего трубопровода по фактору потери запаса прочности (по текучести), при проведении стресс-испытаний.

Список литературы

1. СП 411.1325800.2018. Трубопроводы магистральные и промысловые для нефти и газа. Испытания перед сдачей построенных объектов.
2. ВН 39-1.9-004-98. Инструкция по проведению гидравлических испытаний трубопроводов повышенным давлением (методом стресс-теста).
3. Ожиганов, Е.А. Акустическое отображение стадийности процесса деформации конструкционной стали 09Г2С / Е.А. Ожиганов, С.В. Коновалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 43-48.
4. Ожиганов, Е.А. Критерий предельной деформации при стресс-испытаниях трубопроводов из конструкционных сталей / Е.А. Ожиганов, С.В. Коновалов, А.Н. Смирнов // Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2021. – С. 27-28.
5. ГОСТ Р ИСО 12716-2009. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия. Словарь.
6. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 томах / под ред. В.В. Клюева. – Т. 7. – М.: Машиностроение, 2006. 829 с.
7. Черепанов, А.П. Анализ преимуществ и недостатков современных методов прогнозирования ресурса технических устройств / А.П. Черепанов // Вестник АнГТУ. – 2019. - №13. – С. 90-101.
8. Хисматулин, Е.Р. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / Е.Р. Хисматулин, Е.М. Королев, В.И. Лившиц и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
9. ГОСТ 32388-2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ НАПЛАВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTIC OF THE SURFACE LAYER OF SPECIMENS AFTER SURFACE AND MECHANICAL TREATMENT

Абабков Николай Викторович[1,2,3]
Ababkov N.V.
Пимонов Максим Владимирович[1,2,3]
Pimonov M.V.
Левашова Елена Евгеньевна[2,3]
Levashova E.E.

[1]Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
650065, Кемерово, пр-т Советский, 18
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28
[1]ООО «Кузбасский центр сварки и контроля»,
650040, Россия, Кемерово, ул. Радищева, 1Б
[1]The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS,
650065, Russia, Kemerovo, Sovetskiy Ave., 18
[2] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
650000, Russia, Kemerovo, Vesennyaya Str., 28
[3]OOO Kuzbass Centre for Welding and Quality Control,
650055, Russia, Kemerovo, Radishev str., 1B
e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Аннотация: *В публикации представлены результаты исследования микроструктуры, твердости и акустических характеристик наплавленного слоя металла после механической обработки резанием по различным режимам. Выявлено, что увеличение толщины срезаемого слоя приводит возрастанию размера зерна в поверхностном слое, а это отрицательно сказывается на механических характеристиках, таких как предел текучести и твердость. Показаны зависимости показателей неразрушающего контроля, толщины срезаемого слоя и предела текучести материала.*

Ключевые слова: *механическая обработка, конструкционная сталь, механические свойства, микроструктура, твердость, акустические характеристики.*

Abstract: The publication presents the results of a study of the microstructure, hardness and acoustic characteristics of the deposited metal layer after machining by cutting in various modes. It was found that an increase in the thickness of the cut layer leads to an increase in the grain size in the surface layer, and this has a negative effect on mechanical characteristics, such as yield strength and hardness. The dependences of non-destructive testing indicators, the thickness of the cut layer and the yield strength of the material are shown.

Key words: machining, structural steel, mechanical properties, microstructure, hardness, acoustic characteristics.

Введение

В настоящее время одним из актуальных вопросов машиностроения является продление срока службы узлов различных механизмов и агрегатов. Основными способами повышение долговечности и надежности изделий является применение упрочняющих технологий (поверхностное пластическое деформирование, наплавка слоёв с особыми свойствами, химико-термическая обработка) при их изготовлении. Однако в связи с всё большим распространением техники иностранного производства на предприятиях горнодобывающей, энергетической и металлургической промышленности, оказать влияние на ресурс поставляемых деталей практически невозможно. Выходы из строя различных деталей механизмов приводят к простоям оборудования и существенным материальным потерям для предприятия, а в связи с нестабильной экономической ситуацией и вводимыми санкциями наиболее перспективным представляется реновация изношенных деталей.

Реновация деталей позволяет сократить:

- издержки предприятия при закупке, за счёт экономии на отсутствии полного цикла изготовления детали.
- срок простоя машин и агрегатов, за счёт уменьшения времени доставки новых деталей;
- увеличить срок службы деталей машин и узлов агрегатов, так как возможно создать поверхностный слой металла с большим спектром требуемых характеристик[1, 2].

Реновация деталей заключается в восстановлении поверхности различными способами наплавки и дальнейшей её обработке до требуемых размеров. Методы восстановления поверхности должны быть: максимально универсальными, обеспечивать заданный ресурс и технические характеристики получаемой детали, иметь высокую производительность и технологическую воспроизводимость при минимальной сложности оборудования, отвечать экологическим требованиям современного производства.

Дальнейшая механическая обработка поверхностного слоя сопровождается пластическим деформированием со структурными изменениями в металле поверхностного слоя. В микроструктуре резко возрастает число дислокаций, вакансий и др. Упругопластическое деформирование в процессе механической обработки изменяет структурно чувствительные физико-механические характеристики металла поверхностного слоя по сравнению с исходным его состоянием. В деформированном поверхностном слое возрастают предел упругости, текучести, прочности, усталости. Снижаются характеристики пластичности, а именно, относительное удлинение и сужение, повышаются твердость, хрупкость [3].

Базируясь на вышеизложенном, актуальным направлением является изучение влияния механической обработки наплавленного слоя на свойства и структуру материала.

Материалы и экспериментальные процедуры

Основой для наплавки принята конструкционная низколегированная сталь 09Г2С. На образцы производилась наплавка плавящимся электродом в защитном газе, режимы наплавки - сварочный ток 320 А, напряжение 23 В, скорость 18-25 м/ч, проволока Св-08Г2С диаметром 1,6 мм. Механическая обработка после наплавки выполнена на фрезерном станке ФУ-321, в соответствии с режимами обработки, приведёнными в таблице 1.

Для исследования размеров и формы кристаллов, наличия различных по своей форме кристаллов, их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и микропустот наплавленных слоев применялся металлографический микроскоп Метам РВ-21-2 [4]. Измерения твердости по методу Виккерса проводились на универсальном твердомере Duravision-30.

Таблица 1 – Режимы обработки фрезерованием

	№ 1 «черновая»	№ 2 «получистовая»	№ 3 «чистовая»
Толщина заготовки, мм	10	10	10
Глубина резания t, мм	0,5	1	2
Подача, s, мм/об	0,32	0,4	0,32
Кол-во оборотов, n, об/ мин	640	780	520
Скорость резания V, м/мин	70,2	99,3	136,2

На образцах проводились также испытания неразрушающими методами: спектрально-акустический (измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» [5]). При этом определялись такие характеристики, как время задержки и скорость поверхностных акустических волн, коэффициент затухания, размах амплитуды принятого сигнала.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения акустических характеристик, полученные при исследовании образца №1 приняты за базовые показатели восстановленного слоя, так как образец минимально подвергнут механической обработке, однако пригоден для дальнейшего использования. Поэтому сравнивание производим с результатами именно этого образца.

Для образца №2, обработанного фрезерованием слоя в 1 мм, характерны более высокие значения времени задержки поверхностной акустической волны и коэффициента затухания, значения амплитуды принятого импульса волны Релея меньше. Стабильность значений акустических характеристик свидетельствует об отсутствии в металле дефектов [3, 6–13]. Однако их различие для образцов №1 и 2 говорит о том, что в структуре металла этих образцов имеются различия.

Для образца №3, наблюдается увеличение времени задержки волны Релея по сравнению с образцом №1 – на 25 нс, что может объясняться накоплением деформаций поверхностным слоем в ходе обработки. полученные результаты исследований хорошо соотносятся с результатами полученными в работах [12, 13] и подтверждают, что наибольшее влияние на время задержки акустического сигнала оказывает интенсивность деформации вносимое силами резания.

По результатам измерений был построен графики зависимости времени задержки волн Релея по поверхности от толщины срезаемого слоя (рисунок 1).

Таким образом, спектрально-акустический метод контроля может применяться при контроле наплавки после механической обработки.

Результаты исследования твердости (рисунок 2), что неоднозначную зависимость от толщины срезаемого слоя. При фрезеровании на глубину 1 мм (образец №2), твердость металла выше, чем для образцов №1 и №2. Данный эффект может быть объяснён оптимальным сочетанием режимов обработки, в свою очередь более низкие значения твердости для образца №1 могут являться следствием недостаточной пластической деформации при фрезеровании и недостаточным накоплением поверхностным слоем остаточно пластической деформации, значительное снижение твердости для образца №3 может свидетельствовать о значительной интенсивности пластической деформации и значительных температурно-силовых воздействиях на поверхностный слой.

Исследование микроструктуры механически обработанного наплавленного слоя из низколегированной сварочной проволоки Св-08Г2С позволяет получить представление о механических свойствах материала. Результаты исследования помогут подобрать оптимальные режимы механической обработки. Основной металл низколегированной стали

09Г2С имеет феррито-перлитную микроструктуру, полосчатую, мелкозернистую, с баллом зерна 9–10, перлит пластинчатый (рис. 3, а).

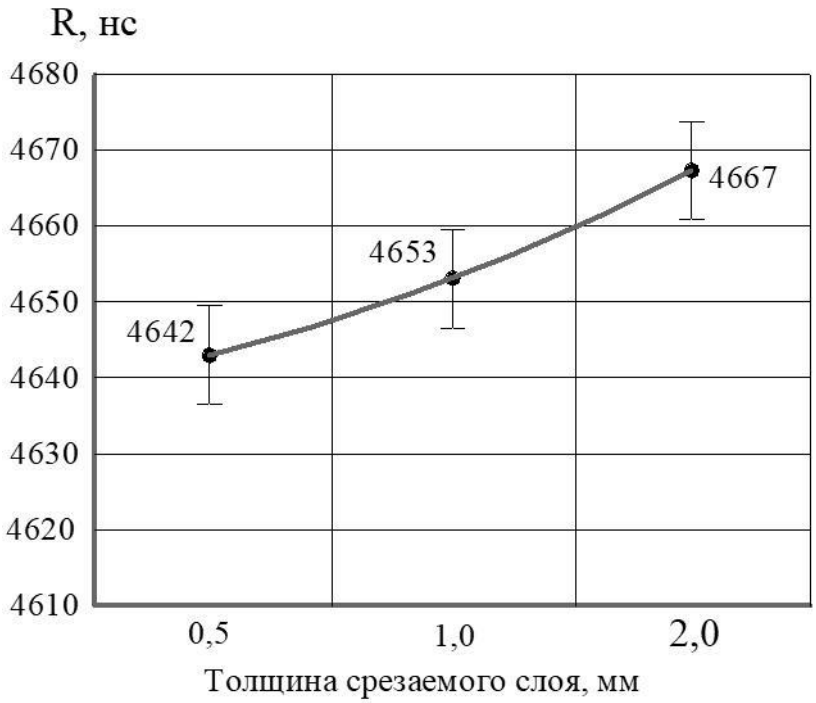


Рисунок 1 – График зависимости времени задержки волн Релея от толщины срезанного слоя

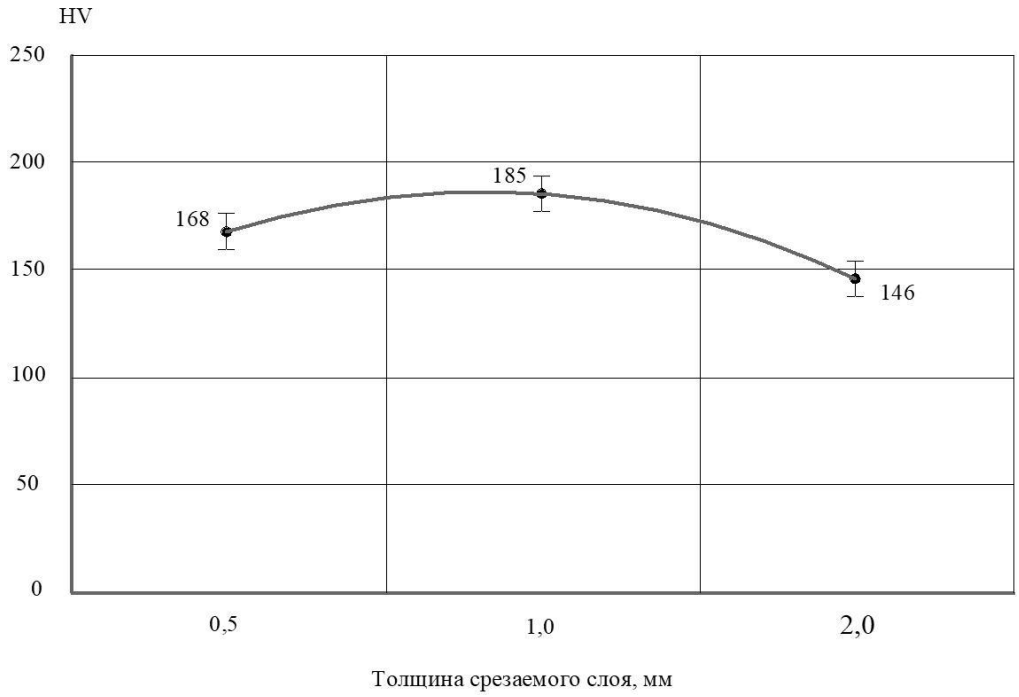
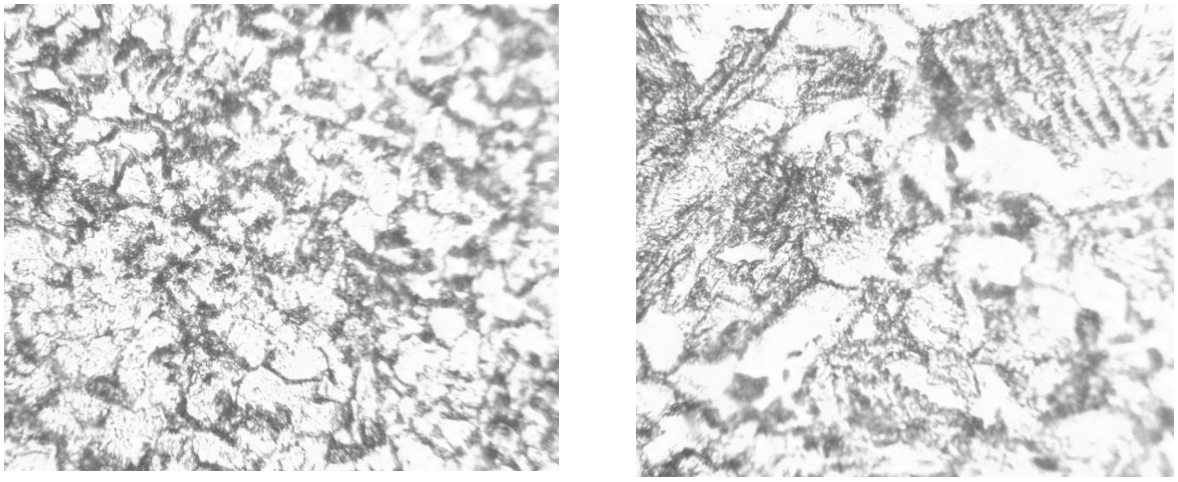


Рисунок 2 – График зависимости среднего значения твердости от толщины срезанного слоя наплавленного металла

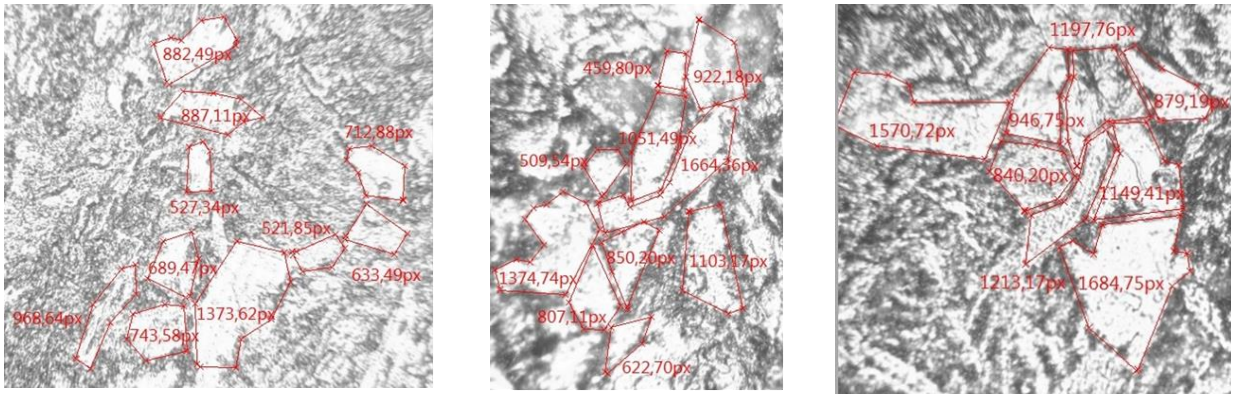


а) б)

Рисунок 3 – Микроструктура низколегированной стали 09Г2С, ×1000:
а – основной металл; б – зона сплавления наплавленного и основного металла

Зона сплавления наплавленного низколегированной сварочной проволокой Св-08Г2С и основного металла 09Г2С имеет крупнозернистое зерно с ферритной оторочкой с мелко-игольчатым образованием внутри зерна (рис.3, б).

Для исследования механических свойств наплавленного слоя после фрезеровки был измерена величина зерен. На рис. 4, а – в показаны результаты измерений величины зерна на каждом образце.



а) б) в)

Рисунок 4 – Результаты измерений величины зерна:
а – на образце №1; б – на образце №2; в – на образце №3

Для оценки влияния величины зерна на предел текучести ($\sigma_т$) и твердости (HV) материалов применяется соотношение Холла-Петча [14].

$$\sigma_T(HV) = \sigma_0(H_0) + \frac{k}{\sqrt{D}},$$

где $\sigma_т$ – предел текучести, HV – твердость материала, σ_0 – внутренне напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна, k – коэффициент пропорциональности, D – размер зерна. Результаты измерения размеров зерен и вычисления предела текучести приведены в таблице 2. По полученным результатам построен график зависимости предела текучести от времени задержки акустического сигнала

Таблица 2 – Размер зерен и значения предела текучести

№ образца	Средний размер зерна, мкм	Предел текучести наплавленного металла, МПа
1	5,94	442
2	6,72	430
3	7,67	416

Таким образом установлено, что с увеличением глубины и скорости резания происходит рост зерна, что негативно сказывается на механических свойствах материала таких как твердость и предел текучести. Так же выявлена связь времени задержки акустического сигнала с пределом текучести наплавленного слоя подвергнутого механической обработке.

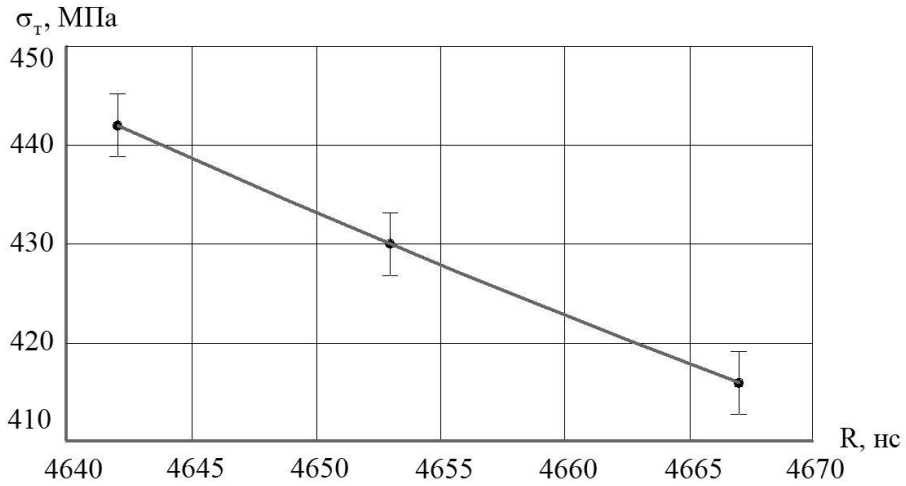


Рисунок 5 – График зависимости значения предела текучести наплавленного металла от времени задержки акустического сигнала

Выводы

Выполнены исследования металла фрагментов образцов неразрушающими методами контроля. В результате которых установлено, что толщина срезаемого слоя имеет линейную зависимость с временем задержки волн Релея, средняя амплитуда находится в пределах погрешности.

При исследовании микроструктуры было выявлено, что с увеличением глубины и скорости резания происходит увеличение размера зерна, что негативно сказывается на механических свойства материала, таких как твердость и предел текучести. Показана связь предела текучести наплавленного слоя после механической обработки и временем задержки акустической волны.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, соглашение № 22-29-20192.

Список литературы

1. Коротков, В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. - Челябинск: Металл, 1993. - 144 с.

2. Лахтин, Ю. М., Леонтьева, В. П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

3. Смирнов, А. Н. Градиентные структуры при обработке металлов резанием / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов и др. - Кемерово: ООО «Сибирская издательская группа», 2013. - 179 с.

4. Смирнов, А. Н. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н. В. Абабков и др. // Вестник КузГТУ. – 2010. – №4. – С.62–68.

5. Абабков, Н. В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. - № 5. - С. 101-106.

6. Смирнов, А.Н. Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений/ А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. 2016. – № 3. – С. 25–28.

7. Смирнов, А. Н. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, А. С. Глинка и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №10. – С. 40–45.

8. Иванов, Ю. Ф. Объемная и поверхностная закалка конструкционной стали – морфологический анализ структуры / Ю. Ф. Иванов, Э. В. Козлов // Изв. вузов. Физика. – 2002. – №3. – С.5-23.

9. Влияние способа упрочнения поверхности деталей на акустические характеристики / Е. Е. Левашова, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов // Инновации в машиностроении. Сборник трудов X Международной научно-практической конференция. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. 2019. С. 603-606.

10. Механические и акустические характеристики наплавленного и основного металла деталей машин карьерного транспорта / А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, Е. Е. Левашова, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов // В сборнике: Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс. сборник научных трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А. Н. Смирнова. Кемерово, 2017. С. 88-103.

11. Исследование структуры поверхностного слоя стали 40Х после черновой и получистовой механической обработки резанием / М. В. Пимонов, Д. А. Романов, Х. Чен // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 2. С. 102-112.

12. Структура поверхностного слоя стали 40Х после финишных этапов механической обработки резанием / М. В. Пимонов, Д. А. Романов, Х. Чен // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 4. С. 17-30.

13. Исследование влияния режимов механической обработки на параметры структурно-фазового состояния поверхностного слоя с применением аппарата механики технологического наследования / Пимонов М.В. // В книге: Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Сборник тезисов XV Международной школы-семинара. 2018. С. 44-45.

14. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. - М.: Машиностроение, 1979. - 191 с. с.

СЕКЦИЯ 4
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЭК

SECTION 4
IMPROVEMENT OF EDUCATION IN THE FIELD OF TRAINING FOR ENERGY COMPANIES

ОБРАЗОВАНИЕ ДОЛЖНО БЫТЬ ПРОГНОСТИЧЕСКИМ

EDUCATION SHOULD BE PREVIOUS

Стерлигов Владислав Викторович[1]
Sterligov V.V.
Михайличенко Татьяна Алексеевна[1]
Mikhailichenko T.A.

[1]Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42
[1]Siberian State Industrial University,
654007, Russia, Kemerovo region, Novokuznetsk, st. Kirova, 42
e-mail: archimih@mail.ru

Аннотация: *в статье дается трактовка процесса обучения как части образования и воспитания человека будущего, что является важнейшей задачей высшей школы. Образование должно быть прогностическим.*

Ключевые слова: *образование, социальная миссия, образовательное пространство, стратегия развития, системный подход, синергетика.*

Abstract: Various aspects of the problems of higher education are considered. Based on the analysis of lexical and legal definitions, it is proved that education is a special mission of the state to realize the rights of citizens. The system approach allows us to define education as an open system with all the features that lead to moments of synergy. Since education is aimed at the activities of graduates in the future, it should also be aimed at the future, it should be predictive, which requires the integration of Universities and enterprises, the organization of the entire system of higher education on the basis of management theory.

Key words: education, social mission, educational space, development strategy, system approach, synergetics.

Нестабильность современного общества во многом обусловлена состоянием энергетики – распределением ресурсов, их использованием и обеспеченностью. Уже одно это определяет важность энергетики в жизни людей, а также роль тех людей, которые вовлечены в эту сферу деятельности. В связи с этим особое внимание следует проявлять к воспитанию специалистов-энергетиков, не умаляя при этом значение других специалистов.

Строгая методика ведения дискуссии как способа установления истины требует в самом начале определения предмета обсуждения с позиции семантики, поэтому следует обращаться прежде всего к дефинициям понятия «образование».

Несмотря на то, что дается определение объективно существующему явлению, в зависимости от условий обсуждения, контекста диалога существуют различные определения образования. Так, великий советский филолог С.И. Ожегов [1] дает такое определение: «Образование – это обучение, просвещение», что вполне достаточно для нормативной лексикографии, регулирующей правильное употребление слов среди прочих требований к языку. Советский энциклопедический словарь [2] дает следующее определение: «Образование – процесс и результат усвоения систематизированных знаний, при этом основной путь получения образования – обучение в учебных заведениях, где оно тесно связано с воспитанием».

Второе определение является уже более приближенным к тому понятию, которое рассматривается в законе «Об образовании в Российской Федерации»[3] : «Образование - единый целенаправленный процесс воспитания и обучения, являющийся общественно значимым благом и осуществляемый в интересах человека, семьи, общества и государства, а также совокупность приобретаемых знаний, умений, навыков, ценностных установок, опыта деятельности и компетенций определенных объема и сложности в целях удовлетворения образовательных потребностей и интересов человека». Конечная часть этого определения есть реализация прав гражданина и человека, декларируемая в Конституции РФ. А поскольку выполнение положений Конституции есть основная задача государства, то можно заявить, что образование есть социальная миссия государства, для выполнения которой необходима система, определяемая в статье 10 закона [3]. Придя к термину «система», необходимо ввести самое общее его определение, которое следует из основ теории управления: «Система – это совокупность различных элементов, взаимодействие которых позволяет достичь заданных целей». Для циклических или непрерывных процессов можно говорить о реализации некоторой функции, например, получение работы, продукции и т.д.

При использовании системного подхода необходимо помнить, что любая система может рассматриваться как часть более общей системы, в которой она существует как подсистема (подмножество более обширного множества). Таким образом, необходимо признать, что система высшего образования является частью (подсистемой) общей системы образования.

В нашем представлении самая простая схема системы образования может быть представлена как триада «учитель-ученик-государство». Названия чисто условные и определяются, прежде всего, ролью каждого элемента. Особенность этой триады (системы) в том, что каждый элемент является, прежде всего, субъектом по отношению к двум другим, которые для него являются объектом воздействия. Учитель, производя начальные действия и являясь по отношению к ученику субъектом, становится объектом по отношению к ученику (субъекту), который приносит ему курсовую работу с элементами инноваций. Тот же учитель - объект по отношению к государству, которое как субъект устанавливает привила работы через программы и учебные планы и платит ему зарплату. Но государство выполняет пассивную роль объекта, получив авторскую программу от учителя, и т.д.

Помимо прямого воздействия элементы системы еще общаются опосредованно через среду. Среда – это совокупность условий и обстоятельств, в которых осуществляется взаимодействие элементов. Она может включать социальные, национальны, региональные, технические, традиционные и другие признаки. Известна схема представления под термином «среда» государства. Но в такой структурной модели отсутствует среда как элемент системы, хотя такой элемент необходим, поскольку он является признаком открытости системы, каковой и является система образования.

Продолжая мысль о системном подходе, необходимо отметить, что среди футурологов утвердилась такая модель системы прогресса – триада, включающая три элемента: материал, энергия и знания. Очевидно, что последнее включает в себя систему образования как явление по приобретению и передаче знаний. Отсюда следует вывод, что образование осуществляется во имя прогресса, во имя будущего. В работах по теории образования существует такое определение результатов обучения как «превентивные» меры. На наш взгляд, этот термин, буквально означающий – опережающий, предупреждающий (лат. – prevento) - носит оттенок защиты от опасности (превентивный удар, превентивная прививка), и совсем мало подходит для описания будущего. Более подходящим является определение «прогностический» (от греческого – prognosis – предвидение, предсказание), которым мы и будем характеризовать систему получения знаний, нацеленную на будущее.

Но будущее требует планирования, которое было отвержено той вульгарной логикой рынка, воцарившейся в общественном сознании нашей страны с 90-х годов прошлого века. Сейчас используется термин «программно-целевой подход». Документы по развитию называются «стратегия», особенно на федеральном уровне. Создан даже федеральный закон [4], определяющий порядок их разработки. В качестве директивных документов принято использовать отраслевую стратегию, утверждаемую Постановлениями Правительства России. Первое, что бросается в глаза при изучении отраслевых стратегий, что сроки их действия не синхронизированы. Как же добиться согласованного взаимодействия их, или, как говорят физики, когерентности?

Такая несогласованность является результатом междисциплинарности, которая нарастает по мере развития общества. Это создает приближение к хаосу, что является в бытовом понимании мерой беспорядка и неуправляемости. Современная наука предлагает выход из этой ситуации на основах синергетики. Этот термин был предложен профессором Штутгартского университета Г. Хакеном в 1977 г., определившим ее как изучение совместного действия многих подсистем, в результате которого возникает структура функционирования. С той поры синергетика достигла массовой применимости и результативности, в том числе и в образовании. Русская наука представлена в синергетике именем И. Пригожина [5].

Образование как система содержит все признаки системы, для которых приемлемы методы синергетики. Прежде всего, междисциплинарность, ведь даже самое углубленное изучение одной дисциплины не дает представления об универсальности мира, где все взаимосвязано.

Другие признаки применимости методов синергетики к образованию:

- Сложность обусловлена наличием различных по природе и содержанию элементов, необходимостью их взаимодействия, несходимостью элементов.
- Открытость существует за счет интенсивного обмена со средой, с объектами, не являющимися элементами системы, и означает также и ответы на социальный заказ или на природные явления, например, ковид.
- Неравновесность системы – возникает за счет открытости, накапливания признаков и новаций, возникновения кризиса.
- Нелинейность системы, возникающая из-за изменения характеристик и параметров элементов системы.

Указанные выше признаки позволяют рассмотреть некоторые предложения к изменению характеристик элементов системы образования.

Государство создает образовательное пространство, состоящее из государственных стандартов, учебных планов, программ и др. Здесь, на наш взгляд, необходимо обратить внимание на формирование дисциплин. Признавая приоритет фундаментальных наук, необходимо избегать узкой специализации (вспомните слова Козьмы Пруткова: «Узкий специалист подобен флюсу»), устранить противостояние «физиков» и «лириков», разделение на техников и гуманитариев. Принимая образование как функцию, Государство должно уметь определить положение кривой на графике этой функции в диапазонах, еще не применяемых до сих пор параметров входных величин, ведь непрерывность функции означает возможность определения выходных величин при изменении входного аргумента [6], т.е. в программах следует рассматривать перспективы развития процессов, технологий, когда возникает необходимость изменения, например, возрастания аргумента. Так, «Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г.» [7] содержит перечень научных инноваций, которые рекомендуются к внедрению в теплоэнергетике. Но в учебных программах не рассматриваются особенности этих процессов и технологий.

Ученик является весьма активным элементом триады, несмотря на кажущуюся подчиненность. В процессе обучения это ощущает Учитель, работающий с ним. Хотя

действующие методические установки Государства предусматривают индивидуализацию работы с Учеником путем создания индивидуальной траектории обучения, действующая в России группово-поточная система сводит на нет замечательную идею индивидуальной образовательной траектории [8].

Исходные данные Ученика должны быть представлены на основе первого этапа обучения – школы. Этого сейчас нет, а личные впечатления Учителя никак не учитываются, особенно в начале обучения, хотя всеми признано, что язык и речь студентов становятся все беднее и примитивнее. Реакции Государства на это нет, все больше иностранных слов в документах и в обороте ВУЗов. К чему все эти «кейс», «реквест»? Ведь есть русские слова! В выпускном классе школьники не изучают русский язык: в рамках предмета литературы пишут сочинения, изложения…

Не учитываются полностью биологические (физиологические) показатели студентов, как нет и заинтересованности в их повышения. Поскольку главной работой Ученика является запоминание, то вызывает удивление отсутствие дисциплин, хотя бы факультативных, по физиологии и психологии запоминания.

Заботясь об Ученике, необходимо потребовать от него и повышения ответственности, ведь и в философии, и в юриспруденции понятия «свобода» и «ответственность» тесно связаны. Признавая обучение как работу, за которую выплачивается вознаграждение (стипендия), необходимо увеличить ответственность студентов за его работу.

С другой стороны, Государство должно осознать свою ответственность за судьбу выпускника. Речь не идет о пресловутом обязательном распределении, но Государство обязано помочь молодому специалисту в трудоустройстве. Сейчас установлена ответственность ВУЗов за трудоустройство своих выпускников, но нам не известны способы и средства для выполнения этой работы.

Установлению связей с будущим работодателем и некоторой гарантией трудоустройства может быть кооперация студентов выпускных курсов ВУЗов и общественных структур молодых специалистов предприятий. В этом сотрудничестве студенты будут знать, что представляет их будущая деятельность, а молодые специалисты заявить о необходимости введения дисциплин и методик обучения, которые позволили бы сделать устаревшим выражение: «Придя на завод, забудь все, чему тебя учили в институте!»

Знакомство студента с перспективными программами работы предприятия позволит ему обратить свое внимание на заявленные проблемы и подготовить себя к их решению. Причем, что печально, заводская практика не позволяет получить информацию, соответствующую будущему состоянию. Если студент приходит на ТЭЦ, введенную в строй в 60-х годах и запроектированную в 50-е годы XX века, он не сможет строить теплоэнергетику 2035 года. Государство должно обеспечить знакомство студента с перспективными технологиями. Вряд ли наши артиллеристы-ракетчики смогли бы разработать гиперзвуковое оружие, если бы проходили практику на орудийных батареях.

Следует радикальным образом пересмотреть статус молодого специалиста. Будучи продуктом государственной деятельности, он, как любой продукт, обладает стоимостью. И поскольку Конституция РФ предусматривает невмешательство государства в деятельность хозяйствующего субъекта, то он, этот субъект, должен этот продукт приобретать. Другими словами – частные предприятия должны платить государству при использовании подготовленных государством специалистов. Безусловно, этот процесс, несмотря на его очевидную рациональность, должен быть законодательно урегулирован, что потребует много времени.

Необходимо рассмотреть еще одну особенность. При подготовке военного специалиста в течение годовой службы в армии государство 25 лет учитывает его через органы военкоматов. А выпускник ВУЗа после 4-6 лет подготовки выбрасывается в

«свободное плавание», и никто не прослеживает дальше его судьбу, его карьеру. Чтобы устранить это обстоятельство, нужно создать госреестр (информационную базу) по инженерным кадрам. Это позволит черпать резервы для переподготовки, что намного дешевле и быстрее процесса подготовки.

Учитель – является наиболее важной и ответственной фигурой в системе образования. Он, помимо своих прямых действий по отношению к Ученику, опосредованно реализует взаимодействие Ученика и Государства. Такая позиция отнюдь не создает никаких привилегий и бонусов для него. Но, чтобы преуспеть на своем поприще, он все время должен учиться, даже если преподает фундаментальную дисциплину. При этом, в соответствии с парадигмой высшего образования в России, он превращается из транслятора, интерпретатора научных истин в водителя, гида Ученика на пути постижения знаний. Японцы очень точно называют учителя «сен-сей» – «идущий впереди».

Раньше существовала система ФПК и стажировок, когда раз в 5 лет преподавателю отводили семестр для повышения квалификации. Но сейчас Учителю некогда учиться: нагрузка его возрастает, все меньше остается так называемой «академической свободы». Он должен следовать строгой регламентации всех видов занятий, в соответствии со всеми бумагами (программа, фонд оценочных средств и т.д.). Особенно нелепым, на наш взгляд, является существование системы Moodle. Сам термин не только чужд и противен русскому слуху, но является воплощенной мечтой бюрократа управлять процессом образования одним кликом компьютера. Один из показателей нелепости этой системы - установление даты сдачи курсового проекта или работы, что лишает мотивирования досрочного выполнения и сдачи проекта, позволяющего успешному студенту получить дополнительный ресурс времени.

Нелепой, по нашему мнению, является и система показателей в мониторинге работы преподавателя. Один из них (число публикаций) приводит к тому, что руководитель подразделения ВУЗа, используя, так сказать, «право первой ночи», становится соавтором многих публикаций, возводя себя в ранг недостижимого по этому показателю и по оплате, соответственно. Рациональнее было бы ввести показатели для мотивации активности (число предложений и инициатив, внедренных инноваций), как внутри ВУЗа, так и вне его. Это воспитывает в преподавателе ответственность за его судьбу. Эта мера способствовала бы взаимодействию системы образования со средой, делая ее более эффективной. Такая открытость системы позволила бы вносить предложения во внешнюю среду, повышая роль ВУЗа в регионе, отрасли, на предприятиях. Эта открытость может быть структурирована на придании ВУЗу статуса «регионального», или же инкорпорированного подразделения производственного предприятия. Уже есть опыт включения университетов в состав крупных предприятий как «цеха науки», и существуют примеры создания интегрированных структур «ВУЗ – производство», где процесс обучения используется как для обучения студентов, так и для подготовки заводских специалистов на тренажёрах [9].

Список литературы

1. Ожегов С.И. Словарь русского языка. – Москва : Русский язык, 1975.–846 с.

2. Советский энциклопедический словарь. – 4-е изд. – Москва : Советская энциклопедия, 1987. – 1399 с.

3. Об образовании : федер. закон от 29.12.2012 г., №273-ФЗ (ред. от 31.07.2020 с изм. и доп.).

4. О стратегическом планировании в РФ : федер. закон от 28.06.2014 г., №172-ФЗ .

5. Пригожин Н. Порядок из хаоса: новый диалог человека и природы / Н. Пригожин, И. Стенгерс. – Москва : Прогресс, 1986. – 432 с.

6. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – Москва : Наука, 1964. – 608 с.

7. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г. – Утверждено Постановлением Правительства РФ от 19.06.2020 г, № 1523-р.

8. Михайличенко Т.А. О реализации ФГОС в техническом вузе // Т.А.Михайличенко, О. Б. Громова // Высшее образование в России, 2011, – №12. – С.89 -94.

9. Стерлигов В.В. О гибких обучающих системах // В.В. Стерлигов, В.П. Авдеев, В.Я. Дубовик // Известия вузов. Черная металлургия, 1986. – №6. – С.167-168.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОДХОДОВ В ОБРАЗОВАНИИ

TRANSFORMATION OF APPROACHES IN EDUCATION

Белкин Денис Сергеевич[1]
Belkin D.S.
Першина Анна Александровна[1]
Pershina A.A.
Скрипко Степан Игоревич[1]
Skripko S.I.

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
[1] National Research Tomsk Polytechnic University
634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave., 30
e-mail: den_man@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматриваются особенности трансформации образования по основным направлениям подготовки и программам дополнительного профессионального обучения в Томском политехническом университете. Ключевую роль в новом подходе к образованию играют процессы цифровизации при освоении новых компетенций специалистами сварочного производства и технического контроля.*

Ключевые слова: *образовательные программы, автоматизация, цифровизация, дистанционное обучение, сварочное производство, контроль качества.*

Annotation. The article discusses the features of the transformation of education in the main areas of training and programs of additional professional training at Tomsk Polytechnic University. A key role in the new approach to education is played by digitalization processes in the development of new competencies by specialists in welding production and technical control.

Key words: educational programs, automation, digitalization, distance learning, welding production, quality control.

Образование является одним из системообразующих институтов общества и непрерывно меняется под влиянием происходящих общественных трансформаций. Тенденции по глобализации, массовизации, цифровизации, авоматизации и др. способствуют изменению подходов к образованию, отступлению от традиционных форм преподавания и воспроизводству инноваций и передовых практик.

В связи с этим в Томском политехническом университете внедряется стратегический проект «Новое инженерное образование», который предусматривает последовательную «пересборку» образовательных программ в университете. Предлагаемый формат обучения предполагает, что инженерный бакалавриат сконцентрирован на формировании у студента научно-деятельностной картины мира, а магистратура — на изучении конкретных инженерных практик отраслей. При этом модель «профессиональной инженерной магистратуры» строится по модульному принципу. То есть дисциплины изучаются не целый семестр, а концентрированно в течение нескольких недель по отдельным блокам: большого профессионального блока, блоков по развитию системного мышления, групповых и индивидуальных проектов.

Аудитории, формирующие спрос на такие программы - это абитуриенты, студенты, выпускники и работодатели. В этой связи стоит вопрос обеспечения «состыковки» для всех целевых аудиторий, для чего постоянно проводится работа по согласованию разрабатываемых компетенций выпускника с его работодателем.

Так, например, традиционно сложившаяся образовательная программа по специализации «Оборудование и технология сварочного производства» в 2019 году была изменена с учетом возрастающей роли автоматизации процессов и производств и участившихся запросов работодателей. В настоящее время в Томском политехническом университете ведется набор и обучение по специализации «Автоматизация сварочных процессов и производств», учебная программа которой затрагивает не только основы технологических процессов по сварке, но и вопросы их автоматизации, роботизации и цифровизации.

В свою очередь, пандемия оказала огромное влияние на подходы, применяемые в образовании. Благодаря тому, что в Томском политехническом университете на протяжении 10 лет разрабатывались электронные курсы с использованием цифровых платформ Moodle и МООК удалось быстро перейти на новый формат обучения, который показал новые преимущества по сравнению с традиционным.

Формат дистанционного обучения позволил расширить границы как для очной формы по основным направлениям, так и для сферы оказания дополнительных образовательных услуг. Для подготовки специалистов сварочного производства и специалистов контроля качества в соответствии с профессиональными стандартами разработано 20 онлайн курсов, что позволяет обучаться без отрыва от производства.

При разработке электронных курсов и методов онлайн обучения особое внимание уделяется технологиям и инструментам дистанционного обучения. Все электронные курсы снабжаются мульти-медиа лекциями и практикумами, составляются тесты с закрытыми и открытыми вопросами, проводятся видеоконференции в режиме реального времени, используются кейс-технологии.

В последние годы значительно вырос спрос промышленности на специализированную подготовку персонала в более узких областях. Это привело к разработке программ по повышению квалификации в объеме 16 и 72 часов и программ профессиональной переподготовки длительностью 550 часов в индивидуальном порядке для таких предприятий, как ООО «Газпромнефть-Оренбург», ООО «Транснефть Надзор», АО «СибИАЦ», ООО "ИПЦ Бугульма", АО «Алтай-Кокс» и др.

Применение дистанционных методов позволяет снизить затраты на обучение, связанные с арендой и содержанием аудиторий, длительными командировками сотрудников предприятий к месту обучения и т.д. Однако, полное применение дистанционного обучения невозможно, если речь идет о подготовке специалистов по рабочим профессиям, где требуется непосредственное получение навыков.

В настоящее время в Томском политехническом университете реализуется две программы подготовки по рабочим профессиям - «Электрогазосварщик» и «Электросварщик аргонодуговой сварки». Преимуществом данных программ является применение на начальном этапе технологии виртуального обучения с помощью тренажера Lincoln Electric VRTEX. Он полностью имитирует окружающую обстановку сварщика и процесс сварки, что позволяет существенно сократить затраты на оборудование, материалы и снизить загрязнение окружающей среды. Комбинация визуальной воспроизводимой наплавки металла, звука сварочной дуги создает у обучающегося впечатления реальной рабочей остановки на реальном сварочном рабочем месте. К тому же тренажер снабжен уроками и заданиями, что позволяет провести интерактивный экзамен на знание теоретических основ непосредственно в виртуальной реальности. Практический опыт применения такого метода обучения сварщиков показал, что тренажер способствует

быстрому понимаю процессов, протекающих в сварочной ванне, формированию устойчивого навыка ведения электрода со стабильной скоростью и длиной дуги во всех пространственных положениях независимо от типа сварного соединения.

В сложившихся современных экономических и технологических условиях требуются новые современные подходы к освоению ключевых компетенций в вопросах цифровизации и автоматизации процессов, обеспечения цифровой грамотности населения, персонализации и трансформации образовательных процессов на всех уровнях подготовки – основных программ бакалавриата и магистратуры, программ дополнительного профессионального обучения, программ подготовки по рабочим специальностям.

Научное издание

ИННОВАЦИИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И МАШИНОСТРОЕНИИ (ТЭК-2022)

INNOVATIONS IN FUEL AND ENERGY COMPLEX AND MECHANICAL ENGINEERING (FEC-2022)

III Международная научно–практическая конференция

III International scientific and practical conference

Сборник трудов

Materials

19-21 апреля / April 2022 г.
Кемерово, Россия / Kemerovo, Russia

Труды конференции отпечатаны по оригиналам, представленными авторами

Ответственный редактор Смирнов А.Н.
Технический редактор Останин О.А.
Компьютерная верстка Бородин Д.А.

Подписано в печать 18.04.2021
Бумага белая писчая
Уч.-изд. л. 29,375
Заказ

Формат 60х84/8
Отпечатано на МФУ
Тираж 100 экз.

КузГТУ
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28