

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр
«МашиноСтроение»**



Всероссийский национальный научно-исследовательский институт
виноградарства и виноделия «Магарач» РАН

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Кыргызско-Российский Славянский университет

Азербайджанский технический университет

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова

ISSN 2587-7577

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№8

Санкт-Петербург, 2025

УДК 62-1 : 001.8

ББК 30.9

М38

М38 Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2025. – № 8. – 134 с. – DOI: 10.26160/2587-7577-2025-8.

Представлены материалы VIII международной научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (28 января 2025г.). Направления работы конференции: 1) Машиностроение и металлообработка; 2) Горные машины и оборудование для добычи полезных ископаемых; 3) Металлургическое производство; 4) Химическая промышленность и нефтегазовая отрасль; 5) Строительство и ЖКХ; 6) Сельскохозяйственное машиностроение и агропромышленный комплекс; 7) Легкая промышленность; 8) Пищевая промышленность.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов и студентов, занятых исследованием машин и процессов различного технологического назначения.

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

Жуков Иван Алексеевич – директор НИЦ «МашиноСтроение», заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, д.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

Горобей Василий Петрович – заведующий сектором разработки и исследований макетных и экспериментальных технологических установок, ВНИИВИА «МАГАРАЧ» РАН, д.т.н., в.н.с.

Кугаевский Сергей Семенович – заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» УрФУ, к.т.н., доцент.

Логинов Геннадий Иванович – профессор кафедры гидротехнического строительства и водных ресурсов КРСУ, д.т.н., доцент;

Мамедов Ариф Тандыг оглы – профессор-советник кафедры «Металлургия и технология материалов» АзТУ, д.т.н., профессор;

Шифрин Борис Маркович – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах СПбГЛТУ, к.т.н., доцент.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/maippsim.html>
<https://doi.org/10.26160/2587-7577-2025-8>

ISSN 2587-7577

© Авторы, 2025

© НИЦ МС, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и металлообработка

Михеев Р.С., Быков П.А., Калашников И.Е. Влияние технологии формирования на адгезионную прочность рабочего покрытия из баббита Б83	6
Барabanова О.А., Сапожников С.З., Александрова С.С., Решетников Д.С. Композиционные материалы в градиентной теплотметрии.....	9
Стасеев А.А., Жарковский А.А. Разработка оптимизационного модуля для системы автоматизированного проектирования ступени центробежного насоса.....	14
Рогозин Д.В., Ленивкин В.А., Рогозин А.Д. Совершенствование дуговой наплавки уплотнительных поверхностей энергетической арматуры.....	18

Горные машины и оборудование для добычи полезных ископаемых

Малахов Ю.В., Кубрин С.С. Подход к формированию требований к современному очистному механизированному комплексу	21
Степанов Д.В. Современные подходы к отработке техногенных месторождений: технологии, оборудование, перспективы	25
Решетняк С.Н., Митькин Р.В. Рудничные подъемные установки: состояние и вектор развития	29
Алиева Л., Жуков И.А. Новое техническое решение безлезвийного инструмента для бурения скважин ударно-поворотным способом.....	34
Азимов А.М., Храпенкова Е.С. Способ встраивания бойков с криволинейной образующей боковой поверхности в цилиндрические корпуса гидро-, пневмомолотов	38

Металлургическое производство

Джафарова А.А. Антифрикционные свойства порошковых уплотнителей при торцевом трении.....	43
Керимова Г.Х. Эффективность переработки отходов горнодобывающей промышленности: некоторые важные аспекты	50

Рустамова С.М. Разработка технологии двухкратного холодного прессования и спекания порошковой смеси на основе железа	55
Потетюрин М.А., Катин В.Д. Разработка нового устройства для очистки водных поверхностей от загрязнений	60
Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н., Бочкарев А.Г. Исследование процессов формирования слоистых композиционных материалов магний-медь.....	63

Химическая промышленность и нефтегазовая отрасль

Бадьин Ю.А., Кузеев И.Р. Предотвращение повреждений реакторов установок замедленного коксования, изготовленных из хромомолибденовых сталей	68
Харисов Э.Т. Исследование устойчивости к кавитационным воздействиям диспергаторов и мультифазных осевых насосов	81
Бадьин Ю.А., Кузеев И.Р. Совершенствование технологии сварки по аустенитному варианту реакторов установок замедленного коксования, изготовленных из хромомолибденовых сталей	84
Чашилов Д.В., Манухина К.С., Назмутдинов Р.А., Кораблин А.А., Злочевский Л.А., Павлов И.Н. Установка механического распушивания листовых целлюлозных материалов при получении армирующего наполнителя для полимерных композиционных материалов.....	99
Чашилов Д.В., Савин Д.А., Манухина К.С., Назмутдинов Р.А., Кораблин А.А., Злочевский Л.А., Павлов И.Н. Установка с качающимся автоклавом для гидротропной делигнификации растительного сырья при выделении волокон и лигнина для полимерных композитов.....	102
Щегольков Н.И., Комарова Л.Ю., Кондратов А.П. Влияние шероховатости стальной поверхности на коррозионную устойчивость полимерного покрытия	105

Строительство и ЖКХ

Хазиев Р.М., Ахметова И.Г., Лапин К.В. Построение модели расчетных (нормативных) тепловых потерь на участках теплосети в системе теплоснабжения города Казани	109
--	-----

Абдуллазянов Э.Ю., Гараев А.Л. Особенности электронной модели схемы теплоснабжения муниципального образования город Казань	112
Хазиев Р.М., Зверев О.И., Галияхметов Р.М. Вариант развития системы теплоснабжения муниципального образования город Нижнекамск	115
Зверева Э.Р., Ахметова И.Г. Синхронизация схемы теплоснабжения с программой развития электроэнергетики г. Казани.....	117

Сельскохозяйственное машиностроение и агропромышленный комплекс

Сковпень С.М., Лобанов Н.В., Малыгин Н.И. Мехатронный технологический комплекс для обработки деревокомпозитных материалов	120
Мерчалов С.В., Прядкин В.И. Повышение эффективности измельчения зерна путем установки просеивающих камер в молотковую дробилку.....	126

Пищевая промышленность

Печерица М.А., Мойдинов Д.Р., Степанова Е.Г. Исследование процесса экстрагирования сахара с применением ультразвука.....	131
---	-----

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ РАБОЧЕГО ПОКРЫТИЯ ИЗ БАББИТА Б83

Михеев Р.С.¹, Быков П.А.², Калашников И.Е.²

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва;*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва*

Ключевые слова: баббит, рабочее покрытие, технология формирования, адгезионная прочность, подшипник скольжения.

Аннотация. Образцы, состоящие из стального основания с рабочим покрытием из баббита Б83, изготовлены тремя жидкофазными способами, отличающимся друг от друга рядом технологических приемов. Проведены испытания по схеме на отрыв для оценки адгезионной прочности рабочего покрытия изготовленных образцов. Показано влияние технологии формирования на адгезионную прочность рабочего покрытия из баббита Б83.

INFLUENCE OF FORMATION TECHNOLOGY ON THE ADHESION STRENGTH OF WORKING COATING MADE OF BABBITT B83

Mikheev R.S.¹, Bykov P.A.², Kalashnikov I.E.²

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow;*

²*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences, Moscow*

Keywords: babbitt, working coating, forming technology, adhesive strength, plain bearing.

Abstract. Samples consisting of a steel base with a working coating of babbitt B83 were manufactured using three liquid-phase methods, differing from each other in technological techniques. Tests were conducted according to the scheme for tearing to assess the adhesive strength of the working coating of the manufactured samples. The influence of formation technology on the adhesive strength of the working coating made of babbitt B83 has been shown.

Покрытие рабочих поверхностей деталей машин из конструкционных сталей слоем специального сплава с лучшими свойствами, чем основной материал детали, получило широкое распространение в разных отраслях машиностроения. В частности, подобную конструкцию имеют подвижные опоры скольжения узлов трения, играющие важную роль в обеспечении работоспособности ответственных машин и механизмов (турбины авиационных двигателей, паровые генераторы, судовые валопроводы, промышленные центрифуги, насосы нефтегазодобывающих установок и т.д.) [1, 2]. В качестве материала рабочего покрытия наибольшее применение получили сплавы на основе олова – баббиты. Формирование рабочих покрытий осуществляют разными способами, сводящимися к расплавлению металла покрытия для обеспечения прочного соединения с металлом основы [3, 4]. Особое значение при выборе технологии изготовления подобных слоистых композиций имеет уровень адгезионной прочности между рабочим покрытием и подложкой [5].

В настоящей работе рабочее покрытие из баббита марки Б83 (83% олова, 11% сурьмы, 6% меди по ГОСТ 1320) толщиной от 3 до 4 мм формировали на подложке из качественной углеродистой стали 20 по ГОСТ 1050 со следующими размерами 300x150x10 мм. С целью повышения жидкотекучести расплава на основе олова поверхность стальной подложки предварительно подвергали лужению (рис. 1, а, б). Промежуточный слой полуды из чистого олова, имеющий толщину до 0,5 мм, получали с помощью электрического паяльника молоткового типа. Рабочее покрытие наносили тремя жидкофазными способами, отличающимся рядом технологических приемов:

- технология 1 – заливка расплава баббита на поверхность подложки с последующей обработкой газовым пламенем для выравнивания поверхности рабочего покрытия;
- технология 2 – заливка расплавленного баббита на поверхность подложки без последующей обработки газовым пламенем;
- технология 3 – расплавление, предварительно размещенного на поверхности подложки слитка баббита за счет нагрева в муфельной печи.

Испытания по оценке адгезионной прочности изготовленных образцов проводили по схеме на отрыв (рис. 1, в). Согласно выбранной схеме, стальная подложка (позиция 3) за счет оправки (позиция 4) испытывает распределенную по поверхности нагрузку, в то время как рабочее покрытие (позиция 1) за счет контакта с пуансоном (позиция 5) подвержено силовому воздействию.

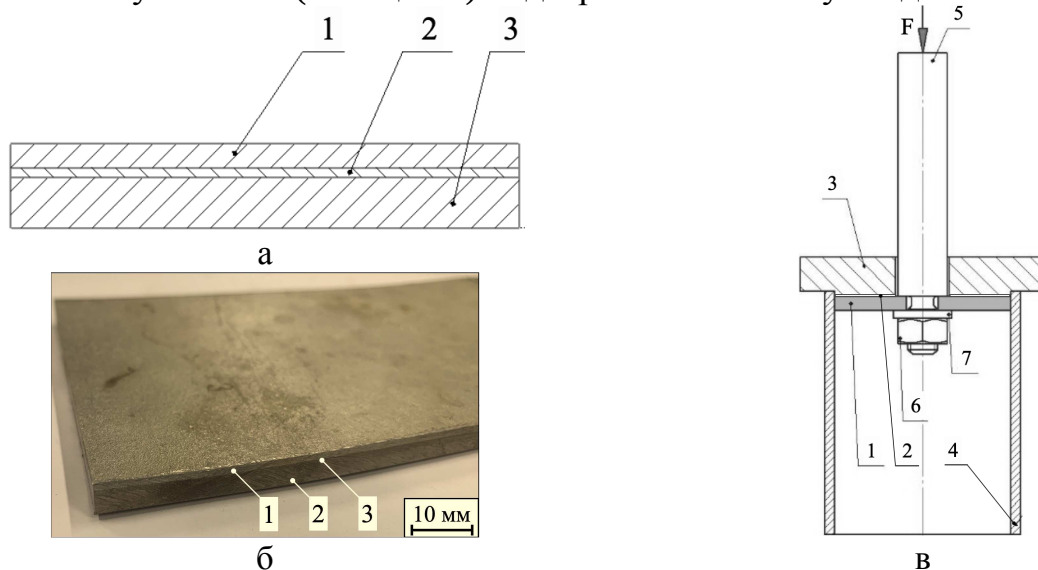


Рис. 1. Схема (а), характерный внешний вид (б) и схема испытаний (в) изготовленных образцов. Цифрами обозначены: 1 – рабочее покрытие, 2 – промежуточный слой, 3 – подложка, 4 – оправка, 5 – пуансон, 6 – гайка, 7 – шайба

Результаты оценки адгезионной прочности сформированных по разным технологиям рабочих покрытий показали, что образец, подверженный дополнительному термическому воздействию газовым пламенем для выравнивания поверхности рабочего покрытия (технология 1), характеризуется неудовлетворительными значениями адгезионной прочности. В частности, его разрушение произошло до начала проведения испытаний на этапе предварительной подготовки. Полученные значения адгезионной прочности образцов, изготовленных по технологиям 2 и 3, составляют 68,3 и 37 МПа, что

превышает нормативные требования – 35 МПа и позволяет рекомендовать технологию их изготовления для практического применения. Важно отметить, что максимальным значением адгезионной прочности обладает образец, изготовленный заливкой расплавленного баббита на поверхность стальной подложки без последующей обработки газовым пламенем.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить предпочтительную технологию формирования рабочих покрытий из баббита марки Б83 при изготовлении слоистых композиций для подвижных опор скольжения узлов трения. Полученные результаты могут быть применены не только для формирования рабочих покрытий из баббита марки Б83, но и для получения промежуточных слоев при изготовлении функционально-организованных слоистых композиций триботехнического назначения.

Список литературы

1. Соколов Н.В., Сарманаева А.Ф., Давлетшин И.С., Коршунов М.В. Рекомендации к проектированию и применению материалов подшипников скольжения компрессорных машин // Компрессорная техника и пневматика. – 2024. – № 1. – С. 37-43.
2. Смирнов Е.А., Толстихин Ю.Ю., Шишов А.В., Баукин В.А., Блохин Д.В., Овчаренко Н.Ю. Применение антифрикционных материалов в подшипниках скольжения центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов // Газовая промышленность. – 2023. – №S4(864). – С. 74-81.
3. Alcover P.R.C., Pukasiewicz A.G.M. Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and flame spray processes // Tribology International. 2019, vol. 131, pp. 148-157.
4. Ramadan M., Fathy N. Influence of heat treatment on interfacial microstructure of cast babbitt carbon steel bimetallic materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1091, p. 012045.
5. Mikheev R.S., Innovative processes of production functional gradient layered compositions with enhanced tribological properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 934, p. 012036.

Сведения об авторах:

Михеев Роман Сергеевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника»;

Быков Павел Андреевич – научный сотрудник Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов;

Калашиников Игорь Евгеньевич – д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Барabanова О.А.¹, Сапожников С.З.², Александрова С.С.¹, Решетников Д.С.¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва;

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Ключевые слова: градиентные датчики теплового потока, слоистый композиционный материал, монокристаллический кремний, металл, диффузионная сварка.

Аннотация. Отличительной особенностью слоистых композиционных материалов является то, что это всегда функциональные материалы – материалы со специальной совокупностью свойств, которые создаются для решения конкретной задачи. Создание слоистых структур связано с выбором: технологического процесса его изготовления; пар материалов; геометрических характеристик слоёв; схемы компоновки слоев, что вместе и обеспечит искомую совокупность свойств. Разработка технологии изготовления нового класса слоистых композиционных материалов с анизотропией тепло-, электропроводности и коэффициента термоЭДС на основе композиции монокристаллический кремний – металл методом диффузионной сварки в вакууме, обеспечивает дальнейшее развитие градиентной теплотометрии, связанное с усовершенствованием характеристик градиентных датчиков теплового потока за счет использования новых композиционных материалов.

GRADIENT THERMOMETRY IN COMPOSITE MATERIALS

Barabanova O.A.¹, Sapozhnikov S.Z.², Aleksandrova S.S.¹, Reshetnikov D.S.¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow;

²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: gradient heat flux sensors, layered composite material, monocrystalline silicon, metal, diffusion welding.

Abstract. A distinctive feature of layered composite materials is that they are always functional materials—materials with a special set of properties designed to solve specific tasks. The creation of layered structures involves selecting the manufacturing process, material pairs, geometric characteristics of the layers, and the layer layout scheme, all of which together provide the desired set of properties. The development of a manufacturing technology for a new class of layered composite materials with anisotropy in thermal and electrical conductivity and thermoelectric power coefficient, based on the monocrystalline silicon-metal composition using diffusion welding in a vacuum, ensures further advancement of gradient thermometry by improving the characteristics of gradient heat flux sensors through the use of new composite materials.

С начала XX века интенсивно развивается теплотометрия – совокупность методов и средств получения экспериментальной информации о плотностях тепловых потоков на границах тел, находящихся в теплообмене с окружающими. Ее предметом являются теплотометрические исследования различных объектов, начиная с геофизических, биологических, медицинских и до различных научно-технических и промышленных устройств – от атомных реакторов до космических кораблей.

К основным параметрам датчиков относят чувствительность, быстродействие, диапазон рабочих температур и диапазон размеров. Кроме того, важны стойкость к агрессивным средам, механическая прочность, возможность массового производства и т.д. [1].

Существенными преимуществами обладают градиентные датчики теплового потока (ГДТП), выполненные из материалов с анизотропией теплоэлектропроводности и коэффициента термоЭДС. Впервые о таких датчиках упоминает Л. Гайлинг [2].

Современное развитие ГДТП связано, в основном, с работами группы из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, результаты которых обобщены в монографиях [3-5].

Стабильные результаты удалось получить только для монокристаллов висмута чистоты 0,9999, однако область их применения ограничена точкой плавления висмута (271°C). Количество природных анизотропных металлов невелико, и влиять на их эффективные кинетические коэффициенты невозможно; кроме того, принципиально неустранимы ограничения, накладываемые термостойкостью таких материалов. Поэтому становится очевиден интерес к искусственным анизотропным материалам.

Слоистые композиционные материалы (СКМ) используют там, где возможности природных материалов исчерпали себя. Их изготавливают под конкретную задачу, зная которую разработчик должен сформулировать определённые требования для конечного продукта и технологического процесса его изготовления: геометрические характеристики слоёв; схема компоновки слоев; физико-механические свойства и структура композиции.

Физико-механические свойства и схема компоновки слоёв определяются условиями эксплуатации изделия. Однако получение прочного соединения компонентов СКМ является основной задачей технологии изготовления композиционных материалов и в первую очередь прочность соединения слоёв определяется соединяемыми материалами.

Первыми композиционными материалами для создания ГДТП были СКМ: сталь 12Х18Н9Т – никель, сталь 65Х13 – никель, хромель – алюминий, железо – константан и медь – молибден.

Качество соединения на микроуровне контролировалось металлографически (рис. 1).

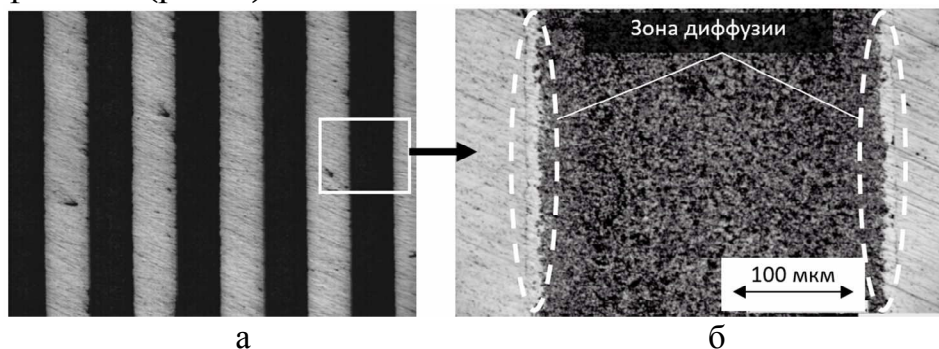


Рис. 1. Микроструктура композиции сталь 12Х18Н9Т+никель, выполненной из слоев толщиной 0,1 мм: а – до травления; б – после травления слоев (очерчена пунктиром светлая зона диффузии)

Распределение элементов в зоне соединения показано на рисунке 2. Анализ проводился с помощью микроанализатора «Camebax-Microbeam» фирмы Самеса (Франция). Наблюдение проводилось в оптическом микроскопе ($\times 400$) и во вторичных электронах в режиме сканирования электронным зондом ($\times 100 \dots 20000$). Состав определялся методом количественного рентгеноспектрального микроанализа с помощью спектрометров с волновой дисперсией. Условия анализа: энергия электронного пучка – 10 кэВ; ток – 10 нА; система элементов – Ni-Fe; аналитические линии – $\text{NiK}\alpha$, $\text{FeK}\alpha$; эталоны – металлические никель и сталь, используемые при получении композита.

Точность анализа 5%, пространственное разрешение: поперечное (диаметр анализируемой области) – 1,5-2,5 мкм; продольное (по глубине) – 0,7 мкм.

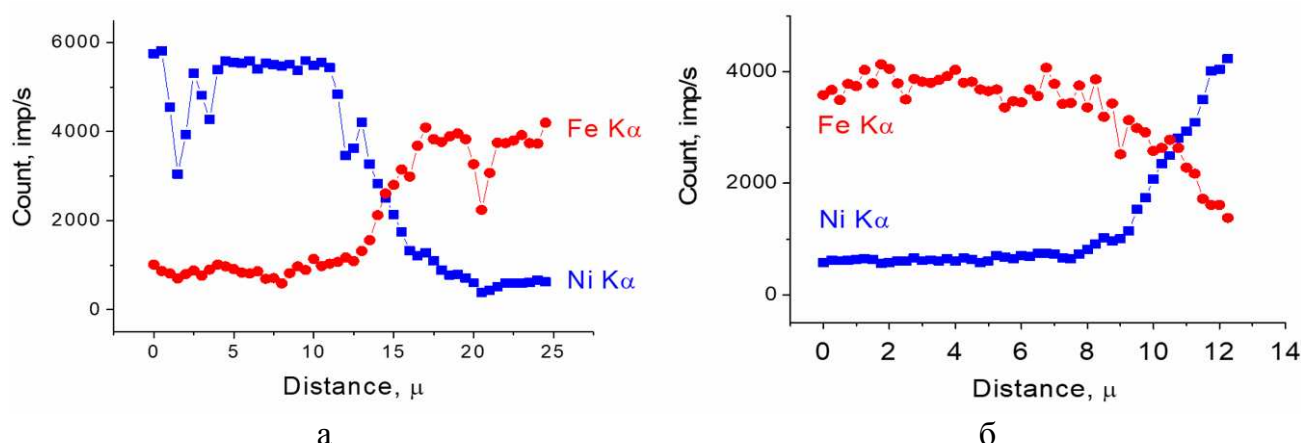


Рис. 2. Распределение элементов в зоне соединения СКМ Ni – 12X18H9T: увеличение 8000 (а) и 4000 (б)

Представленные результаты, получены при электронном сканировании границы перпендикулярно ей при увеличении 8000 (рис. 2, а) и 4000 (рис. 2, б). В зоне соединения отмечается взаимная диффузия компонентов СКМ. Размер диффузионной зоны 5 мкм с погрешностью 1 мкм.

В процессе диффузионной сварки получали многослойный анизотропный брусок. После охлаждения его разрезали на пластины, расположенные под углом $20 \dots 45^\circ$ к рабочим плоскостям, а затем присоединяли выводы. Эти ГДТП работоспособны до температуры 1300 К. Вольт-ваттная чувствительность некоторых градиентных датчиков теплового потока при температуре около 300 К приведена в таблице 1.

Табл. 1. Вольт-ваттная чувствительность градиентных датчиков теплового потока при температуре около 300 К

СКМ	Чувствительность, мВ/Вт
никель – сталь 12X18H9T	0,40
хромель – алюмель	0,35
медь – молибден	0,02

Применение градиентных датчиков для теплотрии при температурах до 1300 К не имеет мировых аналогов, поскольку осуществляется на принципиально новой элементной базе [7].

Дальнейшее развитие градиентной теплотрии направлено на разработку новых датчиков теплового потока из новых слоистых материалов, а также на усовершенствование их характеристик.

Особый интерес вызывает применение композиций полупроводник-металл и полупроводник-проводник, поскольку значения коэффициентов термоЭДС у полупроводников на порядок и более превышают уровень, характерный для металлов. Поэтому особый интерес для ГДТП представляют композиции на основе монокристаллического кремния: Si – Al, Si – Cu, Si – Ni.

При производстве изделий на основе кремния одной из главных задач остается создание надёжного соединения монокристаллического кремния с металлами. Метод диффузионной сварки в вакууме, является наиболее приемлемым для решения этой задачи. Гибкость процесса диффузионной сварки позволяет в широких пределах варьировать технологические параметры сварки (давление, время, температура, степень вакуума), а в случае развитой и правильно активированной поверхности контакта, обеспечивает получение надежного соединения полупроводника с металлом, сохраняя высокие электрофизических СКМ – заготовок для ГДТП.

Однако при соединении кремния с металлами необходимо решить ряд задач, связанных с различиями физических и химических свойств между кремнием и металлами, подлежащими соединению.

Коэффициенты линейно-теплового расширения кремния, как известно, намного ниже, чем у металлов. Напряжение будет создаваться в соединении кремний/металл из-за несоответствия температурных коэффициентов линейного расширения, как в процессе соединения, так и в процессе эксплуатации, что ухудшит механические свойства сварного соединения и может вызвать растрескивание кремния сразу после процесса сварки.

Распределение остаточных тепловых напряжений не является равномерным в зоне соединения. Наиболее вредное влияние теплового напряжения вызвано растягивающим напряжением на границе раздела или в кремнии. Направление максимальных растягивающих напряжений в основном перпендикулярно поверхности раздела и направлению свободной поверхности, вызывая раскрытие трещины и разрушение [6]. Эта задача требует своего решения.

Список литературы

1. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Барабанова О.А., Салмин П.А. Задачи и решения в градиентной теплотрии // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2019. – №1. – С. 81-86.
2. Geiling L. Das Thermoelement als Strahlungsmesser // Zschr. F. Angew. Phys. Bd. 1951, vol. 3, pp. 12-17.
3. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – 169 с.
4. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 203 с.

5. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплотметрии. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 203 с.
6. Барабанова О.А., Набатчиков С.В. Причины возникновения остаточных напряжений в диффузионном сварном соединении монокристаллический кремний – металл // Сварочное производство. – 2021. – №11. – С. 45-49.

Сведения об авторах:

Барабанова Ольга Алексеевна – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов»;

Сапожников Сергей Захарович – д.т.н., профессор, директор научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике»;

Александрова Светлана Сергеевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов»;

Решетников Даниил Сергеевич – студент.

РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗАЦИОННОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Стасеев А.А., Жарковский А.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: python, система автоматизированного проектирования, оптимизация, центробежный насос, рабочее колесо.

Аннотация. В статье приведено описание модуля, предназначенного для оптимизации, разработанного в рамках создания системы автоматизированного проектирования ступени центробежного насоса. Реализованный модуль позволяет производить итерационные расчёты каждого элемента проточной части ступени (рабочее колесо, спиральный отвод) в автоматическом режиме, варьируя расчётные параметры в границах, заданных пользователем. С помощью полученных результатов расчёта можно определить сочетание параметров, обеспечивающее большие значения КПД и напора по сравнению с исходным вариантом.

DEVELOPMENT OF OPTIMIZATION MODULE FOR THE SYSTEM OF AUTOMATED DESIGN OF CENTRIFUGAL PUMP STAGE

Staseev A.A., Zharkovsky A.A.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: python, computer-aided design system, optimization, centrifugal pump, impeller.

Abstract. The article describes a module designed for optimization, developed within the framework of creation of the system of computer-aided design of a centrifugal pump stage. The realized module allows to make iterative calculations of each element of the flowing part of the stage (impeller, spiral outlet) in automatic mode, varying the calculation parameters within the limits set by the user. With the help of the obtained calculation results, it is possible to determine the combination of parameters that provides higher efficiency and head compared to the initial variant.

В настоящий момент, оптимизация проточных частей центробежных насосов является одним из самых быстроразвивающихся направлений в сфере насосостроения [1, 2]. Данное направление позволяет повысить КПД и напор конструируемых и модернизируемых проточных частей, используя специализированные модули в пакетах вычислительной гидродинамики. Использование подобных модулей сопряжено с большими временными затратами на вычисление, именно поэтому в Высшей школе «Энергетическое машиностроение» СПбПУ в рамках разработки системы автоматизированного проектирования ступени центробежных насосов [3, 4] была начата разработка оптимизационного модуля, позволяющего производить оптимизацию на основе выполняемых системой 2D-расчётов.

Оптимизация производилась для ступени с коэффициентом быстроходности равном 93. Исходные данные ступени приведены на рисунке 1.

Рис. 1. Техническое задание проектируемой ступени

Данная ступень проектировалась с рабочим колесом с пространственными лопастями и спиральным отводом, спроектированным по закону $V_u R = \text{const}$. По результатам 2D-расчёта: напор равен 20,2 м, КПД равен 70,6%. По результатам расчёта в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS CFX параметры следующие: напор равен 21,184 м, КПД равен 68,42%.

Далее был произведён оптимизационный расчёт, стандартные параметры для которого указаны в окне, изображенном на рисунке 2.

Рис. 2. Установка стандартных параметров

После установки стандартных параметров происходит переход к окну задания варьируемых параметров (рис. 3). В качестве варьируемого параметра был задан угол охвата лопасти на трёх линиях тока.

Параметр	Нижнее значение	Верхнее значение
Theta	105	155

Рис. 3. Установка варьируемого параметра

По результатам расчёта был получен перечень значений КПД и напора в зависимости от значения параметров угла охвата лопасти. Результаты расчёта приведены на рисунке 4.

Оптимизация

Tab 1 Tab 2

	Theta	H, м	KPD
1	105	21.294	0.7227
2	106	21.259	0.7227
3	107	21.209	0.7226
4	108	21.161	0.7226
5	109	21.132	0.7229
6	110	21.070	0.7227
7	111	21.026	0.7224
8	112	20.971	0.7222
9	113	20.917	0.7221
10	114	20.867	0.7218
11	115	20.816	0.7217
12	116	20.745	0.7212
13	117	20.713	0.7215
14	118	20.647	0.7212
15	119	20.544	0.7208

Начать!

Рис. 4. Результаты оптимизационного расчёта

По результатам оптимизационного 2D-расчёта: напор равен 21,294 м, КПД равен 72,27%. По результатам расчёта оптимизированного варианта в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS CFX параметры следующие: напор равен 21,52 м, КПД равен 69,72%

С помощью выполненного оптимизационного расчёта удалось повысить напор в 2D-постановке удалось повысить напор на 5,4% и КПД 1,67%. В 3D-расчёте удалось повысить напор на 1,6% и КПД на 1,3%, что свидетельствует о том, что выбранный подход позволяет повышать значения параметров ступеней центробежных насосов, затрачивая меньшее время по сравнению с оптимизацией, используемой в специализированных модулях пакетов вычислительной гидродинамики.

Список литературы

1. Wang W., Han Zh., Pei Ji., Pavesi G., Gong X., Yuan Sh. Energy efficiency optimization of water pump based on heuristic algorithm and computational fluid dynamics // Journal of Computational Design and Engineering. 2023, vol. 10, no. 1, pp. 382-397.
2. Wang W., Sun J., Liu J., Zhao J., Pei J., Wang J. Introducing Non-Hierarchical RSM and MIGA for Performance Prediction and Optimization of a Centrifugal Pump under the Nominal Condition // Processes. 2022, vol. 10, no. 8, p. 1529.
3. Голиков В.А., Жарковский А.А., Топаж Г.И. Программные комплексы для расчета течения и автоматизированного проектирования лопастных гидромашин // Материаловедение. Энергетика. – 2012. – № 1(142). – С. 199-206.

4. Стасеев А.А., Жарковский А.А. Автоматизированное проектирование 3D-моделей элементов проточной части ступени шнеко-центробежного насоса // Известия МГТУ МАМИ. – 2024. – Т. 18, №3. – С. 212-221. – DOI: 10.17816/2074-0530-632427.

Сведения об авторах:

Стасеев Александр Александрович – аспирант Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики;

Жарковский Александр Аркадьевич – д.т.н., профессор Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ

Рогозин Д.В., Ленивкин В.А., Рогозин А.Д.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Ключевые слова: дуговая наплавка, плавящийся электрод, наплавленный металл, уплотнительные поверхности, энергетическая арматура.

Аннотация. Работа направлена на повышение производительности и качества наплавленного металла уплотнительных поверхностей деталей затвора энергетической арматуры с минимальными трудозатратами и влиянием человеческого фактора за счет использования послойной одноэлектродной дуговой наплавки плавящимся электродом сплошного сечения в смеси защитных газов с поперечными колебаниями наплавочной горелки.

IMPROVEMENT OF ARC WELDING OF SEALING SURFACES OF POWER VALVES

Rogozin D.V., Lenivkon V.A., Rogozin A.D.

Don State Technical University, Rostov-on-Don

Keywords: arc welding, consumable electrode, deposited metal, sealing surfaces, power valves.

Abstract. The work is aimed at improving the productivity and quality of the deposited metal of the sealing surfaces of the gate parts of power fittings with minimal labor and the influence of the human factor through the use of layered single-electrode arc welding with a continuous-section consumable electrode in a mixture of protective gases with transverse vibrations of the welding torch.

Энергетическая арматура (клапаны, задвижки, затворы, заслонки и др.) применяется для управления потоком технологической среды (жидкости, пара, газа и др.) в теплообменном оборудовании энергетических установок. Основным элементом арматуры являются детали затвора (тарелка и кольцо), которые находятся в постоянном взаимодействии и призваны обеспечить герметичность соединения в месте их контакта в условиях высоких температур и действии значительных по величине статических и динамических нагрузок. Детали затвора изготавливают из проката углеродистой и низколегированной стали, которые обладают хорошими технологическими свойствами при механической обработке и являются достаточно экономичными. С целью обеспечения надежной герметичности в месте контакта на детали затвора дуговой наплавкой высоколегированными материалами с последующей механической обработкой создают уплотнительные поверхности. Наплавленный металл уплотнительных поверхностей должен обладать износостойкостью, коррозионной стойкостью, длительной прочностью при рабочих температурах, стойкостью против задираания поверхностей контакта и др., [1].

При создании уплотнительных поверхностей применяется большое технологическое разнообразие способов наплавки (дуговая, плазменная, лазерная, электронно-лучевая, газотермическая и др.). Однако технология наплавки является весьма трудоемкой, в большинстве случаев требуется

предварительный подогрев в широком диапазоне температур (150-700°C), последующая термическая обработка или длительный термический отдых (не менее 8 часов). При этом не в полной мере обеспечивается стабильность значений твердости наплавленного металла и его стойкость против образования горячих трещин из-за чувствительности к параметрам режимов наплавки и скорости охлаждения. Поэтому технология наплавки определяется конструкцией и формой, размерами и массой деталей затвора, высотой и химическим составом наплавленного слоя уплотнительной поверхности и обладает широким разнообразием технологических приемов [2].

Обеспечить вышеперечисленные свойства наплавленного металла уплотнительных поверхностей с высокой степенью производительности и экономичности возможно за счет применения дуговой наплавки плавящимся электродом в смеси защитных газов [3]. При этом требуемую ширину наплавленного участка можно формировать отдельными валиками, перекрывающими друг друга на 1/3 ширины валика. Однако для увеличения стойкости наплавленного металла к трещинообразованию и обеспечению химической однородности необходимо снизить долю участия основного металла в наплавленном. В этом случае целесообразно выполнять наплавку на всю требуемую ширину с поперечными колебаниями электрода [3].

Поэтому целью работы является исследование основных параметров режима послойной дуговой наплавки плавящимся электродом в смеси защитных газов на формирование наплавленных слоев с минимальным равномерным проплавлением по площади наплавки с обеспечением качества уплотнительных поверхностей согласно нормативным требованиям.

В настоящее время в промышленности широко применяются инверторные сварочные источники питания, которые обладают малой инерционностью и высоким быстродействием, способны управлять режимами процесса на уровне микроциклов, что дает возможность осуществлять наплавку с использованием специальных процессов короткой и длинной дугой [4].

Для наплавки валиков в работе использовали цифровой источник тока инверторного типа с микропроцессорным управлением Trans Puls Synergic 5000 (Fronius), который имеет необходимые синергетические программы управления электрическими параметрами наплавки короткой и длинной дугой, импульсно-дуговой процесс. Регистрацию электрических параметров процесса наплавки осуществляли измерителем-регистратором сварочных процессов ИРСП 11.

Экспериментальную многослойную наплавку осуществляли на пластины из стали 20 по ГОСТ 1050 толщиной 10 мм, током обратной полярности электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в смеси защитных газов (82% Ar + 18% CO₂).

Многослойную наплавку с заданной шириной (18 мм) производили путем наплавки трёх валиков друг на друга с одновременным поперечным возвратно-поступательным перемещением наплавочной горелки. Каждый последующий валик наплавливали после тщательной зачистки предыдущего от шлака. Температура металла предыдущего валика была не выше 100⁰С.

Формирование первого слоя наплавленного металла (подслоя) на основной металл для обеспечения условий минимального тепловложения осуществляли процессом наплавки короткой дугой с периодическими короткими замыканиями. Это позволило обеспечить перенос электродного металла с поверхности электрода в наплавочную ванну при сравнительно не высоких значениях тока (140...160 А) и напряжения дуги (14...18 В). Последующие слои с точки зрения увеличения производительности выполняли процессом длинной дугой импульсно-дуговой наплавкой, что позволило обеспечить мелкокапельный перенос электродного металла с частотой переноса порядка 100 капель в секунду при сравнительно не высоком значении тока наплавки (160...180 А). При этом разбрызгивание электродного металла практически не наблюдается, а проплавление стабильное и равномерное по длине и ширине последующих наплаваемых валиков.

Дальнейшее направление работы заключается в исследовании послойной дуговой наплавки плавящимся электродом в защитном газе с поперечными возвратно-поступающими колебаниями горелки для определения оптимальных параметров режима процесса, обеспечивающих стабильные свойства высоколегированного многослойного наплавленного металла и повышение производительности с минимальными трудозатратами.

Список литературы

1. Лосев А.С., Еремин Е.Н., Гуржий А.С., Васенко О.Ю. Износостойкая наплавка уплотнительных поверхностей клапана запорной арматуры // Россия молодая: передовые технологии в промышленности. – 2013. – № 1. – С. 73-76.
2. Степин В.С., Старченко Е.Г., Волобуев Ю.С., Егоров М.Ю. Современные наплавочные материалы для уплотнительных поверхностей арматуры АЭС и ТЭС // Арматуростроение. – 2006. – № 2. (41) – С. 55-56.
3. Рогозин Д.В., Ленивкин В.А. Формирование технологического узкополосного наплавленного слоя // Сварка и диагностика. – 2023. – № 5. – С. 49-54.
4. Милютин В.С., Катаев Р.Ф. Сварочные свойства оборудования для дуговой сварки. – М.: НАКС медиа, 2016. – 457с.

Сведения об авторах:

Рогозин Дмитрий Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»;

Ленивкин Вячеслав Андреевич – д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник центра научных компетенций;

Рогозин Алексей Дмитриевич – студент.

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К СОВРЕМЕННОМУ ОЧИСТНОМУ МЕХАНИЗИРОВАННОМУ КОМПЛЕКСУ

Малахов Ю.В., Кубрин С.С.

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук, Москва*

Ключевые слова: очистные механизированные комплексы, требования, выемочные участки, сложные горно-геологические условия, очистные работы, режимы работы.

Аннотация. В статье показано влияние ухудшение горнотехнических и горно-геологических факторов на внеплановые остановки технологических процессов на выемочном очистном участке в угольной шахте. Поставлена задача о необходимости оптимизации режимов работы современного механизированного очистного комплекса, в части скорости подачи комбайна и времени его работы за сутки. Предложена современная технология управления технологическим процессом, при котором заданные режимы работы очистного механизированного изменялись бы на основе анализа контролируемых и регистрируемых данных о состоянии шахтной атмосферы, угольного и породного массива. В заключении отмечено, что эффективность очистных работ может быть достигнута за счет включения в систему управления очистного комплекса оперативного контроля изменения горнотехнических параметров и проведения их оценки и прогноза.

APPROACH TO THE FORMATION OF REQUIREMENTS FOR A MODERN MECHANIZED CLEANING COMPLEX

Malakhov Yu.V., Kubrin S.S.

*Institute of problems of comprehensive exploitation of mineral resources
n.a. academician N.V. Melnikov of Russian Academy of Sciences, Moscow*

Keywords: mechanized cleaning complexes, requirements, excavation sites, difficult mining and geological conditions, cleaning operations, operating modes.

Abstract. The article shows the impact of the deterioration of mining and geological factors on the unplanned shutdowns of technological processes at the dredging treatment site in a coal mine. The task is to optimize the operating modes of a modern mechanized treatment plant, in terms of the feed rate of the combine and its operating time per day. A modern technology for process control is proposed, in which the set operating modes of a mechanized treatment plant would change based on the analysis of controlled and recorded data on the state of the mine atmosphere, coal and rock mass. In conclusion, it is noted that the effectiveness of cleaning operations can be achieved by including operational control of changes in mining parameters in the management system of the cleaning complex and conducting their assessment and forecast.

Введение. Выемочный очистной участок является основным производственным элементом угольной шахты [1]. Отечественный опыт показывает, что эффективная работа высокопроизводительных выемочных участков отмечается в угольных пластах с благоприятным горно-геологическими условиями [2]. При этом в настоящее время в угольных шахтах наблюдается устойчивая тенденция перехода горных добычных работ на большие глубины 400 м и более, при значительном росте интенсификации очистных работ. В таких условиях, для безопасной и эффективной выемки полезного ископаемого из

горного массива земной толщи, технологии работы добычного комплекса необходимо адаптировать к рискам ухудшения горнотехнических и горно-геологических факторов отрабатываемых угольных пластов. К таким факторам влияния внешней среды горного массива можно отнести: перераспределение динамического состояния горного давления (с кровли, с бортов, со стороны почвы), что может привести к движению горных пород, проявлений в виде горных ударов, выбросов угля, газа; повышение концентрации газов и их движение, в следствии метановоздушных выделений из почвы и боков отрабатываемой выработки. В следствии случайно изменяющихся горно-геологических условий могут происходить периодические остановки очистного комплекса, в том числе по причине превышения контролируемых параметров безопасности шахтной атмосферы.

В настоящее время большинство отечественных угольных шахт механизированы, а управление очистным механизированным комплексом осуществляется в ручном режиме или дистанционно, при этом машинист не располагает объективными данными о параметрах системы «угольный пласт – шахтная атмосфера – механизированный комплекс» [3]. Назревающие во времени и пространстве газодинамические процессы, динамические проявления горного давления при достижении критических значений могут привести к внеплановым предаварийным остановкам очистного забоя. Поэтому обеспечение рациональных режимов работы технологического оборудования выемочного участка [4] и их взаимная увязка с контролем параметров безопасности, является определяющим направлением для повышения производительности очистных забоев.

В связи с этим возникает актуальная научная задача по оптимизации режимов работы механизированного очистного комплекса при отработке высокопроизводительных выемочных участков в сложных горно-геологических условиях. Отмечено в [2], что эффективность работы выемочного участка во многом определяется скоростью подачи комбайна и временем его работы за сутки, с учетом условий конкретной лавы в текущий момент времени.

Опыт. Мировой опыт эксплуатации показывает, что применение автоматизированного управления очистными механизированными комплексами значительно повысило эффективность выемочных участков. Широкое распространение имеют системы автоматизированного управления процессами работы очистных комплексов таких фирмы как «Marko» (Германия) [5], «DBT» (Германия), среди отечественных решений система автоматизированного управления механизированным комплексом ООО «Ильма» [6]. Однако большинство систем управления, применяемых на отечественных шахтах, преимущественно направлены на автоматизацию выполнения стандартных или заданных алгоритмов технологических процессов в очистной лаве, среди которых управление скоростью движения комбайна, передвижка секций механизированной крепи, что безусловно является значимым шагом к переходу на применение технологий без постоянного присутствия людей в очистных забоях. При этом влияние внешних горных условий при взаимодействии технологии выемки и горного массива на практике не учитывается.

Для решения задач повышения эффективности выемочных участков шахт следует учитывать передовой зарубежный опыт реализации систем контроля технологического процесса с использованием интеллектуальных платформ управления. Так Китайская группа ZMJ для управления механизированным очистным комплексом в дополнение к применяемым датчикам положения и давления, начинают внедрять датчики для оценки состояния угольных пластов, для адаптации режимов работы комплекса к сложной окружающей среде и условиям работы в шахте [7, 8].

Предлагаемые решения. В сложных горнотехнических и горно-геологических условиях определяющим факторами ведения горных работ при выемке угля являются изменения, происходящие в массиве горных пород и угольном пласте, связанные с реакцией массива горных пород на техногенное воздействие геотехнологий. Развитие цифровых технологий способствует их активному внедрению и использованию в современных технологиях добычи. Однако усложняющие факторы ведения горных работ, требуют решения задач по обеспечению непрерывного и соответствующего текущим горно-геологическим условиям режима работы очистного механизированного комплекса и использованию для их решения доступных цифровых решений.

Поэтому необходима современная технология управления технологическим процессом, при котором заданные режимы работы технологического оборудования выемочного участка изменялись бы в зависимости от текущих горно-геологических условий, параметров пласта и др.

Решение поставленных задач может быть осуществлено путем обеспечения процессов функционирования оборудования механизированных очистных комплексов во взаимосвязи с параметами шахтной атмосферы и адаптивности к характеристикам отрабатываемого угольного пласта в пределах выемочного участка.

В современных условиях необходима научно обоснованная методика выбора оптимальных режимов работы оборудования очистного комплекса при совмещении во времени и пространстве опасных техногенных процессов в виде технологических вызовов, а именно:

- в зависимости от оценки риски остановки процесса добычи из-за ухудшения влияющих на безопасность добычи факторов;
- на основе анализа контролируемых и регистрируемых данных о состоянии шахтной атмосферы, угольного и породного массива;
- с учетом оповещения о недопустимом развитии аварийных событий, с выдачей необходимых технических решений и действий.

Функциональная устойчивость работы очистного механизированного комплекса должна обеспечиваться посредством использования специальных датчиков, обеспечивающих сбор исходных сведений в пределах отрабатываемого выемочного участка и системы автоматизированного управления комплексом оборудования, обеспечивающей обработку информации и выработку оптимальных режимов работы комплекса.

Заключение. Одним из сдерживающих факторов повышения производительности современных выемочных очистных участков в не

благоприятных горно-геологических условиях являются неуправляемые простои технологического процесса очистных работ.

Неустойчивость технологического процесса очистных работ, связанная с изменчивостью горно-геологических и горнотехнических условий и случайностью их проявления, снижают производительность очистного механизированного комплекса.

Поэтому актуальной задачей является выработка оптимальных режимы работы очистного механизированного комплекса, на основе заблаговременного выявления возникающих опасностей, их нейтрализации или снижение проявления.

Комплексная эффективность и безопасность очистных работ на конкретном выемочном участке должна быть достигнута за счет включения в систему управления очистного комплекса средств оперативного контроля изменения горнотехнических параметров, проведения оценки и прогноза превышения параметров безопасности, что в целом снизит простои и повысит производительность добычи.

Список литературы

1. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Руденко Ю.Ф. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. – М.: ИПКОН РАН, 2009. – 396 с.
2. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Закоршменный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт // Уголь. – 2019. – №3(1116). – С. 46-49.
3. Малахов Ю.В., Кубрин С.С. Оценка рисков остановки технологического процесса добычи угля на выемочном участке // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 25-26 апреля 2024 года. – Прокопьевск: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 72-79.
4. Кубрин С.С. Автоматизированная система управления горным производством, как платформа комплексирования технологических стадий и операций в единый технологический процесс // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №11. – С. 96-107.
5. Ройтер М., Векслер Ю.А. Электрогидравлическая система управления марсо в удароопасных лавах // Уголь. – 2011. – № 12(1029). – С. 26-28.
6. Система автоматизированного управления механизированным комплексом «Ильма-МК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ilma-mk.ru/product/ilma-mk/>.
7. Рябков Н.В. Электрогидравлическая интеллектуальная система управления ZMJ. Технология меняет мир // Горная промышленность. – 2023. – № 2. – С. 40-41.
8. Интеллектуальная лава. Современное состояние и перспективы развития автоматизированного очистного комплекса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uk42.ru/index.php?id=9536>.

Сведения об авторах:

Малахов Юрий Валентинович – к.т.н., старший научный сотрудник;

Кубрин Сергей Сергеевич – д.т.н., профессор, ученый секретарь, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОТРАБОТКЕ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ: ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Степанов Д.В.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: техногенные месторождения, модульные обогатительные комплексы, мобильные фабрики, высокоградиентная магнитная сепарация, матрицы, моделирование.

Аннотация. В работе систематизированы современные технологии переработки техногенных месторождений, отходов горно-обогатительных и других предприятий, включая использование высокоградиентных магнитных сепараторов и передвижных обогатительных комплексов. Определены инновационные подходы, направленные на повышение эффективности извлечения ценных компонентов и оптимизацию конструкций оборудования с применением методов моделирования.

MODERN APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC DEPOSITS: TECHNOLOGIES, EQUIPMENT, PROSPECTS

Stepanov D.V.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: technogenic deposits, modular processing complexes, mobile factories, high-gradient magnetic separation, matrices, modeling.

Abstract. The paper systematizes modern technologies for processing man-made deposits, waste from mining and processing plants and other enterprises, including the use of high-grade magnetic separators and mobile processing complexes. Innovative approaches aimed at increasing the efficiency of extracting valuable components and optimizing equipment designs using modeling methods have been identified.

Современные горнодобывающие и перерабатывающие предприятия повсеместно сталкиваются с проблемами накопления отходов недропользования и отсутствия комплексных методов их отработки.

В работах [1, 2] авторами рассматривается вопрос отсутствия эффективных технологий и оборудования для отработки техногенных месторождений, и обосновывается стратегическая государственная необходимость внедрения новых решений для развития данной отрасли.

В последнее время рассматриваются вопросы вовлечения в переработку основных отходов машиностроительных предприятий [3]. Особое внимание уделяется возрастающей роли машин и агрегатов в оптимизации технологических процессов для современных производств.

Создание эффективных машин и механизмов требует детального инженерного анализа проектируемых объектов с применением специализированного программного обеспечения. Этот подход обеспечивает возможность принимать обоснованные и тщательно проработанные

конструктивные решения. В научных изысканиях значительное место занимают вычислительные эксперименты и методы компьютерного моделирования [4].

Магнитная сепарация с использованием поля с высоким градиентом напряженности является экологичным, простым и эффективным методом извлечения слабомагнитных тонкоизмельченных минералов из техногенных месторождений, однако об успешном практическом применении данного метода в настоящее время неизвестно [5].

Цель данной работы заключается в систематизации данных в области применения различных комплексов и оборудования, в том числе высокоградиентных магнитных сепараторов (ВГМС), для переработки промышленных отходов и определении способов развития и оптимизации конструкций с применением инструментов моделирования.

Современные технологии отработки техногенных месторождений характеризуются высокой сложностью, значительными затратами и необходимостью доработки, что значительно замедляет их внедрение. Для эффективного освоения таких месторождений необходим комплексный подход, направленный на реализацию инновационных технологий [6].

Модульные обогатительные комплексы (МОК) решают ключевые проблемы объектов недропользования, такие как удаленность, отсутствие дорог и электросетей [7].

Современные установки МОК, оснащенные улучшенными схемами обогащения, позволяют эффективно перерабатывать некондиционное и техногенное сырье. Модульная конструкция объединяет различные процессы переработки, что обеспечивает их мобильность, автономность и высокую производительность. Практическое использование подтверждает их способность повышать степень извлечения ценных веществ и оптимизировать переработку сырья. Такие комплексы, от компактных установок до полноценных фабрик, разрабатываются как отечественными, так и зарубежными компаниями [8].

Среди мировых компаний, занимающихся производством обогатительных установок, стоит отметить Sala International (Швеция), Humholdt Wedag (Германия), Rauma Repola (Финляндия), Goldfield Enjineering and Machine Works (США), Vardax Consultans (США), Knelson Intern (Канада). Среди отечественных компаний, разрабатываемых модульные комплексы можно выделить «Механобр» и ряд других организаций (Хозмехобр, СКБ ТОМ г. Нов Новосибирск, ВНИИХТ, Институт горного дела Севера СО РАН, ОАО «ПО Усольмаш» и др.) [8, 9].

В работе [10] было проведено исследование по результатам работы обогатительного комплекса ОКВ-100 на отвалах месторождения Юрское. Технологическая схема комплекса включает процессы дезинтеграции, грохочения и методы гравитационного обогащения. По результату опробования данного модуля извлечение золота составило 19,07%, что является высоким показателем и обосновывает возможность применения данной технологии для отработки техногенных месторождений золота.

Таким образом, гравитационные методы обогащения нашли широкое применение в МОК. Магнитная сепарация ранее не использовалась в составе комплексов, поскольку имела ряд ограничений (низкая эффективность

извлечения слабомагнитных минералов и тонких классов), однако в современных конструкциях ВГМС данные недостатки были устранены [11].

В работе [11] авторами определены 4 главных этапа совершенствования зарубежных конструкций ВГМС. Данное определение может быть использовано для описания поколений оборудования (рис. 1).



Рис. 1. Классификация конструкций ВГМС по поколениям

Интерпретация данных, представленных на рисунке 1, позволяет сделать вывод о том, что в современных конструкциях ВГМС решена проблема засорения матрицы, а также повышена селективность процесса. Материалы могут быть полезны для обоснования возможности применения ВГМС в составе комплекса для переработки техногенных месторождений.

В работах [12, 13] обосновывается возможность применения ВГМС для переработки золошлаковых отходов и хвостов ГОКов.

Особое внимание в последнее время уделяется методам и инструментам оптимизации отдельных узлов ВГМС. В работах [14, 15] моделирование магнитных матричных полей осуществляется в программах COMSOL Multiphysics и Ansys Maxwell. Исследования направлены на подбор оптимальных параметров конструкции (форма сечения элементов матриц, размер стержней, расстояние между стержнями).

Данные материалы могут быть использованы для обоснования разработки и внедрения новых конструкций матриц в ВГМС.

Таким образом, современные горнодобывающие и перерабатывающие предприятия решают задачи переработки техногенных месторождений и отходов с помощью инновационных технологий, таких как передвижные обогащительные комплексы и высокоградиентные магнитные сепараторы (ВГМС). Современные разработки ВГМС обеспечивают высокую эффективность извлечения ценных компонентов и сокращение экологического воздействия.

Автор выражает благодарность научному руководителю, зав. каф. ОПИ Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, д.т.н., профессору Александровой Татьяне Николаевне.

Список литературы

1. Зворыкина Ю.В., Будина Т.С., Кайманаков И.С. Управление отходами недропользования в Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации // Горная промышленность. – 2024. – №5. – С. 59-65.
2. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the Role of the State in the Management of Mineral Resources // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 259, 95-111.
3. Maksarov V.V., Khalimonenko A.D., Olt J.J. Improvement of efficiency of metal recycling in metallurgical production // Chernye Metally. 2021, vol. 1, no. 3, pp. 45-51.
4. Теплякова А.В., Алиева Л.А., Жуков И.А. Компьютерное моделирование динамических процессов в элементах бурильных машин ударного действия // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №19. – С. 161-171.
5. Pelevin A.E., Shigaeva V.N. The potential of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore tailings // Obogashchenie Rud. 2022, no. 2, pp. 46-52.
6. Рыжова Л.П., Носова Е.В. К вопросу эффективности отработки техногенных месторождений рудных полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №8. – С. 49-55.
7. Чичерина А.Г. Модульные обогатительные комплексы – мобильное решение актуальных задач недропользования // Рациональное освоение недр. – 2012. – №2. – С. 60-61.
8. Секисов Г.В., Костромина И.В., Зыков Н.В., Якимов А.А. Мобильные агрегаты и передвижные обогатительные установки для переработки минерального сырья при эксплуатации рудных карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 9. – С. 272-276.
9. Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е., Винокурсов В.П. Разработка модульных установок – новое направление в технологии переработки и обогащения золото-содержащих руд // Наука и техника в Якутии. – 2002. – №1(2). – С. 21-24.
10. Прокопьева С.А., Прокопьев Е.С., Кадесников И.В., Черимичкина Н.А. Актуальные способы отработки техногенных россыпных месторождений золота с технологией извлечения мелкого золота // Науки о Земле и недропользование. – 2020. – Т. 43, №4(73). – С. 458-466.
11. Hu Z., Xue Z., Wand Yu., Lu D. Pulsation curves strengthen the high gradient magnetic separation Consideration of separation performance // Minerals Engineering. 2024, vol. 205, p. 108480.
12. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D. Increase in Recovery Efficiency of Iron-Containing Components from Ash and Slag Material (Coal Combustion Waste) by Magnetic Separation // Minerals. 2024, vol. 14, no. 2, p. 136.
13. Pelevin A.E., Shigaeva V.N. The potential of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore tailings // Obogashchenie Rud. 2022, no. 2, pp. 46-52.
14. Ren L., Zeng S., Zhang Y. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software // International Journal of Mining Science and Technology. 2015, vol. 25, no. 3, pp. 479-487.
15. Yi F., Chen L., Zeng J. Combinatorial optimization of rotating matrix in centrifugal high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2023, vol. 202, p. 108309.

Сведения об авторе:

Степанов Дмитрий Владимирович – аспирант.

РУДНИЧНЫЕ ПОДЪЕМНЫЕ УСТАНОВКИ: СОСТОЯНИЕ И ВЕКТОР РАЗВИТИЯ

Решетняк С.Н., Митькин Р.В.

*Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
Москва*

Ключевые слова: рудничная подъемная установка, электропривод, преобразователь частоты, синхронный реактивный двигатель, многоканатная подъемная установка.

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы и перспективы развития рудничных подъемных установок. Отмечены недостатки как относительно новых, так и старых установок, которые работают за пределами нормативных сроков службы. Подчеркивается влияние зарубежных производителей, затрудняющих техническое обслуживание и поставку критически важных комплектующих. Анализируются основные направления модернизации, включая переход на современные электроприводы, отказ от башенного размещения в пользу наземного и широкое внедрение многоканатных подъемных машин при больших глубинах шахт. Показывается, что индивидуальный подход к созданию подъемных установок под конкретные условия эксплуатации обеспечивает повышение надежности, снижение энергопотребления и капитальных затрат. Особое внимание уделяется успешным примерам реконструкции и новым решениям, реализованным на рудниках «Таймырский», «Октябрьский» и «Скалистый» ПАО «ГМК «Норильский никель». На основе этого формулируются рекомендации по дальнейшему совершенствованию шахтного подъема и возможностям импортозамещения в отрасли.

MINE LIFTING INSTALLATIONS: STATE AND DEVELOPMENT VECTOR

Reshetnyak S.N., Mitkin R.V.

National Research Technological University MISIS, Moscow

Keywords: mine lifting unit, electric drive, frequency converter, synchronous reluctance motor, multirope winding plant.

Abstract. The article discusses the problems and prospects of mine lifting equipment development. The disadvantages of both relatively new and old installations that operate beyond the standard service life are noted. The influence of foreign manufacturers is emphasized, making it difficult to maintain and supply critical components, which leads to an increase in production costs and downtime. The main directions of modernization are analyzed, including the transition to modern electric drives, the abandonment of tower placement in favor of ground-based and the widespread introduction of multi-channel lifting machines at great depths of mines. It is shown that an individual (project-oriented) approach to the creation of lifting installations for specific operating conditions ensures increased reliability, reduced energy consumption and capital costs. Special attention is paid to successful reconstruction examples and new solutions implemented at the Taimyrsky, Oktyabrsky and Skalisty mines of Nor Nickel. Based on this, recommendations are formulated for further improvement of mine lifting and import substitution opportunities in the industry.

Современное состояние рудничных подъемных установок

Новые подъемные установки, смонтированные в ходе реконструкций в 2000-2015 годах соответствуют всем современным требованиям, но большинство из них спроектированы и изготовлены за рубежом, так как в России производство подъемных установок в стране не было организовано [1].

На действующие в России шахты и рудники поставлялись ПУ компаниями из Германии, Швейцарии, Украины. Это негативно отразилось на себестоимости добычи полезных ископаемых и затруднило возможность модернизации оборудования [1]. Иностранные компании (“MT S.I.M.AG” (Швейцария) - управляющая (проектами) компания, “SIEMAG M-TEC2 ” (Германия) - фирма изготовитель горного оборудования (подъемные машины, скипы и клетки, шкивы, и др.), “Elpro GmbH” (Германия) - фирма-интегратор электрооборудования и средств автоматизации, “SIEMENS AG” – поставщик электрооборудования и средств автоматизации) [2] отказались официально производить ремонт и наладку оборудования, а также поставлять футеровку для шкивов и барабанов, головные и направляющие канаты и прочие быстроизнашиваемые элементы. Стабильную работу ПУ обеспечивают такие компании, как «Северсталь» (канаты), «Уралмашзавод» (новые ПУ), а «КЗГО» (скипы, подвесные устройства, коуша и т.д.).

Старые подъемные установки со сроком эксплуатации более 25 лет на территории рудников «Норникеля» в настоящее время 40% от общего числа. И все же, предпочтение отдается продолжению эксплуатации, ремонту и модернизации. При продолжении эксплуатации ограничиваются такие параметры, как скорость движения подъемных сосудов, количество часов работы подъемной установки в сутки и уменьшение количества поднимаемого груза [1], так как разрушаются базовые структурные единицы: коренной вал, оболочки и лобовина барабана. Например, на воздухоподающем стволе (ВПС) рудника «Таймырский», где установка эксплуатируется с 1974 года.

Даже при модернизации старые ПУ не соответствуют современным требованиям по грузоподъемности, максимальной скорости, увеличения глубин шахт, увеличения диапазона регулирования частоты вращения двигателей [3], так как используются устаревшие электропривода на базе асинхронных двигателей с фазным ротором (АДФР).

Электропривод постоянного тока является наиболее распространенным на данный момент в РФ и «Норникель» не является исключением. Данный вид привода применяется на клетевых стволах (КС) КС-1, КС-2, скиповых стволах (СС) СС-1, СС-2 (рудник «Октябрьский») и КС-3 (рудник «Таймырский»). Внедрение новых электроприводов постоянного тока в настоящее время хотя и не носит массовый характер, однако присутствует на рынке и зависит от предпочтений заказчика. При реконструкции подъемных установок СС-1 «Юг» и СС-2 «Север» принято решение заменить существующие двигатели постоянного тока на аналогичные. Применение новых ПУ с приводом постоянного тока, несмотря на его преимущества, ограничивается следующими моментами: трудоемкость в изготовлении и обслуживании двигателя постоянного тока; сокращение компаний, производящих электродвигатели постоянного тока высокого качества [4].

В отличие от отечественных производителей, иностранные компании повсеместно применяют систему непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) – синхронный двигатель (СД). По сравнению с системой «тиристорный преобразователь–двигатель постоянного тока» (система ТП-ДПТ): более высокий

КПД (0,93 против 0,88...0,91); уменьшение эксплуатационных затрат и повышение надёжности; повышенная перегрузочная способность в нештатных ситуациях; меньший момент инерции (в 1,2-1,8 раз); нет конструктивных ограничений при возрастании номинальных значений мощности и момента, отпадает необходимость применения при больших мощностях двухдвигательного привода [4].

Все приведенные выше двигатели имеют один общий недостаток – для их работы необходим непосредственный контакт с ротором, что приводит к нагреву, дополнительному сопротивлению в месте контакта и потере энергии, искрению и риску пожара, а также требует постоянного обслуживания и периодической замены.

Перспективы развития рудничных подъемных установок

Синхронные реактивные двигатели (СРД) и асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором лишены вышеупомянутого недостатка, а также не отстают по ключевым критериям по сравнению с традиционными синхронными двигателями. Кроме того, обе конструкции характеризуются отсутствием контактно-щёточных узлов, что упрощает техническое обслуживание и повышает надёжность в условиях высоких вибрационных и ударных нагрузок. Они обладают высоким КПД: современные мощные АД с короткозамкнутым ротором, выполненные с применением последних технологий изготовления ротора и использованием высококачественных материалов (электротехнической стали и меди), могут достигать КПД в диапазоне 92...96%, что сопоставимо с синхронными двигателями с контактной системой возбуждения. СРД также демонстрируют высокий уровень КПД, особенно при корректном выборе конструкции ротора и оптимизированных алгоритмах управления. При мощности в 750 Вт значение достигает 84%, АД – 80% [5]. Дополнительным преимуществом является простота конструкции: у СРД полностью отсутствуют обмотки или магниты на роторе (или они сведены к минимуму в вариантах с частичной магнитной поддержкой), а АД с короткозамкнутым ротором имеют проверенную временем конструкцию. Несмотря на то, что в настоящее время сложно найти примеры применения высокомошных (несколько мегаватт) АД и СРД в рудничных подъемных установках, особенно в случае тихоходных двигателей с числом пар полюсов 16-20, уже существуют отдельные проекты, подтверждающие перспективность таких решений: применение СРД мощностью 500 кВт для мотор-колёс карьерного самосвала и 2 МВт для морского буксира [6], а также группового электропривода магистрального конвейера КЛМ-4500, где СРД обеспечивают суммарную установленную мощность 21,25 МВт [7]. Эти примеры свидетельствуют о возможностях высокоэффективного и надёжного функционирования данных типов двигателей и позволяют говорить о хороших перспективах их дальнейшего внедрения в шахтные подъёмные комплексы.

Если говорить о шахтном подъёмном комплексе, то в мире сложилась тенденция развития по пути отказа от стандартизированных типоразмеров подъемных машин, и создания оборудования, привязанного к конкретным условиям эксплуатации. Данная стратегия уже доказала свою эффективность за рубежом и на территории России [8]. Отличным примером служит новый скипо-

клетевой ствол СКС-1 рудника «Скалистый». Там применяются скиповая подъемная установка с СД мощностью 8,6 МВт по системе Блейера и клетевая подъемная установка с СД мощностью 2,2 МВт с канатоведущим шкивом, расположенным на нулевой отметке. Приоритетным направлением является разработка многоканатных подъемных машин, в связи с постоянным углублением горных работ [9]. Многоканатный подъем имеет ряд неоспоримых преимуществ перед одноканатным подъемом: более приемлемая динамика подъема и, как следствие, меньшее энергопотребление, гораздо меньшие габаритные размеры и в целом меньшие капитальные затраты на строительство и эксплуатацию подъемного комплекса [8].

Также, при проектировании СКС-1 отказались от строительства железобетонного башенного копра. Существенным преимуществом такого расположения ПУ являются значительно низкие силовые нагрузки, действующие на коренной вал и подшипниковые опоры по сравнению с башенным расположением, что ведет к снижению массогабаритных показателей.

Заключение

Таким образом, анализ состояния и путей совершенствования рудничных подъемных установок показывает, что дальнейшее развитие данной отрасли будет определяться необходимостью обеспечения безотказной и экономически оправданной работы глубоких шахт и рудников в условиях возрастания требований к производительности и безопасности. Существующие установки нуждаются либо в продлении ресурса при ограничении ключевых параметров, либо в реконструкции, предполагающей использование новых типов электроприводов, а также переход к многоканатным схемам.

Отказ от башенных копров и внедрение наземного размещения подъемных машин, как демонстрируют проект ствола СКС-1 и ряда других объектов, позволяет снизить капитальные затраты и упростить эксплуатацию ПУ. Перспективной стратегией является изготовление оборудования, приспособленного к конкретным условиям месторождения. Реализация данных подходов позволит создать высокоэффективные и надёжные подъемные установки, способные удовлетворить потребности горной промышленности России на долгосрочную перспективу.

Список литературы

1. Смирных К.В., Бычкова Н.С., Гриневич М.А., Вяткин А.А., Юнышев Л.В. Освоение производства шахтоподъемных машин на ПАО «Уралмашзавод» // Горная промышленность. – 2018. – № 2 (138). – С. 22-23.
2. Дацковский Л.Х., Роговой В.И., Кузнецов И.С., Кузьмин И.А., Вайнштейн П.Г., Бирюков А.В. Электропривод шахтных подъемных машин // Электротехника. – 2010. – № 1. – С. 25-42.
3. Петраковский А.С. О процессе реконструкции подъемных установок // Горное оборудование. – 2010. – № 12. – С. 173-175.
4. Абрамов Б.И., Иванов А.Г., Шиленков В.А., Кузьмин И.К., Шевырёв Ю.В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5-2. – С. 145-162.
5. Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Казакбаев В.М., Поздеев А.С., Ошурбеков С.Х., Михалицын А.Ф. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного

- электродвигателей // ЭПТТ 2015: материалы конференции. Екатеринбург, 5-9 октября 2015 г. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. – С. 19-22.
6. Птах Г.К., Евсин Н.Ф., Яковенко А.Е., Звездунов Д.А., Мустафаев Р.Р., Шаповалов В.С. Опыт разработки и внедрения тягового вентильно-индукторного реактивного двигателя для мотор-колёс карьерного самосвала серии БелАЗ-7513 // X Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С. 202-208.
 7. Птах Г.К., Коновалов С.А., Мустафаев Р.Р., Рожков Д.В., Яковенко А.Е. Модернизация групповых электроприводов 15 км магистрального ленточного конвейера КЛМ-4500 на базе вентильно-индукторных двигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 5. – С. 47-56.
 8. Попов Ю.В., Неволин В.В. Основные закономерности поведения струны каната при наземном расположении многоканатных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 18. – С. 312-317.
 9. Попов Ю.В., Тимухин С.А., Сайпуллаев А.А., Касимов А.А., Некрасов Н.Ю. Некоторые вопросы разработки шахтных подъемных машин нового поколения и проектирования на их основе комплексов подъемов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – № 1(29). – С. 56-58.

Сведения об авторах:

Решетняк Сергей Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности»;

Митькин Роман Виталиевич – аспирант.

НОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН УДАРНО-ПОВОРОТНЫМ СПОСОБОМ

Алиева Л., Жуков И.А.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: бурение, буровой инструмент, буровая коронка, твердосплавная вставка, индентор, синусоида, эффект simultaneity.

Аннотация. Буровые коронки с твердосплавными инденторами широко применяются для разрушения горных пород средней и высокой крепости благодаря их высокой эффективности и надёжности. Основные параметры конструкции, такие как геометрия породоразрушающей поверхности и схема размещения инденторов, определяют производительность и энергоёмкость бурового процесса. В представленной работе предложена новая конструкция буровой коронки с породоразрушающей поверхностью, образованной вращением синусоиды, и твердосплавными инденторами, размещёнными по концентрическим окружностям. Разработанное техническое решение позволяет повысить эффективность разрушения породы, улучшить очистку забоя скважины и снизить энергоёмкость процесса бурения.

NEW TECHNICAL SOLUTION FOR A BLADE-FREE TOOL FOR DRILLING WELLS IN A ROTARY-IMPACT MANNER

Alieva L., Zhukov I.A.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: drilling, drilling tool, drill bit, hard-alloy pin, indenter, sine wave, effect of simultaneity.

Abstract. Drill bits with carbide indenters are widely used to destroy rocks of medium and high strength due to their high efficiency and reliability. The main design parameters, such as the geometry of the rock-breaking surface and the layout of the indenters, determine the productivity and energy intensity of the drilling process. In this paper, a new design of a drill bit with a rock-breaking surface formed by the rotation of a sine wave and carbide indenters arranged in concentric circles is proposed. The developed technical solution makes it possible to increase the efficiency of rock destruction, improve the cleaning of the bottom of the well and reduce the energy intensity of the drilling process.

Механическое бурение шпуров и скважин остаётся наиболее часто применяемым методом разрушения горных пород, несмотря на появление и развитие других технологий. Его широкое применение в горной промышленности подчёркивает важность повышения эффективности буровых машин и их компонентов. Решение данной задачи во многом связано с внедрением инновационных разработок и научных подходов.

Оборудование, используемое для бурения пород средней и высокой крепости, например, погружные или выносные пневмоударники и перфораторы, работает на основе принципа ударного либо комбинированного ударно-поворотного воздействия [1, 2]. Для выполнения таких операций необходим инструмент, конструкция которого не предполагает острых режущих кромок. Этот тип инструмента известен как безлезвийный и представлен штыревыми буровыми коронками.

Различные конструктивные варианты безлезвийных буровых коронок создаются в зависимости от области их применения: они адаптируются к типу используемых буровых машин и специфике горных пород [3]. Это разнообразие обусловлено необходимостью обеспечения максимальной эффективности в условиях различных горно-геологических сред.

Буровые коронки различаются по типам исполнения рабочей поверхности, что напрямую связано с их функциональным назначением и условиями эксплуатации. Основные типы рабочих поверхностей следующие.

- Плоская поверхность, обеспечивающая равномерное распределение нагрузки по всей площади контакта. Это решение оптимально для мягких, трещиноватых и слабо связанных пород.

- Выпуклая поверхность, которая обеспечивает концентрацию ударной нагрузки в центральной части буровой скважины. Такой тип конструкции наиболее эффективен при работе с породами высокой прочности.

- Вогнутая поверхность, способствующая направленному разрушению породы и стабилизации коронки в буровой скважине. Этот тип часто используется для бурения пород средней крепости и при необходимости минимизировать отклонения от траектории.

- Вогнуто-выпуклая поверхность, которая сочетает преимущества обоих типов. Такая конструкция позволяет направлять основные усилия на периферийные зоны контакта, что увеличивает глубину проникновения коронки в породу, а также стабилизирует инструмент в скважине.

Каждая из указанных геометрических форм имеет свои преимущества и ограничения, которые учитываются при проектировании и выборе коронок для конкретных горно-геологических условий. Оптимизация рабочей поверхности играет ключевую роль в повышении производительности бурового оборудования, снижении износа инструмента и улучшении устойчивости процесса бурения скважин.

С целью уменьшения энергоемкости процесса бурения, повышения эффективности разрушения породы и улучшения очистки забоя скважины от буровой мелочи авторами предложено новое техническое решение безлезвийного бурового инструмента, защищенное патентом РФ на изобретение (№2801724, опубл. 15.08.2023).

Предлагаемая буровая коронка (рис. 1) состоит из корпуса 1 с породоразрушающей поверхностью 2, на которой расположены отверстия для установки твердосплавных инденторов 3. В центральной части корпуса предусмотрено сквозное отверстие 4, выполняющее роль канала для подачи воздуха или жидкости. Породоразрушающая поверхность 2 создаётся путём вращения относительно продольной геометрической оси коронки синусоиды 5, описываемой в прямоугольной системе координат уравнением

$$y = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{3\pi}{D} x - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

где D – диаметр коронки; H – глубина вогнутой части.

Глубина вогнутой части синусоиды составляет от 0,15 до 0,20 диаметра коронки. Такой диапазон позволяет избежать избыточных нагрузок на инденторы

при больших углах наклона, а также обеспечивает их надёжное закрепление в отверстиях. Твердосплавные инденторы 3 расположены равномерно по трём concentрическим окружностям 6, которые проходят через вершины и точки перегиба синусоиды. Количество инденторов на каждой окружности определяется по формуле, учитывающей порядок расположения окружности относительно центра коронки.

$$z = 6 \cdot k, \quad (2)$$

где z – количество твердосплавных инденторов; k – порядковый номер concentрической окружности при отсчете от центра коронки.

Такой подход обеспечивает разрушение породы не только под самими инденторами, но и в пространстве между соседними инденторами. Если количество инденторов меньше необходимого, то разрушение породы в промежутках становится недостаточным, а при увеличении числа инденторов возникает пересечение отверстий, что затрудняет их жёсткую установку.

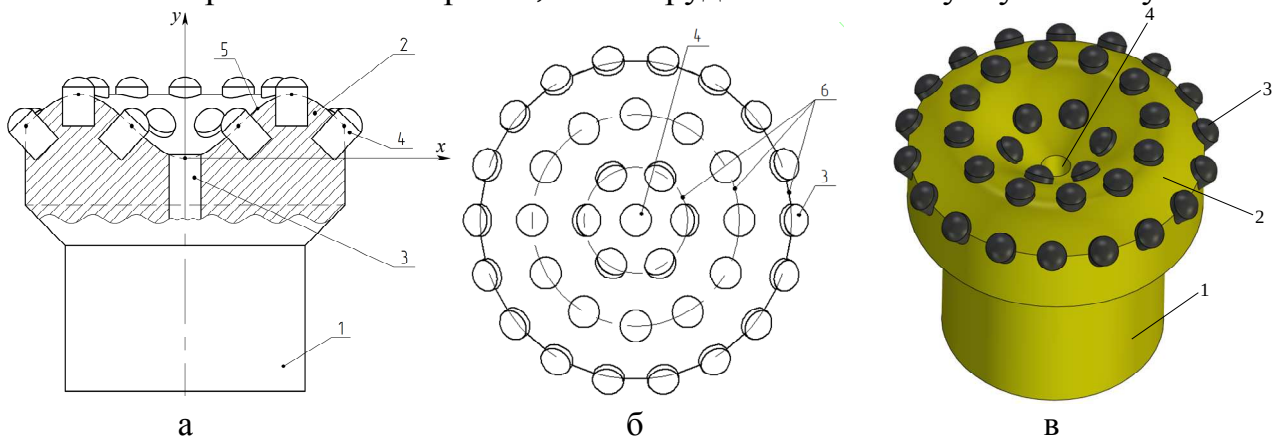


Рис. 1. Буровая коронка: а – общий вид; б – схема установки инденторов; в – 3D-модель

Установлено, что диаметр инденторов d должен находиться в пределах от 6,58 до 9,12 раз меньше диаметра коронки D . Этот диапазон был выбран с целью обеспечить оптимальное взаимодействие зон разрушения инденторами горной породы (эффект симультанности) и избежать проблем, связанных с их размещением. Если размер инденторов превышает верхний предел ($d > D / 6,58$), отверстия для их установки начинают пересекаться, что снижает прочность конструкции и увеличивает риск её разрушения. Напротив, при диаметре меньше нижнего значения ($d < D / 9,12$) зоны взаимного разрушения отсутствуют, что существенно снижает эффективность бурового процесса.

Эффективность бурения штыревыми коронками горной породы во многом определяется взаимодействием твердосплавных вставок с породой. Ключевым аспектом этого взаимодействия является эффект симультанности, проявляющийся в суперпозиции полей напряжений, возникающих при одновременном воздействии несколькими инденторами.

Экспериментально установлено, что условие взаимовлияния зон разрушения выполняется, когда отношение расстояния l_u между точками контакта соседних твердосплавных инденторов с горной породой и диаметра инденторов d меньше или равно 1,7. В то же время, указанное условие

выполняется только в диапазоне диаметров инденторов от 6,58 до 9,12 раз меньше диаметра коронки.

Таким образом, разработанная буровая коронка обеспечивает уменьшение энергоёмкости процесса бурения за счет выполнения рабочей поверхности в виде синусоиды и обеспечения эффекта simultaneity. Благодаря рациональной геометрической форме рабочей поверхности также происходит улучшение очистки забоя скважины. Таким образом, представленное решение позволяет повысить производительность бурения, что делает конструкцию бурильной машины ударно-поворотного действия более надёжной и эффективной в условиях работы с горными породами средней и высокой крепости.

Список литературы

1. Сысоев Н.И., Гринько А.А., Гринько Д.А. Обоснование структуры и рациональных конструктивных параметров перфоратора с винтовым рабочим ходом бурового инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 7. – С. 113-124. – doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_113.
2. Гринько А.А., Сысоев Н.И., Гринько Д.А. Повышение эффективности процесса сколообразования при ударно-поворотном воздействии долота на горную породу // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 102-115. – doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-102-115.
3. Карпов В.Н., Конурин А.И., Орлов Карпов Д.В. Опыт и перспективы применения способов исследования процессов механического разрушения горных пород при бурении скважин // Техника и технология горного дела. – 2024. – №2(25). – С. 41-78. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-2-41-78.

Сведения об авторах:

Алиева Лейла – аспирант;

Жуков Иван Алексеевич – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения.

СПОСОБ ВСТРАИВАНИЯ БОЙКОВ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КОРПУСА ГИДРО-, ПНЕВМОМОЛОТОВ

Азимов А.М., Храпенкова Е.С.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: горная порода, гидромолот, пневмомолот, боек, ударный узел, ударный импульс, энергоэффективность.

Аннотация. Задача встраивания бойков, выполненных в форме тел вращения с криволинейной образующей боковой поверхности, обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности процесса дробления негабаритов горной породы гидравлическими и пневматическими молотами. Решение поставленной задачи достигается путем оснащения бойка цилиндроконической оболочкой и центральным отверстием, обладающими одинаковым объемом. Предлагаемый способ обеспечивает сохранение ударного импульса генерируемого исходным бойком.

EMBEDDING METHOD FOR ANVIL-BLOCKS WITH A CURVED FORMING SIDE SURFACE INTO A CYLINDRICAL HOUSINGS OF HYDRAULIC AND PNEUMATIC HAMMERS

Azimov A.M., Khrapenkova E.S.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: rock, hydraulic hammer, pneumatic hammer, anvil-block, impact unit, impact impulse, energy efficiency.

Abstract. The task of embedding the anvil-blocks made in the form of bodies of rotation with a curved forming side surface is due to the need to increase the energy efficiency of the crushing process of irregular rocks with hydraulic and pneumatic hammers. The solution to this problem is achieved by equipping the anvil-block with a cylindrical conical shell and a central hole with the same volume. The proposed method ensures the preservation of the impact impulse generated by the initial anvil-block.

Технологический процесс добычи твердых полезных ископаемых включает в себя операцию дробления негабаритов. Их появление обусловлено проведением буровзрывных работ. Негабаритные куски горной породы препятствуют их транспортировке и дальнейшему измельчению. В таких условиях первичное дробление негабаритов осуществляется машинами с навесным оборудованием [1, 2], представленным гидравлическими или пневматическими молотами. Однако дробление горной породы высокой крепости сопряжено с увеличением энергоемкости процесса, частому выходу из строя породоразрушающего инструмента и элементов ударной системы.

Повышение эффективности разрушения горной породы гидро-, пневмомолотов может быть достигнуто генерированием в инструменте ударного импульса, соответствующего силам сопротивления породы разрушению.

Анализ традиционных конструкций ударных узлов гидро-, пневмомолотов свидетельствует о том, что форма применяемых в них бойков, как правило, цилиндрическая с постоянным поперечным сечением, и лишь в некоторых случаях с коническими участками. Многочисленными исследованиями доказано, что применение бойков такой формы не позволяет решить задачу создания ударного импульса, соответствующего свойствам разрушаемого объекта.

Зависимость силы сопротивления горной породы высокой крепости от глубины внедрения инструмента носит линейный характер. При таких условиях ударный импульс должен обладать амплитудой, нарастающей по закону, близкому к линейному. Боек, генерирующий такой ударный импульс, обладает переменным поперечным сечением. Боковая поверхность бойка при этом описывается кривой линией, например, гиперболой или трактрисой.

Однако установка бойков с криволинейной образующей боковой поверхностью в существующие гидро-, пневмомолоты, без внесения конструктивных изменений, невозможна. Самым простым решением проблемы встраивания бойков, выполненных в форме тела вращения какой-либо кривой, является добавление цилиндрической ступени [3], обеспечивающей устойчивое положение бойка в корпусе машины. Но добавление цилиндрической ступени приводит к изменению параметров ударного импульса, падению его максимального значения.

С целью сохранения ударного импульса, генерируемого исходным бойком заданной формы, разработано новое техническое решение конструкции бойка, защищенное патентом РФ №221725 от 21.11.2023 г. (авторы: Жуков И.А., Азимов А.М.). Проблема встраивания бойка, выполненного в форме тела вращения с криволинейной образующей боковой поверхности, решается путем оснащения бойка цилиндроконической оболочкой и центральным глухим отверстием, объемы которых имеют одинаковое распределение по длине бойка.

Известно [4], что параметры ударного импульса определяются и полностью зависят от геометрической формы бойка, а именно от распределения его объема по длине. Следовательно, бойки машин ударного действия, имеющие разную геометрическую форму, но одинаковую длину и идентичное распределение объема по длине, генерируют в рабочем инструменте машины идентичные ударные импульсы.

Покажем условие идентичности исходного бойка (рис. 1), образованного вращением какой-либо кривой вокруг геометрической оси, и бойка (рис. 2), выполненного по патенту РФ №221725.

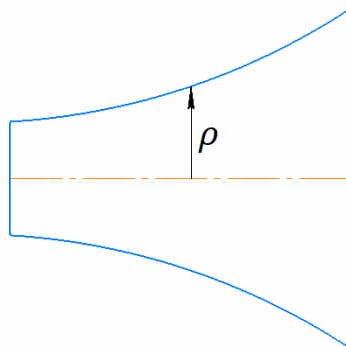


Рис. 1. Исходный цельнотелый боек

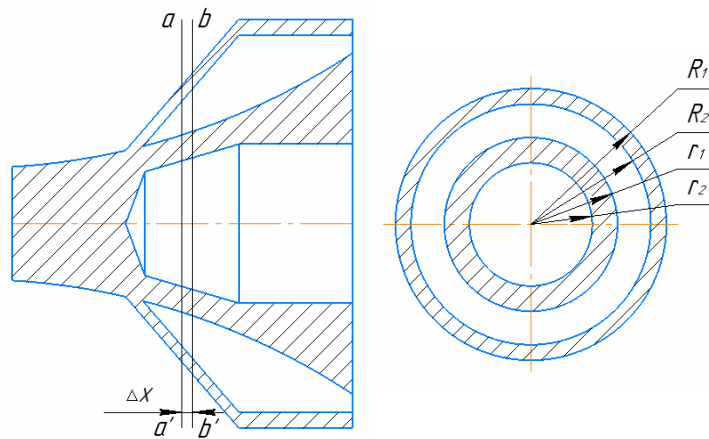


Рис. 2. Боек с цилиндроконической оболочкой

В поперечном сечении (рис. 2) любого вырезанного элементарного слоя $a-a'$, $b-b'$ толщиной Δx имеются выполненные из однородного материала кольцо, образованное поршневой частью, представленной в виде цилиндроконической оболочки, и кольцо, образованное ударной частью, представленной в виде тела вращения той же кривой, что в исходном бойке.

Площадь кольца, образованного поршневой частью бойка:

$$S_1 = \pi(R_1^2 - R_2^2), \quad (1)$$

где R_1 – радиус внешней окружности кольца, образованного поршневой частью бойка; R_2 – радиус внутренней окружности кольца, образованного поршневой частью бойка.

Площадь кольца, образованного ударной частью бойка:

$$S_2 = \pi(r_1^2 - r_2^2), \quad (2)$$

где r_1 – радиус внешней окружности кольца, образованного ударной частью бойка; r_2 – радиус внутренней окружности кольца, образованного ударной частью бойка.

Объем слоя, выделенного в поршневой части:

$$V_1 = S_1 \cdot \Delta x. \quad (3)$$

Объем слоя, выделенного в ударной части:

$$V_2 = S_2 \cdot \Delta x. \quad (4)$$

Площадь поперечного сечения бойка (рис. 1), выполненного в форме тела вращения, образующая боковой поверхности которого описывается в общем виде какой-либо функцией ρ :

$$S_3 = \pi\rho^2. \quad (5)$$

Объем элементарного слоя, выделенного в бойке, приведенном на рисунке 1:

$$V_3 = S_3 \cdot \Delta x. \quad (6)$$

Для обеспечения условия идентичности бойков, приведенных на рисунках 1 и 2, по генерируемому ими импульсу, между ними устанавливается связь в виде:

$$V_1 + V_2 = V_3. \quad (7)$$

Откуда согласно (1)-(6):

$$\pi(R_1^2 - R_2^2) + \pi(r_1^2 - r_2^2) = \pi\rho^2. \quad (8)$$

С учетом того, что ударная часть бойка, приведенного на рисунке 2, представляет собой тело вращения, образующей которого является вогнутая кривая с радиусом ρ , справедливо равенство:

$$r_1 = \rho. \quad (9)$$

Тогда формула (8) с учетом (9) примет вид:

$$\pi(R_1^2 - R_2^2) = \pi r_2^2. \quad (10)$$

Очевидно, что радиус r_2 внутренней окружности кольца, образованного ударной частью бойка (рис. 2), одновременно является радиусом окружности, образованной центральным глухим отверстием, площадь поперечного сечения которого определяется формулой:

$$S_4 = \pi r_2^2. \quad (11)$$

Тогда из (1), (10), (11) следует, что:

$$\begin{aligned} S_1 &= S_4, \\ S_1 \cdot \Delta x &= S_4 \cdot \Delta x, \\ V_1 &= V_4. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, боек, состоящий из жестко соединенных между собой поршневой части и ударной части, поршневая часть которого выполнена в виде цилиндроконической оболочки, а ударная – в форме тела вращения какой-либо кривой, в которой выполнено центральное глухое отверстие, площадь которого равна площади цилиндроконической оболочки в любом поперечном сечении по длине бойка, и цельнотелый боек, выполненный в форме вращения этой же кривой, имеют идентичное распределение объема по длине бойка и, следовательно, генерируют в рабочем инструменте машины идентичные ударные импульсы. При этом наличие поршневой части, в виде цилиндроконической оболочки обеспечивает бойку устойчивое положение в корпусе ударной машины.

Очевидно, что предложение исполнения конструкции бойка требует дополнительного анализа соотношений геометрических размеров элементов бойка с целью обеспечения достаточных прочностных характеристик.

В качестве примера на рисунке 3 показаны результаты анализа напряженно-деформированного состояния бойка с боковой поверхностью ударной части, образованной вращением трактрисы. Боек соответствует условию прочности по коэффициенту запаса при наложении нагрузки равной максимальной величине ударного импульса 62,5кН, генерируемого бойком, обладающим массой и предударной скоростью, соответствующих одному из типовых вариантов гидромолота. Сопоставимые значения коэффициентов запаса прочности, полученные в двух различных независимых друг от друга компьютерных программах APM FEM и T-Flex, обеспечивает достоверность полученных данных.

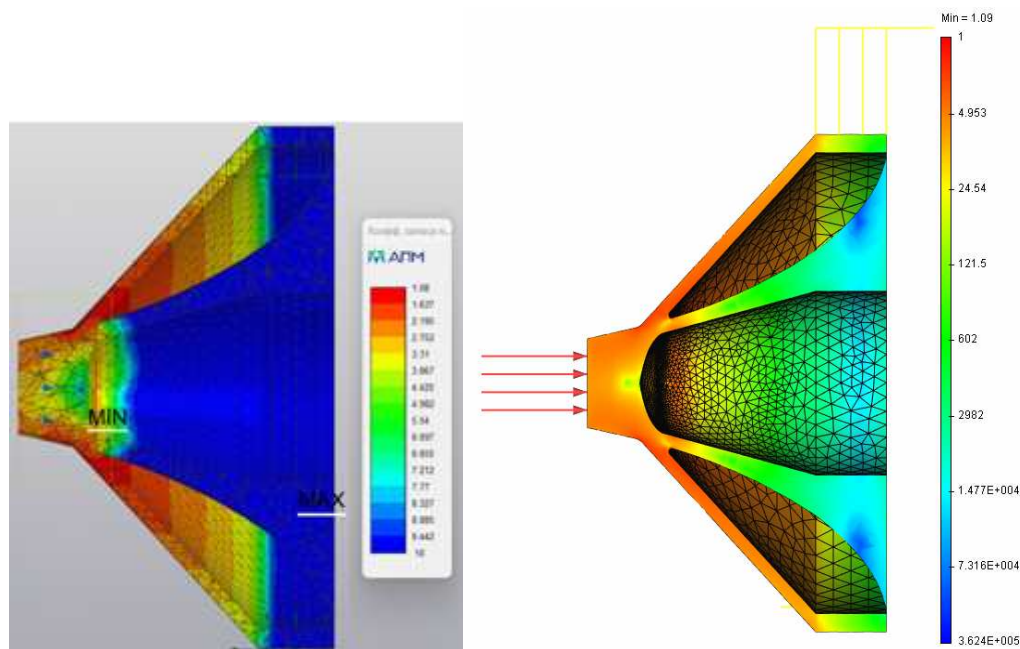


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента запаса прочности

Таким образом, представленный способ образования бойков ударных систем позволяет беспрепятственно встраивать их в цилиндрические корпуса пневматических или гидравлических молотов, сохраняя параметры ударного импульса, соответствующего силам сопротивления породы разрушению в процессе дробления негабаритов.

Исследование выполнено под научным руководством д.т.н., доцента, заведующего кафедрой машиностроения Жукова Ивана Алексеевича.

Список литературы

1. Городилов Л.В., Коровин А.Н., Кудрявцев В.Г., Першин А.И. Выбор конструктивной схемы и параметров гидроударного устройства для активного исполнительного органа горной машины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – №1. – С. 92-102. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230109.
2. Султаналиев Б.С., Еремьянц В.Э. К исследованию динамики горных и строительных машин с навесными молотами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №17-2. – С. 221-229.
3. Zhukov I.A., Molchanov V.V. Rational designing two-stage anvil blocks of impact mechanisms // Advanced Materials Research. 2014, vol. 1040, pp. 699-702. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.699.
4. Жуков И.А. Исходные основания к изучению влияния форм бойков на форму ударного импульса в машинах ударного действия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №5(105). – С. 25-27.

Сведения об авторах:

Азимов Амирхон Махмудалиевич – аспирант;

Храпенкова Екатерина Сергеевна – студент.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ ПРИ ТОРЦЕВОМ ТРЕНИИ

Джафарова А.А.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: торцевое трение, скорость скольжения, уплотнитель, железочугун, антифрикционные композиции, интенсивность изнашивания, физика – механические свойства.

Аннотация. Исследованы антифрикционные свойства торцевых уплотнителей, используемых во вращающихся узлах насосов и других устройств. Изучено влияние скорости скольжения по стали на интенсивность изнашивания материала Ф4К 20 при торцевом трении, также изучено влияние скорости скольжения по стали 95Х18 материала ЖГРЗЦс4 на интенсивность его изнашивания. Даны физика – механические свойства некоторых литых и порошковых антифрикционных материалов. Представлены антифрикционные свойства железочугунных порошковых материалов при торцевом трении на закаленную сталь марки ШХ15.

ANTI-FRICTION PROPERTIES OF POWDER SEALS IN END-FACE FRICTION

Jafarova A.A.

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: end friction, sliding speed, seal, cast iron, antifriction compositions, wear rate, physical and mechanical properties.

Abstract. The antifriction properties of end seals used in rotating units of pumps and other devices are investigated. The effect of sliding speed on steel on the wear rate of Ф4К 20 material under end friction is studied, as well as the effect of sliding speed on steel 95Х18 of material ЖГРЗЦс4 on the intensity of its wear is studied. Physical and mechanical properties of some cast and powder antifriction materials are given. Antifriction properties of iron-cast powder materials under end friction on hardened steel grade ШХ15 are presented.

Введение. Торцевые уплотнители вращающихся валов насосов широко применяются в различных областях техники, поскольку обеспечивают герметичность узла при высоких давлениях. Их основными элементами являются уплотнительные кольца, одно из которых вращается вместе с валом, а другое уплотняется неподвижным стержнем, сильфоном или же за счет давления среды – торцом вращающегося кольца. Таким образом, образуется торцевая контактная поверхность, обеспечивающая герметичность и разделение пространств между различными средами [1].

В химическом машиностроении, вакуумной технологии, компрессоростроении, нефтегазодобыче и в других отраслях торцевые уплотнители разъединяют зазоры между газами и химическими активными средами при высоких скоростях вращения валов. При этом в них происходит значительный фрикционный нагрев [2].

Эффективная работа таких уплотнителей в правильно подобранной конструкции во многом зависит от антифрикционных и физика – механических свойств материалов элементов уплотнителей. От таких материалов требуется

высокая износостойкость, способность сохранять высокое качество рабочих поверхностей и необходимую прочность при фрикционном нагреве, а также коррозионную стойкость. Трущиеся материалы должны иметь низкий коэффициент трения и достаточную теплопроводность для снижения тепловой нагрузки. В работе [2] показано, что торцевые уплотнители при правильном подборе с хорошо спроектированной парой трения в большинстве случаев работают эффективно по сравнению с аналогичными уплотнителями с неудачно выбранной поверхностью скольжения. Подбор оптимальных пар трения для торцевых уплотнителей является трудоемким и сложным процессом, требующим длительных лабораторных и специальных стендовых испытаний.

Целью работы является стендовое испытание антифрикционных железочугунных композиционных материалов в сравнении с ЖГрЗЦс4, наполненного фторопласта Ф4К20 и углеграфитов АГ1500Б89 и АГ1500БрС30.

Обсуждение экспериментов. Нагружение элементов трением в воздухе и вакууме осуществлялось по схеме торца с коэффициентом взаимного покрытия $K_{\text{вп}} = 1$. Данная схема трения (кольцо/диск) в большей степени соответствует условиям работ [3,4] торца уплотнителей, чем лабораторной схеме с коэффициентом $K_{\text{вп}} = 0,15$. При $K_{\text{вп}} = 1$ фрикционный нагрев может оказать решающее влияние на механизм трения. Кроме того, в закрытой схеме трения выход продуктов изнашивания из зоны контакта затрудняется.

Производилось трение колец из антифрикционных композитов о вращающиеся диски из стали 95Х18 (HRC 55). Выбор этой стали для производства быстро вращающихся валов обусловлен тем, что она обладает высокими механическими свойствами, которые широко применяются в нефти – газодобыче. Чаще всего при конструировании таких узлов вращающийся элемент торцевого уплотнителя выполняется вместе с диском. Перед испытанием мы протерли рабочие поверхности для получения шероховатости по параметрам $R_a = 0,32-0,63$ мкм для дисков и $0,63-1,25$ мкм для колец. Испытания проводили на одном стендовом оборудовании в вакууме равном степени разряжения 10^{-5} мм. рт. ст. и на воздухе. Вращение в камере обеспечили с помощью герметичной электромагнитной муфты. В процессе испытаний регистрировали температуры и моменты трения в нерабочих торцах колец. Износостойкость мы оценивали безразмерной величиной интенсивности изнашивания J_n .

Исследование фторопласта – 4, наполненного коксовой мукой, показало, что при увеличении скорости скольжения $V_{\text{ск}}$ на воздухе и в вакууме интенсивность изнашивания J_n резко увеличивается и достигает $10^{-7}-10^{-6}$ при скорости скольжения 20-50 м/с (рис. 1). При всех скоростях износостойкость при трении в вакууме была ниже, чем на воздухе. Очень значительное изнашивание фторопластовой композиции происходит из-за фрикционного нагрева в контакте. За счет низкой теплопроводности фторопласта тепло отделение концентрировалось в тонких поверхностных слоях, которые подверглись деструкции из-за низкой теплостойкости. После испытаний кольца были пластически деформированы с выступами на 1-2 мм.

Аналогичные результаты были получены и для других фторопластовых композиций со стекловолокном, дисульфидом молибдена и другими наполнителями.

При исследовании углеграфитов АГ1500Б83 и АГ1500БрС30 наблюдалось плавление баббита Б83 из пор углеграфитовой матрицы и переход бронзы БрС30 на стальное контртело. Это явление особенно ярко проявляется при трении в вакууме, где тепловая нагрузка велика из-за плохой теплопроводности.

Важно отметить, что интенсивность изнашивания J_n в вакууме для АГ1500Б83 была в 30 раз больше чем на воздухе при $V_{ск} = 2$ м/с. При увеличении скорости скольжения эта разница уменьшалась и при 50 м/с J_n была практически одинаковой в вакууме и на воздухе ($J_n = 10^{-9}$). Характер такого изменения J_n объясняется тем, что при малых тепловых нагрузках ($V_{ск} = 2$ м/с и $P = 0,2$ МПа) обнаруживается свойственная графиту низкая работоспособность при трении в вакууме. При увеличении скорости скольжения резко возросло тепловое напряжение поверхностей трения, баббит плавился, выходил из пор и служил смазкой, разделяя тела трения. Это привело к плавному снижению коэффициента трения с 0,25 до 0,12 при увеличении скорости скольжения с 20 м/с до 50 м/с. Однако выход расплавленного пропитанного металла нельзя считать допустимым. Потому что это может привести к потере герметичности материала.

Таким образом, низкая теплостойкость полимерных композиций, наблюдаемая в исследованных угле графитах выход расплавленного пропитанного металла, а также их низкая износостойкость в вакууме является такими недостатками, которые ограничивают применение этих материалов в торцевых уплотнителях газовых сред.

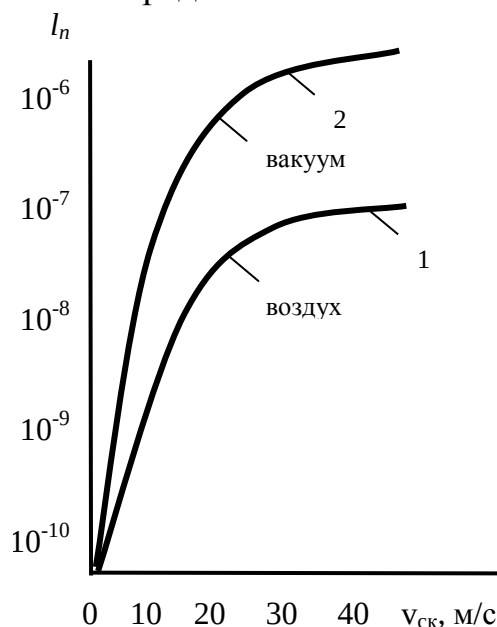


Рис. 1. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания материала Ф4 К20 при торцевом трении по стали: ($P = 0,2$ МПа) в атмосферном воздухе (1) и в вакууме (2)

Дальнейшие исследования проводились для порошковых композитов, физико-механические свойства которых даны в таблице 1.

Табл. 1. Физико-механические свойства антифрикционных материалов

Марка	Пористость, %	Твердость, МПа	Ударная вязкость, кгм/см ²	Прочность, МПа			Модуль упругости E, МПа	Коэффициент линейного расширения
				при разрушении	при изгибе	при сжатии		
ЖГрЗЦс4	10-20	600-1500	0,2-1,0	106	160	800	8500	9-11
ЖЧ50	10	200-2300	0,13	350	450	1050	13100	9,5
ЖЧ40	10	1900-200	0,14	340	410	100	12050	9,3

Результаты стендовых испытаний железграфита ЖГрЗЦс4 в воздухе хорошо согласованы с полученными результатами лабораторных испытаний [5] (рис. 2). Однако интенсивное изнашивание торцевого уплотнителя при $K_c = 1$ выше по сравнению с $K_c = 1,5$. Это связано с накоплением продуктов изнашивания между поверхностями трения и их долговременным участием в процессе трения. По сравнению с результатами исследований при трении материала ЖГрЗЦс4 в воздухе интенсивность изнашивания в вакууме в значительной степени повышается: можно сказать, что при $V_{ск} = 2$ м/с в 50 раз, а при $V_{ск} = 50$ м/с в 4 раза. При малой скорости скольжения очевидная разница в изнашивании объясняется влиянием вакуума, при котором на поверхности пары трения не образуется оксидный слой или вторичная структура, предохраняющая ее от прилипания. Графит и сульфиды, содержащиеся в материале, не обеспечивают образование разделительных слоев масел.

При скорости скольжения 2 м/с на стальных контртелах в вакууме наблюдались глубокие царапины, разрушения и разрывы. Рельеф поверхности имел глубокий характер ($R_z = 20-40$ мкм).

При увеличении скорости скольжения в вакууме J_n материала ЖГрЗЦс4 уменьшается и приближается к значению в атмосферном воздухе.

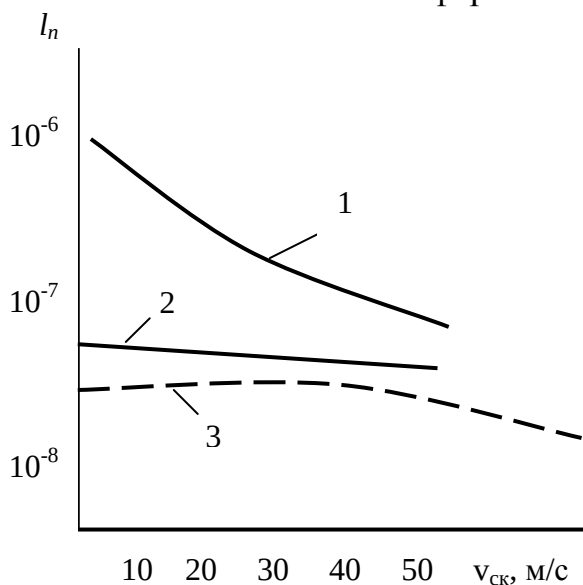


Рис. 2. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания материала ЖГрЗЦс4 при торцевом трении по стали 95Х18: ($P = 0,2$ МПа) в вакууме (1) и в атмосферном воздухе (2), сравнительно данным [5] (3)

При скоростях скольжения 30-50 м/с дорожка трения окрашивалась в бурый цвет, изнашивание контртела не превышала $5 \cdot 10^{-6} \div 6 \cdot 10^{-9}$, а качество рабочих поверхностей соответствовало шероховатости параметрам $R_a = 2$ мкм.

Таким образом, происходит увеличение скорости скольжения материала ЖГрЗЦс4 в вакууме, повышение температуры поверхностей трения, отделение графитовых и сульфидных частиц и разрушенного материала, диспергирование и смещение к контактным поверхностям, т.е. увеличение энергетического потенциала атомов за счет образования вторичных структур рабочего слоя [6].

Наиболее высокие антифрикционные свойства наблюдаются у железочугунных материалов ЖЧ50 и ЖЧ40, которые отличаются высокой коррозионной стойкостью в очень агрессивных средах и износостойкостью при высоких скоростях скольжения [7]. Эти материалы обладают малой пористостью и высокими физико – механическими свойствами (табл. 1), что определяет их хорошую износостойкость в широком диапазоне скоростей (табл. 2). Параметр J_n для композиций ЖЧ50 и ЖЧ40 изменяется 2-3 раза в диапазоне скоростей от 2 до 50 м/с.

Табл. 2. Антифрикционные свойства порошковых материалов ЖЧ50 и ЖЧ40 при торцевом трении дисков из закаленной стали ШХ15

Среда	$P_{нт}$, МПа	$V_{ск}$, м/с	f	J_n	
				кольцо	диск
ЖЧ50					
Воздух	0,2	20	-	$2 \cdot 10^8$	до 10^{-9}
	0,4	20	-	$2,4 \cdot 10^8$	до 10^{-9}
Вакуум	0,2	2	-	$1,4 \cdot 10^9$	-
	0,2	20	0,15	до $2,9 \cdot 10^9$	+0,004мм
	0,2	50	0,15	до $1,9 \cdot 10^9$	+0,045мм
	0,4	20	0,10	до $5,4 \cdot 10^9$	+0,002мм
ЖЧ40					
Воздух	0,2	20	0,12	$4,9 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^{10}$
	0,2	50	0,16	$2,1 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^{10}$
	0,4	20	0,12	$1,0 \cdot 10^8$	+0,007мм
Вакуум	0,2	2	-	$1,9 \cdot 10^8$	-
	0,2	20	0,16	до $5,9 \cdot 10^9$	+0,04м
	0,2	50	0,16 (до 0,30)	до $8,9 \cdot 10^9$	+0,014м
	0,4	20	0,15	до $3,9 \cdot 10^8$	+0,055м

При увеличении скорости скольжения до 20 м/с и нагрузки трения $P_{нт} = 0,2$ МПа температура в нерабочем торце кольца при трении в воздухе составляла 200-220⁰С после 900 с работы, а при $P_{нт} = 0,4$ МПа – 500⁰С. В вакууме при $V_{ск} = 20$ м/с была отмечена температура 500⁰С, а при $V_{ск} = 50$ м/с она наблюдалась в течение 150-300 с работы. Несомненно, температуры, участвующие в трении можно считать большим градиентом хотя в зоне контакта температура была еще выше. В этих условиях был образован разделяющий наблюдательный слой, о чем свидетельствует увеличение высоты дисков и внешнего вида дорожки трения.

Таким образом, можно сказать, что за счет высокоскоростной нагрузки антифрикционных композиций на железочугунной основе при трении, разрушении зацепок и молекулярного взаимодействия участков создаются условия для диспергирования материалов в зоне контакта, измельчения дисперсных частиц и их окислирование (трение в воздухе), взаимный перенос смеси под действием высоких температур и давлений, а также получение новых аморфизированных веществ [8]. С повышением давления во всех случаях увеличивается величина изнашивания, что обусловлено ростом температуры в зоне трения, увеличением площади реального контакта и адгезионным взаимодействием при трении.

После испытаний качество поверхностей трения колец незначительно снизилось на один – два класса из – за появления царапин и микроизмельчений; несмотря на развитие пластического течения поверхностных слоев материала за счет фрикционного нагрева по краям колец наблюдались разрывы материала.

В связи со значительным переносом продуктов изнашивания на рабочую поверхность дисков их качество снизилось на два – три класса. Отдельные участки поверхности имели шероховатость, соответствующую $R_z = 20$ мкм.

Результаты испытаний показывают, что материал ЖЧ50, подвергнутый цементации при спекании, обладает лучшей износостойкостью чем тот же борированный материал и значительно превосходит по износостойкости материал ЖГрЗЦс4 и композиции на основе фторопласта.

Таким образом, правильный подбор состава антифрикционных порошковых композиций и оптимизация параметров технологии их синтеза позволяет получить необходимые триботехнические характеристики узлов трения при высоких скоростях без масла даже в таких экстремальных условиях, как вакуум.

Выводы. 1. Изучены антифрикционные свойства порошковых уплотнителей при торцевом трении. С этой целью был изучен процесс торцевого трения в атмосферном воздухе и в вакууме. Помимо стандартного железграфитового порошкового композита ЖГрЗЦс4 были испытаны также уплотнители, изготовленные из железочугуна ЖЧ50 и ЖЧ40. Материал ЖЧ50, подвергнутый спеканию при различных высоких скоростях скольжения, имеет более высокую износостойкость, чем борированный железочугун того же состава и по этому параметру превосходит уплотнители, изготовленные из композиций на основе фторопласта.

2. Правильный выбор железочугунных порошковых композиций и оптимизация их параметров получения позволяют сформировать необходимые триботехнические характеристики антифрикционных узлов трения при высоких скоростях скольжения и в экстремальных вакуумных условиях.

Финансирование. Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант № АЕФ – МГС – 2024-2(50) – 16/01/1 – М – 01.

Список литературы

1. Dorofeev Yu., Mamedov A.T., Guliyev A.A. Tribotechnical parameters for materials made from mixtures of iron and cast-iron powders // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1991, vol. 30, pp. 236-240.

2. Мамедов А.Т., Мустафаев С.М., Мамедов А.Г., Касумов С.А. Влияние фракционного состава порошка на свойства фторопластовых композиций // Тезисы докладов научно-технической конференции «Триботехнические проблемы нефтяного оборудования», 21-26 февраля 1996. – Баку: Азербайджанская государственная нефтяная академия, 1996. – С. 30-34.
3. Mamedov A.T., Mamedov V.A. New technological approach to fabrication of high density PM parts by cold pressing sintering // Powder metallurgy. 2004, vol. 47, no. 3, pp. 278-283.
4. Мамедов А.Т., Мехтиев Р.К. Модель и механизм упрочнения металлов дисперсными частицами // Вестник машиностроения. – 2019. – №5. – С. 28-32.
5. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: конструкция, получение, применение. – М.: Университетская книга «Логос», 2006. – 400 с.
6. Филиппов М.А., Шешуков О.Ю. Фрикционные и антифрикционные материалы. – Екатеринбург: Изд. дом Уральского государственного университета, 2021. – 204 с.
7. Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Левакова Н.М. Антифрикционные материалы на основе полимерных волокон // Труды ВИАМ. – 2022. – №11(117). – С. 48-59. – doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-11-48-59.
8. Колесников В.И., Беляк О.А. Математические модели и экспериментальные исследования – основа проектирования гетерогенных антифрикционных материалов. – М.: Физматлит, 2021. – 216 с.

Сведение об авторе:

Джафарова Афет Ариф кызы – к.т.н., доцент кафедры «Химическая технология, переработка и экология».

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЫЕ АСПЕКТЫ

Керимова Г.Х.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: промышленные отходы, процесс переработки, основные факторы, физико-химические свойства, минеральные ресурсы, эксплуатация.

Аннотация. В статье проанализировано состояние эффективности переработки отходов горнодобывающей промышленности. Установлено, что решающими факторами в процессе переработки промышленных отходов являются протондонорные свойства входящих в их состав веществ и их оптимальный показатель основности. В статье указано, что при производстве изделий и керамических материалов необходимо стараться максимально удалять из техногенных отходов органические соединения. Полученные при этом экстрактивные жидкие отходы могут быть использованы в процессе приготовления для бетонных изделий, клеевых растворов.

EFFICIENCY OF MINING WASTE PROCESSING: SOME IMPORTANT ASPECTS

Kerimova G.Kh.

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: industrial waste, recycling process, main factors, physical and chemical properties, mineral resources, exploitation.

Abstract. The article analyzes the state of efficiency of mining waste processing. It is established that the decisive factors in the process of industrial waste processing are the proton-donor properties of the substances included in their composition and their optimal basicity index. The article indicates that in the production of products and ceramic materials it is necessary to try to remove organic compounds from technogenic waste as much as possible. The extractive liquid waste obtained in this way can be used in the process of preparation for concrete products, adhesive solutions.

Введение. Работы ряда ученых и специалистов, изучающих эффективность переработки техногенных отходов, в том числе отходов горнодобывающей промышленности, показывают, что взаимодействие компонентов техногенных промышленных отходов можно рассматривать в трех основных направлениях:

- взаимодействие минеральных компонентов (при нормальной температуре и давлении, при повышенной температуре и давлении, при повышенной температуре и высоком давлении);
- взаимодействие минеральных и органических составляющих (опять же в тех же условиях);
- взаимодействие органических компонентов (опять же в тех же условиях).

Совместимость протон-донорных свойств этих соединений лежит в основе всех взаимодействий веществ, входящих в состав промышленных отходов. В связи с этим было бы полезно вспомнить известный подход, характерный для химических соединений: «Подобный растворитель подобен», т. е. «растворяются сходным образом». Этот подход распространен в аналитической, физической и органической химии [1, 2].

При синтезе новых материалов на основе минеральных или минерально-органических веществ необходимо оценивать протондонорные и акцепторные свойства этих веществ.

Следует отметить, что при взаимодействии протондонорных и протонакцепторных веществ, как правило, наблюдаются многочисленные метастабильные состояния и фазы. Наблюдаются они по постепенному образованию связей и псевдосвязей, напоминающих процесс образования камнеподобных тел.

Известно, что для каждого вещества, а также для каждой пары веществ существует свой диапазон рН, который считается оптимальным, когда он обеспечивает условия для образования максимального числа соединений и новых фаз. Следовательно, диапазон рН для двух веществ, входящих в состав техногенных отходов горнодобывающей промышленности, можно регулировать количеством третьего вещества [3, 4].

Постановка вопроса. При создании новых материалов для строительства и других отраслей промышленности из техногенных отходов очень важно учитывать следовые количества редких элементов. Именно эти элементы действуют как катализатор («легирующий эффект») процессов новой фазы и соединения.

Таким образом, в процессе получения новых эффективных материалов и изделий из техногенных отходов определяющим и решающим фактором создания новых фаз и связей являются протондонорные свойства составляющих веществ и показатель рН, характеризующий их оптимальное взаимодействие. Последнее, в свою очередь, зависит от природы взаимодействующих компонентов и микропримесей.

Завершая обзор характеристик, классификации и возможных областей применения различных промышленных отходов, можно отметить, что при производстве керамических материалов и изделий необходимо стараться максимально удалять из этих отходов органические соединения. Полученные при этом экстрактивные жидкие отходы могут быть использованы в процессе приготовления клеевых растворов для бетонных изделий.

Таким образом, система использования природы имеет гладкую функциональную структуру и четкую последовательность – алгоритмическую (рис. 1). Необходимо понять алгоритм системы природопользования в самом широком смысле этого слова. При этом следует понимать количество и качество природных ресурсов, показатели, характеризующие экологическое состояние окружающей среды, а также выполнение процессов и операций в четко определенной последовательности. Наконец, рациональное природопользование должно основываться на принципе экологической, технической и экономической оптимальности при антропогенной деятельности.

Принцип эколого-технической и экономической оптимальности включает формальное описание конкретных показателей, считающихся оптимальными с экологической и технико-экономической точек зрения. Эти показатели, прежде всего, отражают уже существующие на практике такие критерии, как целесообразность, рентабельность и устойчивость деятельности систем природопользования.

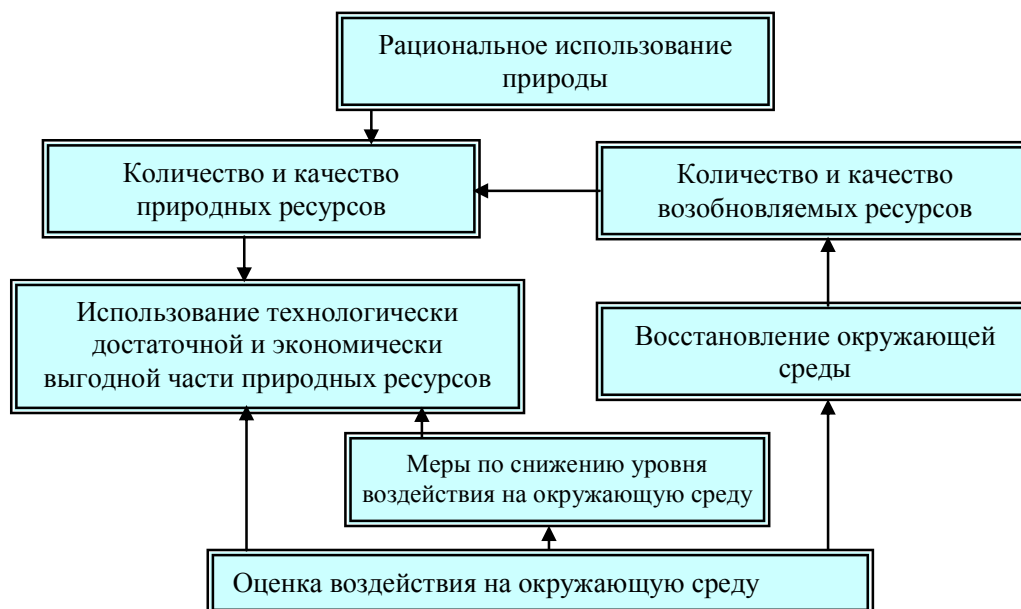


Рис. 1. Структура рационального природопользования

Известно, что разработка месторождений полезных ископаемых является одним из сложнейших процессов использования природы. В современных условиях использование минеральных ресурсов должно осуществляться с учетом конъюнктуры внутреннего и внешнего рынков, а также требований экологической безопасности горного производства.

Такой подход требует научных оснований с четкой и четкой структурой. В этом контексте необходимо посмотреть на объект горной науки – как систему знаний о недропользовании и охране окружающей среды.

В этом случае систематическая оценка использования природных ресурсов должна основываться на результатах исследований, полученных с помощью методов таких областей науки и техники, как геотехнология, технологическая минералогия и технология материалов.

Системные свойства полезных ископаемых. Минеральные ресурсы обеспечиваются теми или иными месторождениями полезных ископаемых. Месторождения полезных ископаемых на любой территории можно разделить на две группы: природные и техногенные.

Природные месторождения - это места естественного накопления полезных ископаемых, компоненты которых различаются по количеству, качеству и условиям размещения и пригодны для промышленного использования при определенном технико-технологическом уровне и экономических условиях. Техногенные месторождения создаются в результате длительной эксплуатации природных месторождений.

Они представляют собой природные системы на техногенных месторождениях полезных ископаемых, являются предметом труда в процессе неэффективного использования минерально-сырьевых ресурсов конкретной территории, ограниченной определенными границами.

Природные месторождения относятся к классу природных систем. Однако поскольку понятие системы создается в основном в связи с искусственными системами, а при формальном подходе к природным ресурсам, четкой цели четкой системы не просматривается.

Тем не менее ясно, что если цель, которую пытается достичь система, неизвестна, это не означает, что такой объект больше не является системой. В этом случае правильнее было бы использовать обобщенное понятие системы.

В соответствии с основными положениями горной системологии природопользование состоит из глобальной системы – техногенной и природной систем, сюда же включаются и месторождения полезных ископаемых.

К характерным свойствам природных систем относятся структура, существование подсистем, взаимосвязь элементов системы, подчинение всей системы одной объективной цели. Природные системы обладают также свойством самоорганизации (синергетический эффект).

Таким образом, обобщая, можно сказать, что месторождения полезных ископаемых являются аномальными проявлениями в земной коре, характеризуются высокой плотностью полезного компонента. Геологическое строение месторождений полезных ископаемых – это геологические объекты, обеспечивающие на том или ином уровне равновесие в земной коре как внутри нее, так и в плане эволюции с окружающей средой. Нарушение этого уровня равновесия приводит к переходу на другой уровень равновесия. Такой переход наблюдается в окружающей среде при наличии геомеханических гидродинамических, аэрогазодинамических и теплообменных процессов.

Основной целью стратегического планирования эффективного использования природных ресурсов должна стать разработка региональной экологической политики в области месторождений полезных ископаемых. Такая политика должна создать возможность формирования бюджета региона и обеспечения экономического развития.

Понятно, что еще одним сложным вопросом реализации стратегического планирования является финансирование этой деятельности и наличие единого информационного пространства различных государственных органов.

Таким образом, по нашему мнению, стратегия экологически рационального использования природы в целом, включая использование минеральных ресурсов, должна включать реализацию следующих мер:

- создание и развитие системы сбора, анализа и обобщения информации о природных ресурсах;
- разработка и совершенствование системы ситуационного моделирования;
- создание и функционирование комплексного кадастра использования природных ресурсов;
- разработка комплексного кадастра загрязнения окружающей среды;
- развитие экологического законодательства, обеспечивающего функционирование совершенных нормативно-правовых механизмов, создающих условия для экологического и рационального природопользования;
- развитие базы данных по современным технологиям добычи и переработки полезных ископаемых;
- разработка и применение эффективных методов утилизации отходов горнодобывающего производства;
- создание системы сбыта природных ресурсов.

Таким образом, приведенные выше комментарии и результаты исследований в области горнодобывающей промышленности, экологии и

минеральных ресурсов и переработки отходов показывают, что разработка технологий, обеспечивающих повторное использование отходов, является важной задачей современности, учитывая ее важную роль в экономике страны. Для этого должна функционировать подсистема управления комплексной переработкой природных ресурсов. Основной целью данной подсистемы может быть снижение потерь полезных ископаемых, комплексное использование отходов, улучшение показателей переработки и снижение вредного воздействия горного производства на окружающую среду.

Известно, что в настоящее время существуют различные комплексы программных средств и продуктов, но выбор того или иного из них связан со сложными факторами, определяющим из которых является стоимость программного средства. Однако следует учитывать взаимодействие сети с другими информационными системами, качество программного продукта и конкретные возможности в предметной области.

Таким образом, для обеспечения управления недрами и отходами их переработки необходимо уделять особое внимание подготовке высококвалифицированного персонала, умеющего работать с автоматическими системами управления (АИС). Этот вопрос имеет принципиальное значение, поскольку от него зависит решение технических, технологических, экономических и экологических вопросов, обеспечивающих эффективное использование минеральных ресурсов.

Заключение

1. Существует острая необходимость разработки рекомендаций по определению эффективных технологических режимов обращения с отходами в горнодобывающей промышленности. Необходимо использовать существующие технологические принципы производства строительных материалов и изделий как предварительную базу знаний для разработки экологически рациональных технологий переработки с целью получения новых материалов из отходов.

2. Хозяйственная деятельность, связанная с использованием минеральных ресурсов, изменяет состояние природной системы, что, в свою очередь, влияет на рекреационную способность природы, вызывает нарушения необходимого баланса обменных процессов. Они определяют состояние экологического баланса в окружающей среде. Поэтому необходимо совершенствовать и развивать экологически рациональные технологии производства строительных материалов из отходов горнодобывающей промышленности.

Список литературы

1. Мəммədov Ə.М., Xəlilova A.A. Sənaye ekologiyası. – Bakı: AzTU, 2004. – 362 s.
2. Xəlilova A.A., Axundova M.M. Dağ-mədən sənayesi ekologiyası. – Bakı: AzTU. – 136 s.
3. Ахременко С.А. Управление радиационным качеством строительной продукции: Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 236 с.
4. Белов Л.А. Комплекс технических и программных средств экологического мониторинга энергетических объектов // Конверсия. – 1996. – №8. – С. 36-39.

Сведения об авторе:

Керимова Гюльнара Халил кызы – старший преподаватель кафедры «Металлургия и технология материалов».

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДВУХКРАТНОГО ХОЛОДНОГО ПРЕССОВАНИЯ И СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Рустамова С.М.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: материал, плотность, твердость, промежуточное спекание, повторное прессование, давление прессования, температура, дегазация.

Аннотация. В статье исследовано влияние давления двухкратного холодного прессования на плотность и твердость железографитовых прессовок типа ЖГр0,8 и ЖГр0,65Д2Н1 и режимов их промежуточного спекания. Установлено, что на плотность и твердость образцов температура промежуточного спекания в диапазоне 800-1000⁰С существенно не влияет. Однако увеличение давления прессования с 400 МПа до 900 МПа приводит к значительному повышению обоих свойств. Таким образом, дополнительное уплотнение пористых железографитовых прессовок после промежуточного спекания приводит к их значительному упрочнению.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF COLD PRESSING AND SINKING OF IRON-BASED POWDER MIXTURE

Rustamova S.M.

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: material, density, hardness, intermediate sintering, re-pressing, pressing pressure, temperature, degassing.

Abstract. The article studies the effect of double cold pressing pressure on the density and hardness of iron-graphite compacts of the ЖГр0.8 and ЖГр0.65Д2Н1 types and their intermediate sintering modes. It has been established that the intermediate sintering temperature in the range of 800-1000⁰С does not significantly affect the density and hardness of the samples. However, increasing the pressing pressure from 400 MPa to 900 MPa leads to a significant increase in both properties. Thus, additional compaction of porous iron-graphite compacts after intermediate sintering leads to their significant strengthening.

Введение. Технология холодного прессования и спекания порошковых материалов на основе железа, широко применяется для получения деталей различной конфигурации. Однако наличие значительного количества пор в структуре таких материалов не позволяет создавать из них высоконагруженные антифрикционные детали. Для этой цели предпочтительны горячая штамповка и другие подобные технологии. Применение таких технологий приводит к удорожанию пресс инструмента, требует применения соответствующего дорогостоящего оборудования и вызывает ряд технологических трудностей [1-4].

Именно в этом контексте применение технологии холодного двухкратного прессования пористых порошковых изделий имеет значительные преимущества. Например, материалы на основе железа восстанавливают прежние пластические свойства после первого прессования и промежуточного спекания, а их повторное прессование существенно снижает пористость прессовок, что приводит к

увеличению их прочности и других свойств. Полученные свойства материала в ряде случаев можно сравнить со свойствами, полученными при горячем прессовании. Поэтому в данной статье анализируется влияние начального давления прессования, температуры промежуточного спекания и давления повторного прессования на плотность и твердость прессовок из двух типов железографитовых материалов.

Методика проведения экспериментов. Повторное прессование спеченных образцов, спрессованных на прессе НРМ-100S, проводили в лабораторной пресс-форме под давлением 600÷900 МПа. Образцы имели следующие размеры: образец полого типа $D \cdot d = 47,9 \cdot 29,6$ мм и призматический образец $10 \times 10 \times 55$ мм. При этом разница между внутренним диаметром матрицы и внешним диаметром образцов составляла 0,4 мм, а разница между внутренним диаметром образцов и диаметром стержня – 0,2 мм.

Диапазон давления прессования 600÷900 МПа был принят из тех соображений, что при прессовании предварительно спеченных образцов под давлением <600 МПа происходит недостаточная деформация образца, то есть он не охватывает весь рабочий объем пресс-формы, а его прессование при >900 МПа приводит к сильному износу пресс-формы.

Обсуждение результатов. Изучено влияние температуры промежуточного спекания на плотность и твердость повторно спрессованных образцов. На рисунке 1 представлена плотность образцов из материалов ЖГр0,8 и ЖГр0,65Д2Н1 (состав материала ЖГр0,8 – 0,8 мас. % С, остальное – железо; состав материала ЖГр0,65Д2Н1 – 0,5 мас. % С; 2,0 мас. % Cu и 1 % Ni). Рассматривая кривые, можно сделать вывод, что плотность образцов после многократного прессования очень мало зависит от температуры промежуточного спекания. Однако следует отметить, что образцы, спеченные при 900 °С, имеют более высокую плотность.

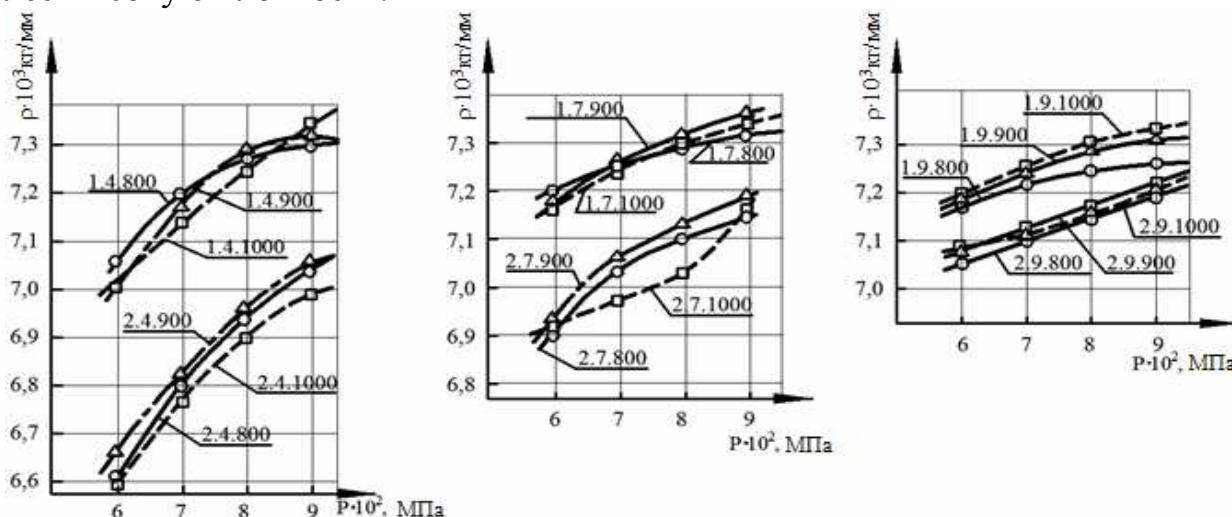


Рис. 1. Зависимость плотности образцов от давления прессования: обозначения: первая цифра: 1. – образец ЖГр0,8; 2. – ЖГр0,65Д2Н1; вторая цифра: 4. – $P_1 = 400$ МПа; 7. – $P_1 = 700$ МПа; 9. – $P_1 = 900$ МПа; третья цифра: 800 – $t_1 = 800^\circ\text{C}$; 900 – $t_1 = 900^\circ\text{C}$; 1000 – $t_1 = 1000^\circ\text{C}$

Данное явление можно объяснить тем, что при заданной скорости движения конвейера печи ($\tau_1 = 2,4$ кс) этой температуры достаточно для процесса

удаления наклепа частиц и восстановления оксидных слоев, что повышает пластичность изделия. Последующее повышение температуры активизирует процесс спекания, в зависимости от чего материал образцов становится прочнее и теряет способность прилипать к пресс-форме. Плотность образцов существенно зависит от давления прессования и равномерно возрастает во всем диапазоне 600÷900 МПа повторного прессования. При этом можно отметить, что максимальная плотность образцов, полученных при промежуточном спекании и двойном прессовании, значительно превышает плотность образцов, полученных при том же давлении при однократном прессовании. Также можно отметить, что образцы из материала ЖГр0,8, спрессованные под давлением (900+900) МПа, имеют меньшую плотность, чем образцы, спрессованные под давлением (700+900) МПа. Отрицательное влияние уплотнения проявляется не только в процессе спекания образцов, но и после повторного прессования, что еще раз подтверждает вывод о нецелесообразности повышения давления прессования выше 700 МПа при прессовании образцов состава ЖГр0,8 на высокопроизводительном прессовом оборудовании.

Образцы, спеченные при высокой температуре из материала ЖГр0,65Д2Н1, имеют большую твердость, чем другие, однако при этом происходит недостаточное заполнение матрицы в зонах соприкосновения с пуансонами.

Увеличение давления прессования как показано на рисунках 2 и 3 существенно увеличивает жесткость образцов в целом,. После повторного прессования плотность образцов, спеченных при температуре 850÷1000°С, отличается мало, а кривые твердости имеют близкие значения. Таким образом, после спекания и повторного прессования сохраняется значительно меньшая плотность образцов, спрессованных под давлением до 400 МПа, что также отражается на их твердости [5, 6].

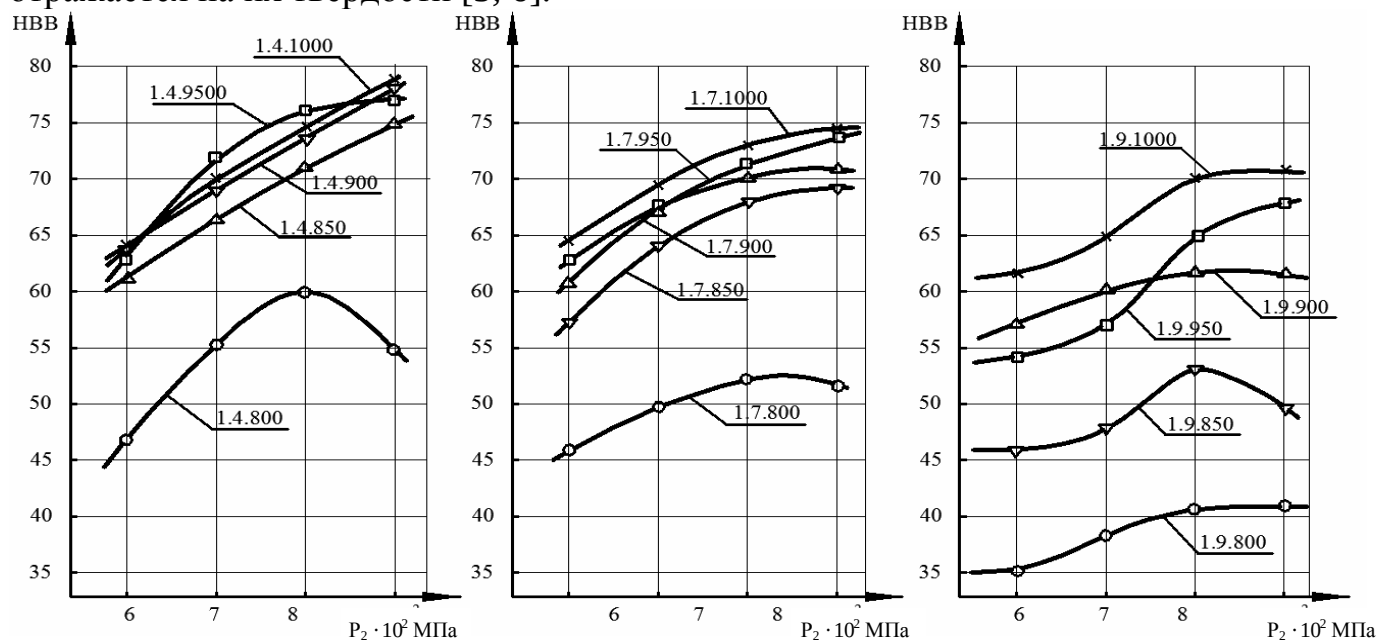


Рис. 2. Твердость образцов ЖГр0,8 после двухкратного прессования: обозначения: первая цифра: 1. – образец ЖГр0,8; вторая цифра: 4. – $P_2 = 400$ МПа; 7. – $P_2 = 700$ МПа; 9. – $P_2 = 900$ МПа; третья цифра: 800 – $t_1 = 800^\circ\text{C}$; 850 – $t_1 = 850^\circ\text{C}$; 900 – $t_1 = 900^\circ\text{C}$; 950 – $t_1 = 950^\circ\text{C}$; 1000 – $t_1 = 1000^\circ\text{C}$

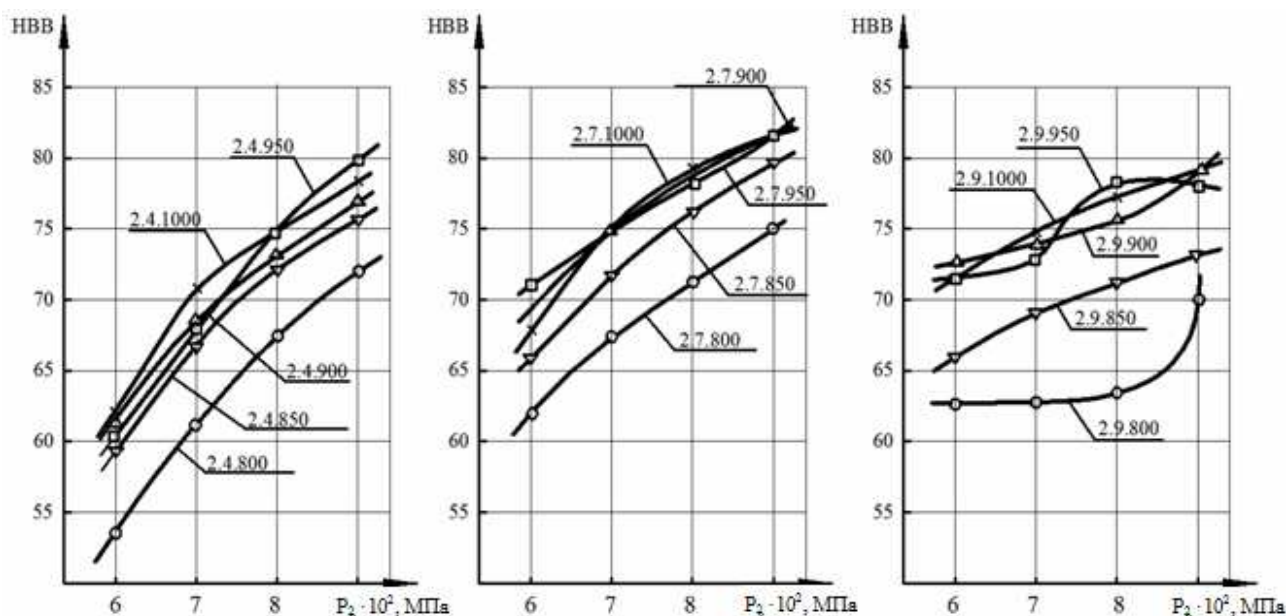


Рис. 3. Твердость образцов ЖГр0,65Д2Н1 после двухкратного прессования:

обозначения: первая цифра: 2. – образец ЖГр0,65Д2Н1; вторая цифра:

4. – $P_2 = 400$ МПа; 7. – $P_2 = 700$ МПа; 9. – $P_2 = 900$ МПа; третья цифра: 800 – $t_1 = 800^\circ\text{C}$; 850 – $t_1 = 850^\circ\text{C}$; 900 – $t_1 = 900^\circ\text{C}$; 950 – $t_1 = 950^\circ\text{C}$; 1000 – $t_1 = 1000^\circ\text{C}$

Аномальное поведение кривых твердости образцов, спрессованных из материала ЖГр0,8 под давлением 900 МПа, объясняется значительным уплотнением образцов и последующим закрытием слоистых трещин в процессе спекания, этот процесс становится более активен при повышении температуры. При этом увеличивается прочность образцов, что соответствует их уплотнению при многократном прессовании. Однако она остается ниже, чем у других образцов, и при повторном прессовании выше 800 МПа, образцы снова становятся слабыми, не выдерживают нагрузку, что также отражается на твердости.

Аномальное поведение кривой 1·4·800 объясняется также недостаточной прочностью образцов из материала ЖГр0,8, спрессованных под низким давлением (400 МПа) и спеченных при низкой температуре ($t_1 = 800^\circ\text{C}$). Под давлением многократного прессования они значительно ослабевают и уплотняются с образованием многослойных трещин, вызванных разуплотнением прессовок. Здесь имеется дальняя связь с формой частиц железа марки ПЖ2МЗ, которое легко деформируется при низком прессовании и создает в процессе прессования множество закрытых пор. Плохая спекаемость прессовок при низкой температуре приводит к образованию губчатой структуры, поэтому образцы не выдерживают нагрузку и разрушаются при двухкратном прессовании под давлением 800 МПа.

Эту дальнюю связь можно проследить в аномалии кривой 2·9·800 с формой порошковых частиц ПЖ-НЛ. Большое количество упругого последействия за счет упругих сил сферических частиц порошка сводит эффективность уплотнения прессов к нулю и ослабляет их, но еще не приводит к существенному ослаблению. Промежуточное время спекания прессовок усиливает процессе дегазации и поэтому они становятся менее плотными, но эффективность спекания за счет легирующих элементов несколько способствует их упрочнению.

По этой причине образцы, спрессованные под давлением 900 МПа, выдерживают большие силы многократного прессования, а под давлением 800 МПа – они становятся значительно плотнее за счет пластической деформации. Это отражается на увеличении их твердости. Образцы из материала ЖГр0,65Д2Н1 несколько тверже образцов из материала ЖГр0,8 в целом.

Заключение. Промежуточная температура спекания не оказывает существенного влияния на плотность и твердость железографитовых прессовок после холодного прессования. Лишь увеличение давления прессования оказывает существенное влияние на эти параметры.

Список литературы

1. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980 – 495 с.
2. Порошковая металлургия (спеченные и композиционные материалы) / Под ред. В. Шатта. – М.: Металлургия, 1983 – 519 с.
3. Роман О.В., Витязь П.А., Максименко В.Н., Резник Л.Б. Изучение влияния химического состава и режимов термической обработки на структуру и свойства порошковых сталей, легированных хромом и молибденом. – В кн.: Порошковые конструкционные материалы. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 44-45.
4. Мамедов А.Т. Конструкционные и антифрикционные порошковые материалы. – Баку: Элм, 2005. – 458 с.
5. Мамедов А.Т., Мамедов В.А., Алиев А.Г. Взаимосвязь состава шихты и характеристик ее компонентов со структурой и свойствами спеченного материала на основе железа // Материалы, технология, инструменты. – 2002. – Т. 7, №3. – С. 78-82.
6. Mamedov A.T., Mamedov V.A. Properties of Highy-Dense iron Baze powder metallurgy materials prossed without zink stearate // Powder metallurgy and metal ceramics. 2003, vol. 42(5), pp. 245-248.

Сведения об авторе:

Рустамова Севиль Маси кызы – старший преподаватель кафедры «Металлургия и технология материалов».

РАЗРАБОТКА НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Потетюрин М.А., Катин В.Д.

Дальневосточный государственный университет путей и сообщений, Хабаровск

Ключевые слова: техногенные чрезвычайные ситуации, разливы нефти и нефтепродуктов, водные поверхности, загрязнение гидросферы, очистка акваторий от нефтяных загрязнений, новое устройство для очистки водной поверхности.

Аннотация. В статье дан анализ причин и источников загрязнения водных поверхностей нефтесодержащими продуктами. Разработано и рекомендовано к практическому использованию инновационное авторское устройство для очистки акваторий от нефтяных загрязнений защищенное патентом на изобретение. Описаны принципы действия новой установки и рекомендации по её применению.

DEVELOPMENT OF A NEW DEVICE FOR CLEANING WATER SURFACES FROM POLLUTION

Potetyurin M.A., Katin V.D.

Far Eastern State University of Railways and Communications, Khabarovsk

Keywords: man-made emergencies, oil and oil product spills, water surfaces, hydrosphere pollution, cleaning water areas from oil pollution, new device for cleaning water surfaces.

Abstract. The article analyzes the causes and sources of contamination of water surfaces with oil-containing products. An innovative author's device for cleaning water areas from oil pollution, protected by a patent for an invention, has been developed and recommended for practical use. The principles of operation of the new installation and recommendations for its application are described.

Вопросы предотвращения или снижения загрязнения поверхностных вод в современных условиях приобретают наиболее актуальное и острое значение, что хорошо согласуется с основными положениями действующего Федерального закона «Об охране окружающей среды». Данное обстоятельство, на наш взгляд, особенно важно, поскольку загрязнение гидросферы может угрожать здоровью населения. Значительная часть загрязнений акваторий происходит из-за аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (НиНП), происходящих в результате техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1, 2].

Нельзя не отметить, что большое количество на водной поверхности НиНП появляется так же при их разливах в результате перевозки из железнодорожных цистерн [3].

В связи с этим разработка и внедрение новых технологий и методов очистки воды от нефтяных загрязнений становятся все более актуальными [4]. Это включает в себя пользование сорбентов, биоремедиации, химических методов и других подходов.

В настоящее время загрязнения нефтесодержащими продуктами удаляются в основном механическим способом, а также с помощью применения современных сорбирующих веществ. По данным [4] эффективным способом ликвидации последствий разливов нефти является механический,

осуществляемый с применением сорбентов. При этом работа по ликвидации аварийного разлива ННП можно условно разделить на три этапа: локализацию; сбор и извлечение ННП; транспортировку и утилизацию собранного ННП и сорбента.

В качестве сорбента для повышения эффективности работ по ликвидации разливов может использоваться материал, способный к аккумуляции поглощаемого вещества на поверхности или в объеме пор. Поглощаемое вещество в данном случае является сорбатом. Процесс сорбции основан на взаимодействии на физическом и химическом уровне сорбента и сорбата [4]. Качества и свойства, которыми должен обладать универсальный сорбент, следующие: высокая сорбционная способность по отношению к нефти и нефтепродуктам; высокая удерживающая способность в насыщенном состоянии; возможность регенерации поглощенного продукта; экологичность сорбента; экономичность; технологичность изготовления и утилизации сорбента.

Основным показателем эффективности работы сорбента является нефтеемкость. Важными характеристиками эффективности сорбента остаются наряду со скоростью поглощения нефти, удобство транспортировки и применения на месте аварии. На российском рынке представлены следующие виды сорбентов: продукты минерального происхождения; продукты животного или растительного происхождения; синтетические продукты и полимеры [4].

Авторами разработано новое эффективное устройство для очистки водных поверхностей (рис. 1) от загрязнения ННП, подробно описанное в патенте №2788206 [5]. Предлагаемое авторское техническое решение по созданию принципиально нового изобретения для очистки водной поверхности содержит корпус для съемной закрепленный каркасом на балласте для поддержания устройства в плавучем состоянии таким образом, что: верхняя часть корпуса для съемной сетки вместе с установленной внутри цилиндрической съёмной сеткой находится на одном уровне с водной поверхностью, причем балласт снабжен подъемными ушами для транспортировки установки, а корпус для съемной сетки содержит шток-датчик загрузки сетки и датчик давления на выходном коллекторе, позволяющие контролировать уровень наполнения цилиндрической съёмной сетки, к коллектору присоединен сборный трубопровод с насосом, который позволяет подсоединить подходящий фильтр.

Существенным признаком, отличающим данное устройство от прототипа и известных аналогов, является то, что корпус для съёмной сетки содержит шток-датчик загрузки сетки и датчик давления на выходном коллекторе, которые позволяют контролировать уровень наполнения сетки и являются предупредительной системой для очистки сетки, что отвечает критерию «новизна» авторского технического решения, которое было экспертизой принято изобретением [5].

Предлагаемое устройство может быть успешно использовано при устранении последствий аварий разливов ННП на водной поверхности с применением адсорбирующих материалов (резиновой крошки и др.), что позволяет ликвидировать загрязнение гидросферы и существенно улучшить экологическую обстановку.

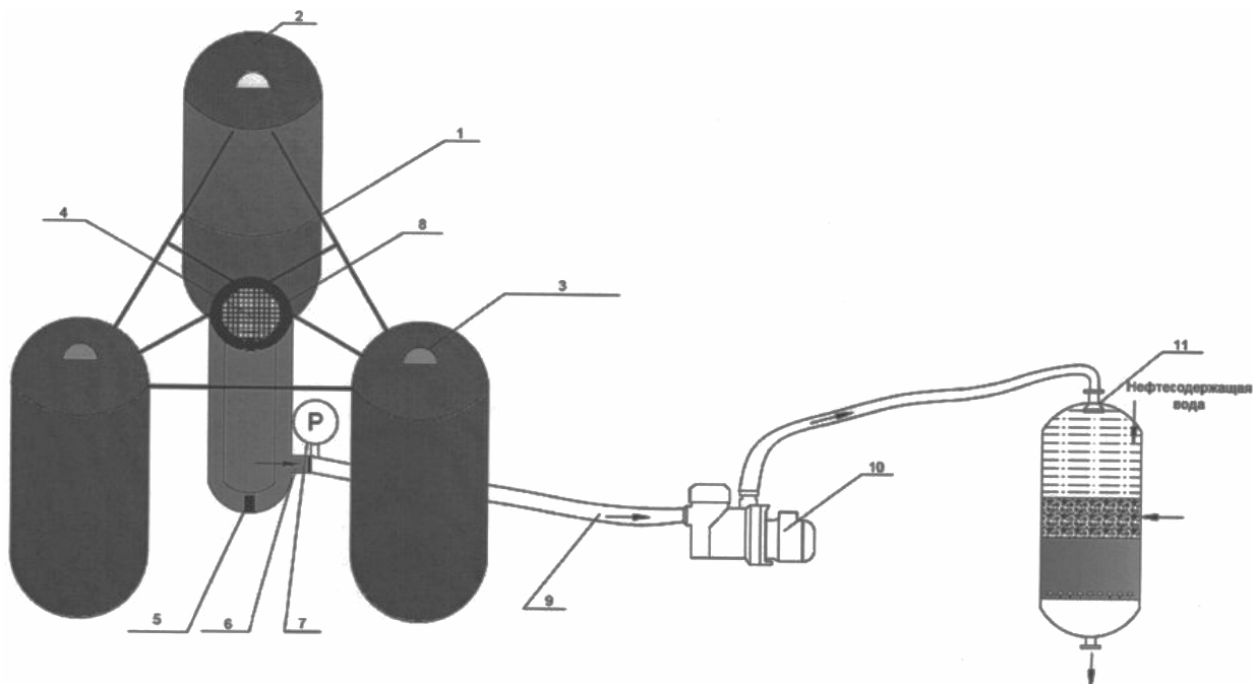


Рис. 1. Устройство для очистки с водной поверхности: 1 – каркас конструкции, 2 – балласт для поддержания данной установки в плавучем состоянии, 3 – подъемные уши для транспортировки установки, 4 – цилиндрическая съемная сетка для сбора твердых материалов, 5 – шток-датчик загрузки сетки, 6 – выходной коллектор воды, 7 – датчик давления на выходном коллекторе, 8 – корпус для съемной сетки, 9 – трубопровод, 10 – насос, 11 – очистное устройство

Таким образом, новая авторская установка достаточно эффективно и быстро выполняет удаление плавучих нефтяных загрязнений с поверхности воды.

Список литературы

1. Анализ ситуации загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами НиНП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016028368>.
2. Лушников С.В., Терещенко Н.Н., Воробьев Д.С., Франк Ю.А. Опыт применения инновационных технологий биоремедиации природных сред, загрязненных нефтью и нефтепродуктами // Материалы IV Международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития». Москва, 12-16 марта 2007 г. – М., 2007. – С. 131.
3. Катин В.Д. Повышение безопасности перевозки нефти и нефтепродуктов железнодорожным транспортом и охрана окружающей среды. – Хабаровск: ДВГУПС, 2018. – 138с.
4. Вылкован А.И. Современные методы и средства борьбы с разливами нефти. – СПб.: Технiform, 2009. – 208 с.
5. Патент №2788206 РФ. Устройство для очистки водной поверхности / М.А. Потетюрин, В.Д. Катин. – Заявка № 2022111662 от 27.04.2022; опубли. 17.01.2023, Бюл. №2.

Сведения об авторах:

Потетюрин Максим Александрович – аспирант;

Катин Виктор Дмитриевич – д.т.н., профессор кафедры «Техносферная безопасность».

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИЙ-МЕДЬ

*Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н., Бочкарев А.Г.
Тольяттинский государственный университет, Тольятти*

Ключевые слова: композиционный материал, магний, медь, активирующий флюс, смачивание, растекание.

Аннотация. В дизайне отделки помещений перспективно применение слоистых композиционных материалов на основе магния или пористого магния с медной облицовкой. Для активации поверхности и образования адгезионной связи при литье композиционных материалов с магниевой матрицей и медной облицовкой предложены составы хлористых, хлористо-фтористых флюсов, которые широко применяются при пайке магниевых сплавов. На основании проведенных исследований установлены составы активирующих флюсов, обеспечивающие растекание жидкого магния по меди. Установлено влияние температурных условий процесса на площадь растекания магния по меди.

STUDY OF THE PROCESSES OF FORMATION OF LAYERED COMPOSITE MATERIALS MAGNESIUM-COPPER

*Kovtunov A.I., Khokhlov Yu.Yu., Selyanin P.N., Bochkarev A.G.
Togliatti State University, Togliatti*

Keywords: composite material, magnesium, copper, activating flux, wetting, spreading.

Abstract. In interior decoration design, the use of layered composite materials based on magnesium or porous magnesium with copper cladding is promising. For surface activation and formation of adhesive bond when casting composite materials with a magnesium matrix and copper cladding, compositions of chloride, chloride-fluoride fluxes are proposed, which are widely used in soldering magnesium alloys. Based on the conducted studies, compositions of activating fluxes were established that ensure the spreading of liquid magnesium over copper. The effect of temperature conditions of the process on the area of magnesium spreading over copper was established.

Введение

В дизайне отделки помещений все шире применяются композиционные панели с медной облицовкой [1, 2]. В качестве наполнителя в композиционных панелях может использоваться магний, как самый легкий конструкционный металл, но более перспективно использовать пористый магний [1, 2]. Пористый магний и пористые магниевые сплавы отличаются низкой плотностью, способность поглощать механические и электромагнитные колебания, возможность деформироваться при постоянной нагрузке [3, 4].

Наиболее простыми способами получения указанных композиционных материалов являются литейные, при которых формировать композиционный материал и пористую структуру можно одновременно в форме при инфильтрации жидкого магния через слой гранул из водорастворимых солей с установленной медной облицовкой [5]. После затвердевания полученную отливку извлекают из формы и помещают в воду для растворения соли. Размер пор магниевого слоя определяется размером гранул, а пористость находится в пределах 50-70% [6].

Основной проблемой при этом является создание условий для формирования адгезионной связи между компонентами композиционного материала [5]. Для смачивания и растекания жидкого магния по поверхности твердой фазы при литье композиционных материалов применяют активирующие флюсы.

Целью работы является исследование влияния состава активирующих флюсов на смачивание и растекание магния по меди в процессе формирования композиционных материалов.

Методика исследования

Влияния состава флюсов на смачивание и растекание магния по меди определяли по площади растекания. Оценку площади растекания проводили в соответствии с ГОСТ 23904-79. В соответствии с которым на образец, представляющий собой пластину, вырезанную из листа марок М1, толщиной $\delta = 2$ мм, размерами 45×45 мм, укладывали навески магния Мг90, объемом $V = 457 \text{ мм}^3$, массой $m = 0,8$ г, засыпали флюсом и выдерживали при температуре $700\text{-}800^\circ\text{C}$ в течение 7 мин.

Нагрев производился в вертикальной муфельной печи сопротивлением МП2УМ, оснащенной потенциометром группы ХА с термопарой, спай которой устанавливается непосредственно на образце.

Подготовка поверхности медных образцов и навески магния осуществлялась путем обезжиривания ацетоном и травления в водном растворе соляной и серной кислоты [7].

Для активации поверхности меди использовали флюсы, рекомендованные для пайки магния и магниевых сплавов (табл. 1.) [7]. Флюсы 1-8 применяются при высокотемпературной пайке магния и его сплавов с припоем на основе магния, а флюсы 9-11 при низкотемпературной.

После удаления остатков флюса с поверхности образцов оценивали площадь растекания, используя программу Universal Desktop Ruler с заданием масштаба на фотографии образцов.

Результаты и обсуждение результатов исследований

Проведенные исследования показали, что хорошее смачивание и растекание магния по поверхности меди наблюдалось при использовании флюсовых составов №№1; 2; 5; 6; 9; 10; 11 (рис. 1) при температурах $700\text{-}800^\circ\text{C}$. При более низких температурах растекание магния по меди не наблюдалось, а при более высоких температурах вследствие контактного плавления меди и магния образовывались прожоги в образцах.

Максимальная площадь растекания магния по меди до 1050 мм^2 наблюдалась при активации высокотемпературным флюсом №2 при температуре 800°C (рис. 2, а). Флюсы №1, №5; №6 при температуре 800°C обеспечили площадь растекания в пределах $800\text{-}920 \text{ мм}^2$ (рис. 2, а). Активация меди низкотемпературным флюсом №10 позволила увеличить площадь растекания при 800°C до 1600 мм^2 (рис. 2, б). При использовании флюса №9 и флюса №11 площадь растекания составляла $800\text{-}900 \text{ мм}^2$ (рис. 2, б).

Табл. 1. Состав активирующих флюсов [7]

№	Компоненты	Содержание (массовые доли), %	№	Компоненты	Содержание (массовые доли), %
1	Хлорид калия-Хлорид магния Фторид натрия-Трифторид алюминия Оксид цинка	89 8 3	7	Хлорид магния Хлорид калия Хлорид натрия Хлорид кальция Фторид кальция Оксид магния	30...40 25...36 7 7 15...20 7...10
2	Фторид натрия Оксид алюминия Хлорид калия-Хлорид магния	7-9 3-5 ост.	8	Фторид калия Трифторид алюминия	45 55
3	Хлорид лития Хлорид калия Хлорид натрия Фторид натрия Гексафтороалюминат натрия	49,5 31,5 9 8 2	9	Хлорид свинца Хлорид калия Хлорид кобальта	95...97 1,5...2,5 1,5...2,5
4	Хлорид калия Хлорид лития Хлорид натрия Фторид натрия Гексафтороалюминат натрия	42,5 37 10 10 0,5	10	Хлорид калия Хлорид лития Фторид цинка Хлорид кадмия Хлорид цинка	35 30 10 15 10
5	Хлорид калия Хлорид лития Хлорид натрия Фторид натрия	46 26 24 4	11	Хлорид калия Хлорид лития Фторид калия Хлорид натрия Хлорид стронция	35 20 5 35 5
6	Хлорид калия Хлорид лития Хлорид натрия Фтористый литий Фторид натрия	42 23 21 10 4			

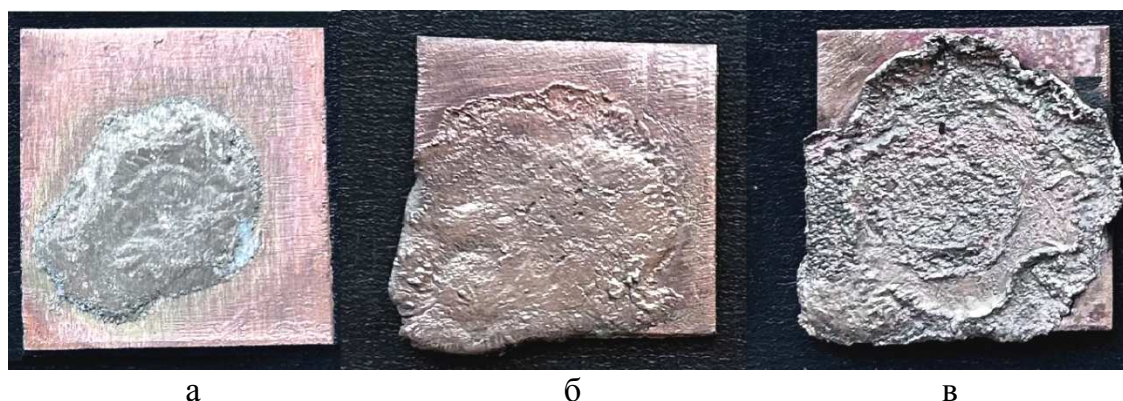


Рис. 1. Растекания магния по меди при активации флюсом №10 при температуре:
а) 700°C; б) 750°C; в) 800°C

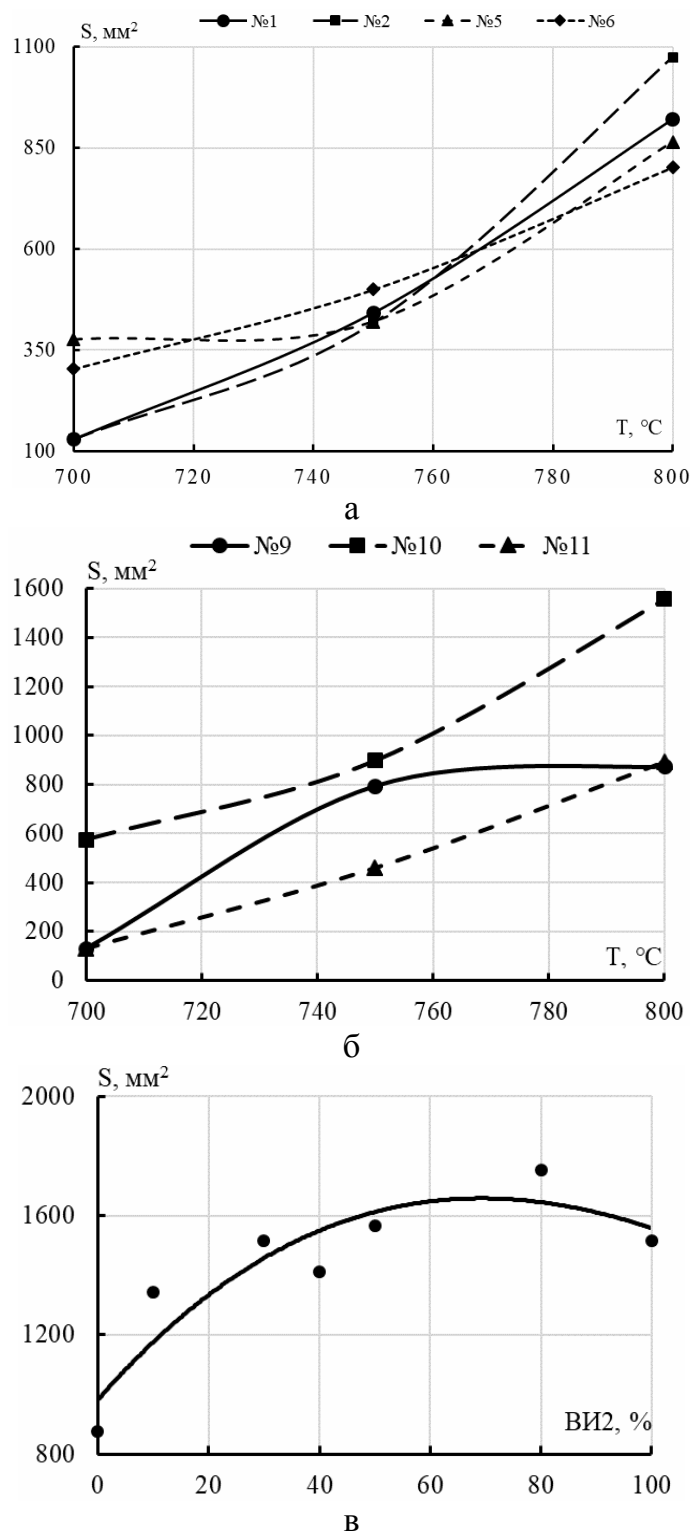


Рис. 2. Зависимость площади растекания магния по меди М1: а) от температуры при активации высокотемпературными флюсами; б) от температуры при активации низкотемпературными флюсами; в) от содержания ВИ2 при активации флюсом №9+ВИ2 и температуре 800°C

Использование флюса №9 на основе хлорида свинца (95-97%), активно взаимодействующего с магнием, привело к сильному окислению поверхности образцов с магниевым слоем. Для уменьшения окисления было предложено дополнительно в состав флюса вводить флюс ВИ2, который широко применяется при литье магниевых сплавов в качестве покровных. Дополнительное введение в

активирующий флюс №9 ВИ2 обеспечило увеличение площади растекания до 1700 мм² (рис. 2в) при 800°С. Максимальная площадь растекания при этом наблюдалась при содержании ВИ2 50-80%.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что при активации поверхности паяльными флюсами возможно смачивание и растекание магния по меди. Наибольшая площадь растекания наблюдается при активации поверхности меди хлористо-фтористым флюсом, содержащим: Хлорид калия – 35%; Хлорид лития – 30%; Фторид цинка – 10%; Хлорид кадмия – 15%; Хлорид цинка – 10%.

2. Введение в активирующий флюс на основе хлорида свинца покровного флюса ВИ2 в количестве 50-80% повышает растекаемость магния по меди и снижает окисляемость поверхности образцов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания №075-03-2023-260 (FEMR-2023-0003)

Список литературы

1. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Волобуев С.С., Кулевич В.П. Структура и свойства сваренного взрывом композита медь М1 + сплав МА2-1 // Известия ВолГТУ. – 2017. – №6. – С. 17-21.
2. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Арисова В.Н., Волобуев С.С., Бочкарев А.А. Исследование фазового состава диффузионной зоны в сваренном взрывом биметалле медь М1 + сплав МА2-1 // Известия ВолГТУ. – 2017. – №10. – С. 35-39.
3. Хохлов М.А., Ищенко Д.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы (обзор) // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3-4 (741). – С. 60-65.
4. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Новский И.В. Перспективы использования магния для производства пеноматериалов // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 9-11.
5. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В. Исследование процессов формирования композиционных материалов с магниевой матрицей, армированной титаном // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – № 3(801). – С. 34-37.
6. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н. Исследование процессов формирования и свойств пористого магния фильтрацией жидкого расплава через растворимые гранулы с предварительным вакуумированием // Цветные металлы. – 2023. – №12. – С. 70-74.
7. Петрунин И.Е., Березников Ю.И., Бунькина Р.Р. Справочник по пайке. – М.: Машиностроение, 2003. – 479 с.

Сведения об авторах:

Ковтунов Александр Иванович – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»;

Хохлов Юрий Юрьевич – заведующий лабораторией, младший научный сотрудник кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»;

Селянин Павел Николаевич – старший преподаватель, инженер кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»;

Бочкарев Александр Геннадьевич – к.т.н., доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ РЕАКТОРОВ УСТАНОВОК ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ

Бадьин Ю.А., Кузеев И.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: реактор замедленного коксования, коксовая камера, напряженно-деформированное состояние, расчет на прочность, конечно-элементный метод.

Аннотация. Основной частью установок замедленного коксования являются реакторы замедленного коксования или коксовые камеры. Их техническое состояние оказывает решающее влияние на условия эксплуатации всей установки и продолжительность аварийных простоев, это определяет важность анализа их отказов. До сих пор ситуация пониженной работоспособности коксовых камер сохраняется. Это свидетельствует о недостаточном понимании процессов повреждения. Актуальной задачей является разработка мероприятий по повышению устойчивости к эксплуатационным повреждениям коксовых камер в ходе изготовления и восстановительного ремонта.

PREVENTION OF OPERATIONAL DAMAGE TO REACTORS OF DELAYED COKING UNITS MADE OF CHROMIUM-MOLYBDENUM STEELS

Badin Yu.A., Kuzeev I.R.

Ufa Petroleum Technical University, Ufa

Keywords: delayed coking reactor, coke drum, stress-strain state, strength calculation, finite-elements method.

Abstract. The main part of delayed coking units are delayed coking reactors or coke drums. Their technical condition has a decisive impact on the operating conditions of the entire unit and the duration of emergency downtime, which determines the importance of analyzing their failures. Until now, the situation of reduced efficiency of coke drums persists. This indicates a lack of understanding of the damage processes. An urgent task is to develop measures to increase the resistance to operational damage to coke drums during manufacture and repair.

Данные по коксовым камерам. Объектом исследования являются реакторы замедленного коксования. Они представляют собой цельносварные пустотелые цилиндрические сосуды с верхним полусферическим и нижним коническим днищами, с горловинами для ввода гидрорежущего устройства вверху и выгрузки кокса внизу, штуцеров для вывода паров вверху и для ввода сырья или воды внизу, как показано на рисунке 1. Режим эксплуатации сосудов циклический. Рабочие и расчетные параметры сосудов приведены в таблице 1. Материальное исполнение сосудов – отечественная двухслойная сталь 12ХМ+08Х13. Малые значения внутреннего давления, значительная толщина стенок корпуса и материальное исполнение обеспечивают малые внутренние напряжения и незначительную скорость коррозии. Несмотря на это, наблюдаются интенсивные процессы повреждений.

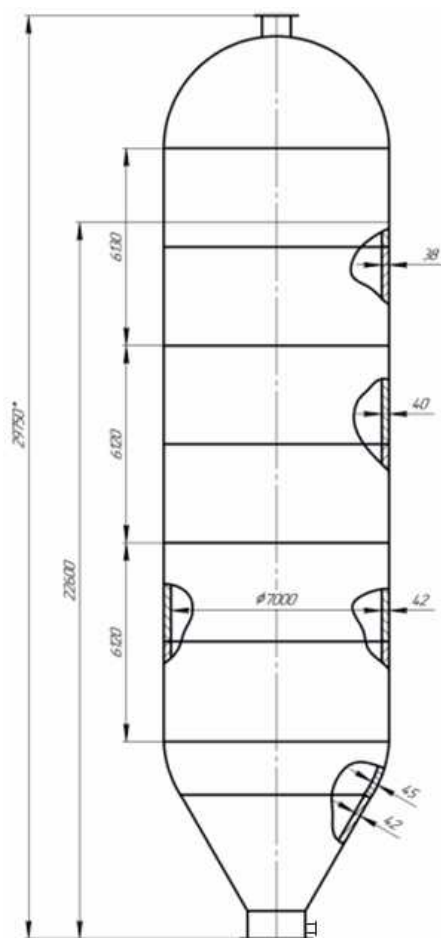


Рис. 1. Схема коксовой камеры

Табл. 1. Данные по рабочим и расчетным параметрам

Рабочие параметры	Давление верха	Не более 0,3 МПа
	Давление низа	Не более 0,5 МПа
	Температура верха	Не более 440°C
	Температура низа	Не более 495°C
Расчетные параметры	Давление верха	Не более 0,6 МПа
	Давление низа	Не более 0,8 МПа
	Температура верха	Не более 475°C
	Температура низа	Не более 510°C

В качестве основных и наиболее опасных видов повреждений реакторов замедленного коксования могут быть названы следующие:

- 1) гофрообразование или образование необратимых деформаций;
- 2) растрескивание сварных соединений и в значительно меньшей степени растрескивание основного металла.

В ходе технического диагностирования зафиксировано наличие гофров средней величины, которые показаны на рисунке 2. Деформации имеют обычный для реакторов УЗК вид, локализованных в зоне расположения кольцевых сварных швов цилиндрического корпуса с характерной «бочкообразной» формой. Такой вид отмечается многими исследователями, например, как показано на рисунке 3 [1]. В ходе эксплуатации реакторов происходит образование таких гофров первоначально в нижней части с последующим развитием в средней и верхней

частях корпуса с постепенным и достаточно медленным увеличением прогибов. Опасности аварийной разгерметизации при этом не возникает.



Рис. 2. Общий вид деформации в районе кольцевых швов (слева) и схема проведения замера прогиба гофров l (справа)

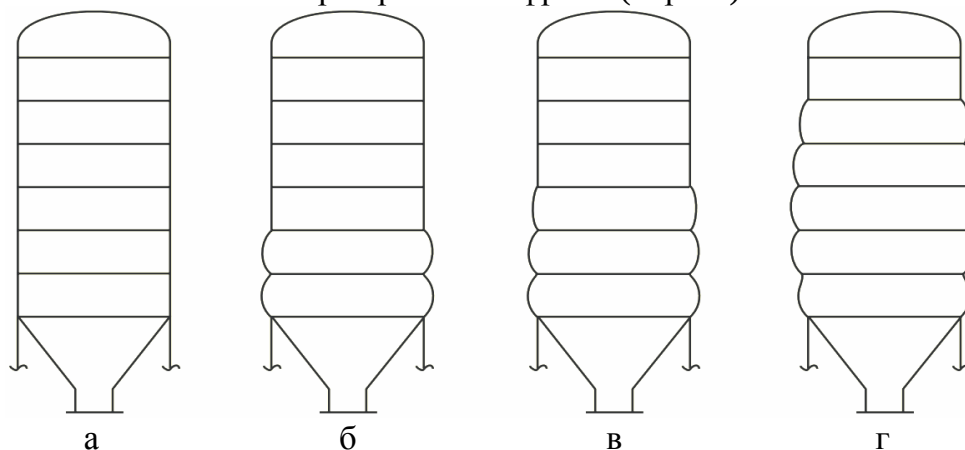


Рис. 3. Типичная картина образования и развития деформации коксовых камер [1]:
а – нормальная форма корпуса, б – начало гофрообразования, в – развитие гофрообразования, г – сильное развитие гофрообразования

Критический характер для обеспечения работоспособности реакторов УЗК вследствие опасности аварийной разгерметизации имеет растрескивание сварных соединений. Растрескивание с наружной и внутренней стороны корпуса имеют принципиально различную природу. Растрескивание сварных соединений с наружной стороны корпуса имеет природу растрескивания однородных сварных соединений, растрескивание с внутренней стороны корпуса имеет природу растрескивания разнородных сварных соединений.

На рисунках 4-5, 6-7 показаны виды и места дефектов.

Как видно из рисунков, наблюдаются протяженные растрескивания кольцевых сварных соединений с наружной и внутренних сторон корпуса. Для внутренней поверхности корпуса растрескивания фактически происходят по всему периметру кольцевых сварных соединений, Проблема растрескивания с внутренней стороны корпуса значительно острее в сравнении с растрескиванием с наружной стороны корпуса.



Рис. 4. Несквозные трещины по линии сплавления с нижней и верхней стороны кольцевого сварного шва корпуса коксовой камеры, выявленные в ходе капиллярной дефектоскопии (показаны стрелками) с наружной стороны сосуда

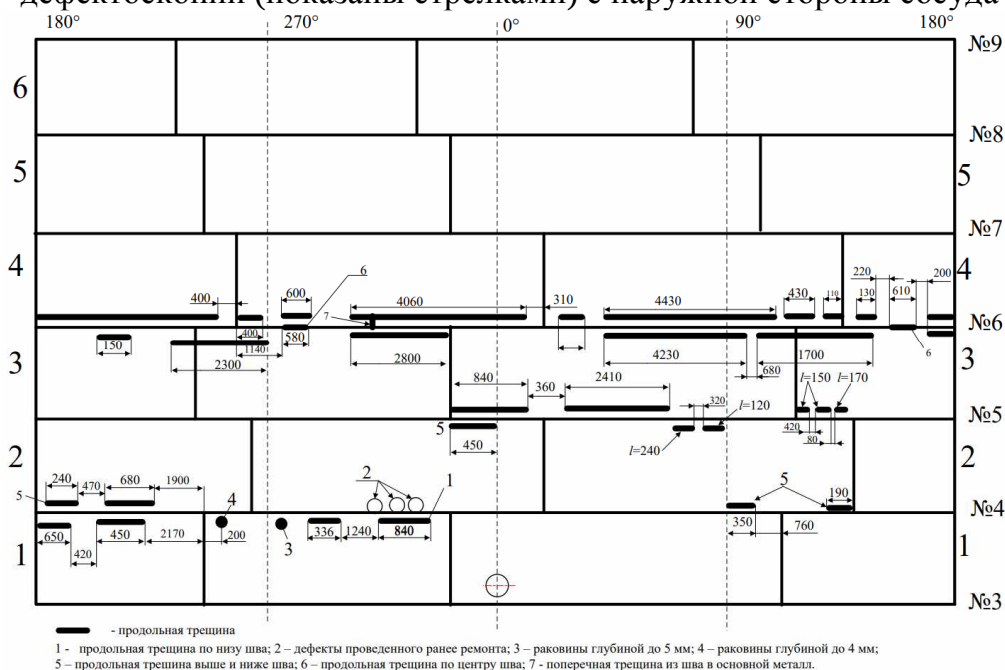
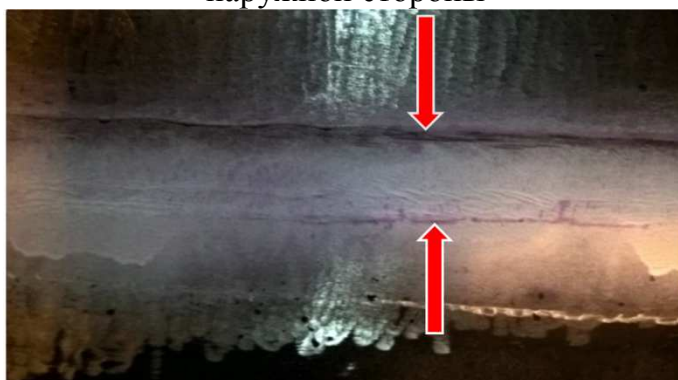


Рис. 5. Схема расположения дефектов в сварных швах корпуса коксовой камеры Р-104 с наружной стороны



а

Рис. 6. а) несквозные трещины по линии сплавления с нижней и верхней стороны кольцевого сварного шва корпуса коксовой камеры, выявленные в ходе капиллярной дефектоскопии (показаны стрелками) с внутренней стороны сосуда

температурных напряжений» [2]. Поэтому при определении механизма повреждений большое внимание было уделено исследованию температурных полей коксовых камер.

Важным указателем на причины возникновения повреждений реакторов УЗК является временная локализация повреждений. Как правило, сквозное растрескивание возникает на стадии охлаждения водой. Фактически только это обстоятельство позволяет эксплуатировать коксовые камеры в условиях интенсивного растрескивания. Пропуск воды не создает опасности загорания и пожара, но вызывает необходимость аварийной остановки для проведения ремонта. Можно сделать вывод, что наиболее критической стадией в ходе эксплуатации коксовых камер является стадия охлаждения с заполнением водой пористого коксового «пирога». При охлаждении горячего кокса образуется **переходная зона температур** [3, 4].

В ней происходит резкое изменение температуры от части коксового «пирога», заполненной водой, к части коксового «пирога» с высокой температурой. При проведении стадии охлаждения для корпуса сосуда реализуется ситуация сопряжения двух краев цилиндрических оболочек, находящихся при различной температуре, как показано на рисунке 9. В переходной зоне температур возникают дополнительные, «краевые» нагрузки по контуру сопрягаемых элементов, вызывающие **напряжения изгиба** в материале.

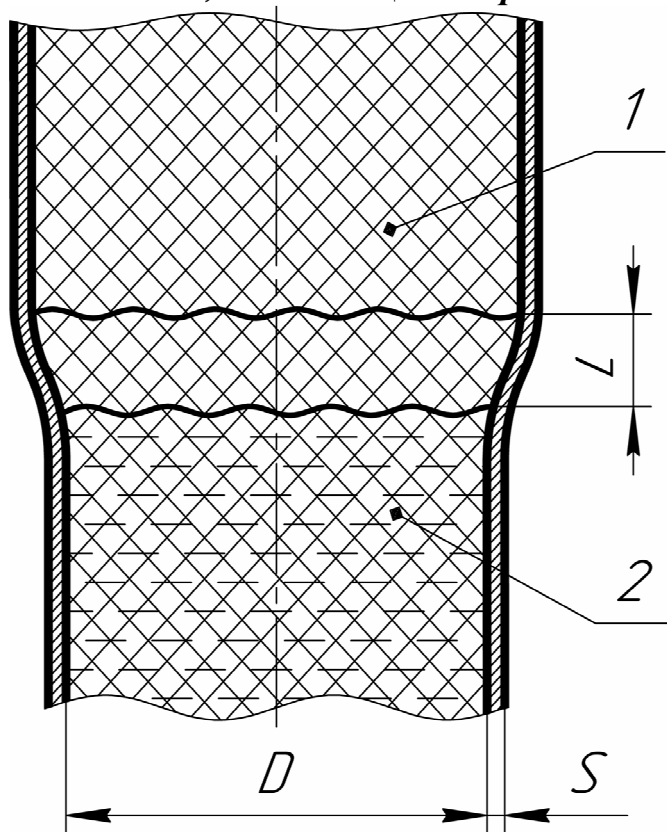


Рис. 9. Образование переходной зоны температур в коксовом «пироге» в ходе стадии охлаждения; температуры $t_1 > t_2$; L – ширина переходной зоны, температурные деформации условно увеличены

Исследование переходной зоны температур проводилось с разработкой мобильных быстроразъемных термопар с записью показаний температуры на

носители информации. Оригинальная система оперативного мониторинга температуры (СОМТ-01) была смонтирована на корпусах реакторов. Принимая во внимание осесимметричность образования температурного распределения и деформирования корпуса, наиболее плотная установка приборов была предусмотрена в осевом направлении, как показано на рисунке 10. Производилась запись показателей температуры в течение месяца с периодичностью 1 минута. Проведение такой работы позволило получить данные по размеру переходной зоны температур и максимальным величинам перепадов температур. На рисунке 11 показан пример тренда изменения температуры по показаниям приборов в 9 рабочих циклах. При этом для стадии охлаждения наблюдается максимальные значения перепадов температур между приборами в осевом направлении.



Рис. 10. Смонтированная система (а) и монтаж модуля системы СОМТ-01 (б)

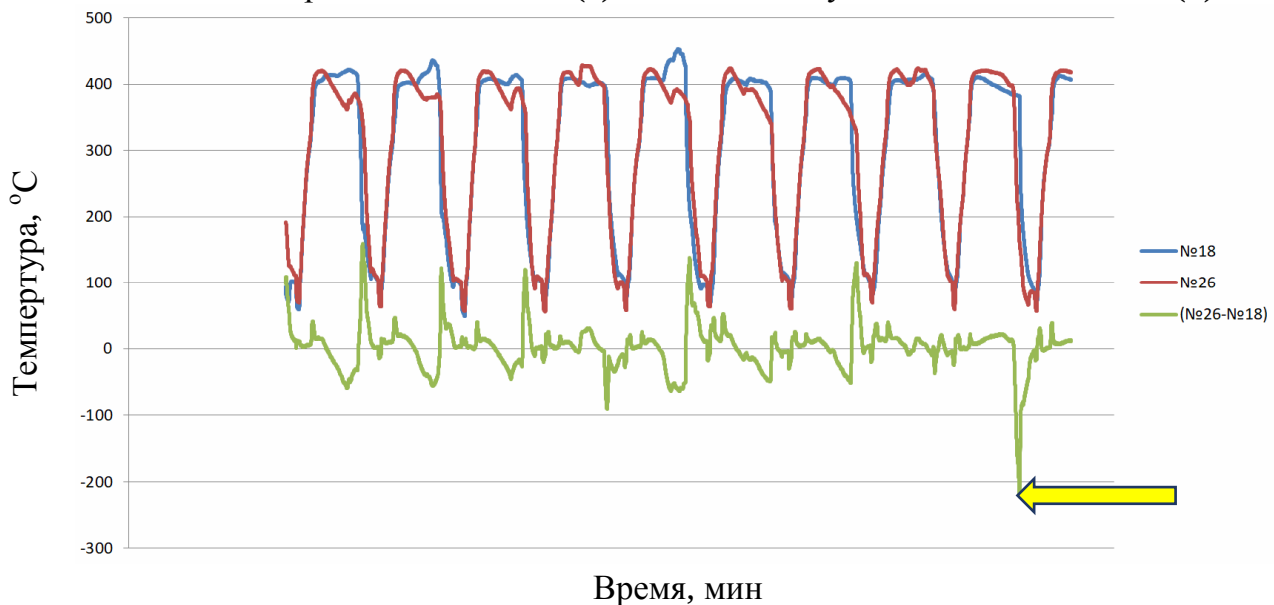


Рис. 11. Тренд изменения температуры по показаниям приборов №18 и №26; также показана разность между показаниями приборов №26 и №18; мобильные термопары №18 и № 26 расположены в одной меридиональной плоскости, термопара №26 расположена на 0,4 м выше термопары №18; фиксируется максимальный перепад в размере 225°C, показан стрелкой

Определение параметров переходной зоны температур позволило получить исходные данные для расчета на прочность. В силу значительной затрудненности

аналитического решения для решения задачи используется численный метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе конечно-элементного анализа «ANSYS Workbench 19.3».

Расчетная модель задачи исследования НДС коксовых камер показана на рисунке 12, она включает в себя участок цилиндрического корпуса. К внутренней поверхности корпуса прикладываются нагрузки от внутреннего давления. Распределение температуры принимается для стадии охлаждения. В этом случае образуются две зоны с высокой и малой температурой, при этом между этими зонами имеется переходная зона температур с определенной шириной, в которой температура оболочки определяется в зависимости от высоты расположения локального участка. Исходные данные для расчета на прочность приведены в таблице 2.

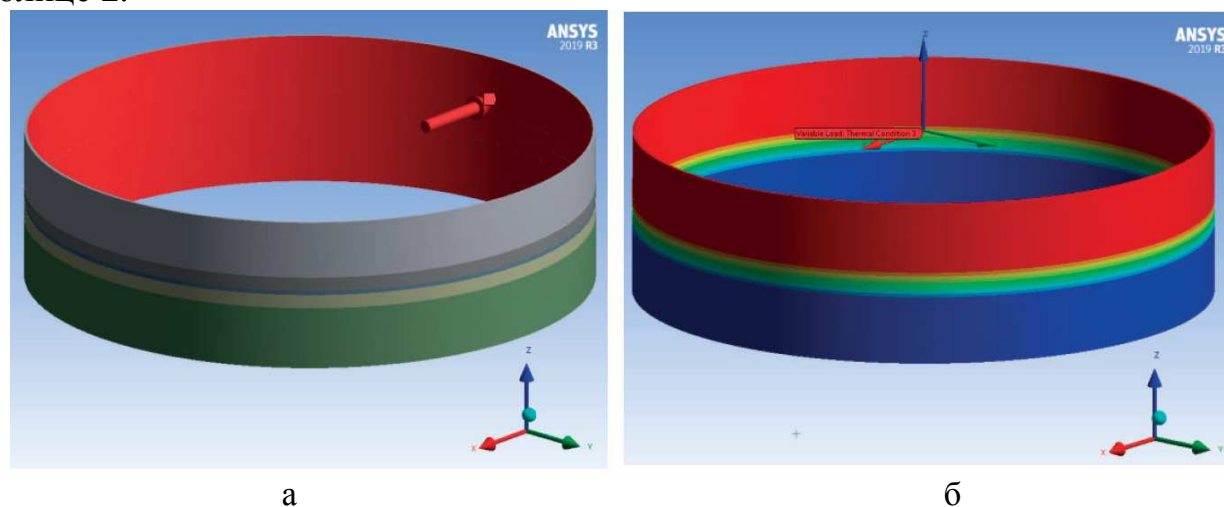


Рис. 12. Расчетная модель задачи (а) и распределение температур для задачи (б); задается переходная зона температур от 380°С в верхней части цилиндрического корпуса до 155°С в нижней части

Табл. 2. Исходные данные для расчета на прочность

Элемент и размеры, $D \times S$		Материал	Внутреннее давление, МПа	Расчетная температура t , °С	Модуль продольной упругости материала E , 10^{-5} , МПа	Временное сопротивление R_m , МПа	Предел текучести R_e , МПа	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа
Цилиндрическая обечайка, 7000×41	Верхняя часть	12ХМ	0,4	380	1,804	434,0	201,2	134,4
	Нижняя часть	12ХМ	0,4	155	1,998	433,6	218	146,0

На рисунке 13 показаны результаты расчетного исследования с распределением эквивалентных напряжений по 4-й теории прочности. Расчетная схема деформирования цилиндрической оболочки показана на рисунке 14. Как видно, наблюдается высокий уровень напряжений, значительно превышающий значения допускаемых напряжений и предела текучести материала. Распределение напряжений по толщине стенки показано на рисунке 15.

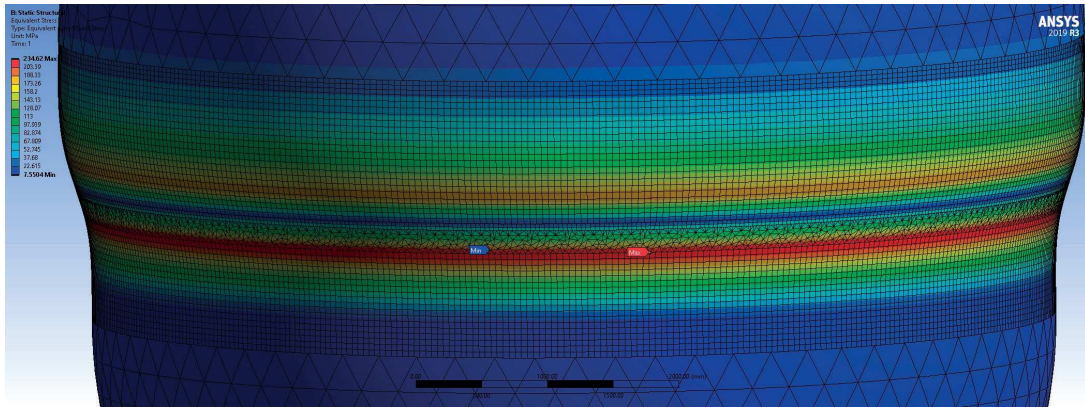


Рис. 13. Распределение эквивалентных напряжений, деформации условно увеличены

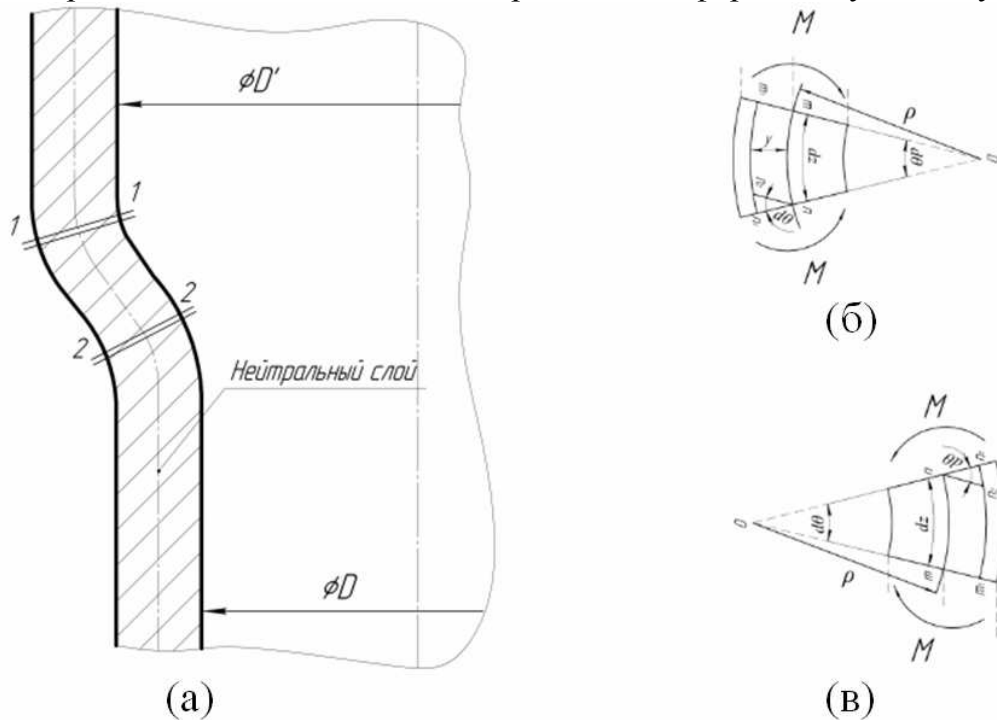


Рис. 14. Деформирование цилиндрического корпуса (продольное сечение); а – общая картина деформирования в переходной зоне температуры цилиндрического корпуса с расположением поперечных сечений корпуса; б – для верхней зоны, сечение «1-1» (зона растяжения на наружной поверхности зона сжатия на внутренней); в – для нижней зоны, сечение «2-2» (зона растяжения на внутренней поверхности, зона сжатия на наружной)

На рисунке 16 показана расчетная диаграмма для оценки влияния величины температурного перепада и высоты переходной зоны температур на величину максимальных напряжений в цилиндрическом корпусе. Также были получены полиномиальные уравнения в форме:

$$\sigma(h) = m_0 + m_1 \cdot h + m_2 \cdot h^2 + m_3 \cdot h^3,$$

где σ – максимальные напряжения в цилиндрическом корпусе, МПа;

h – высота переходной зоны температур, мм.

Коэффициенты полиномиальных зависимостей m_i , полученные методами статистического анализа, представлены в таблице 3.

Для обеспечения достоверности полученных показаний были проведены оценки минимального необходимого расстояния между приборами в вертикальном (осевом) направлении. Для принятой величины высоты переходной

зоны в размере в исходных данных при проведении расчета НДС при использовании диаграммы на рисунке 16 и полученных полиномиальных зависимостей подтверждается обеспечение наивысшего уровня возникающих напряжений в цилиндрической оболочке.

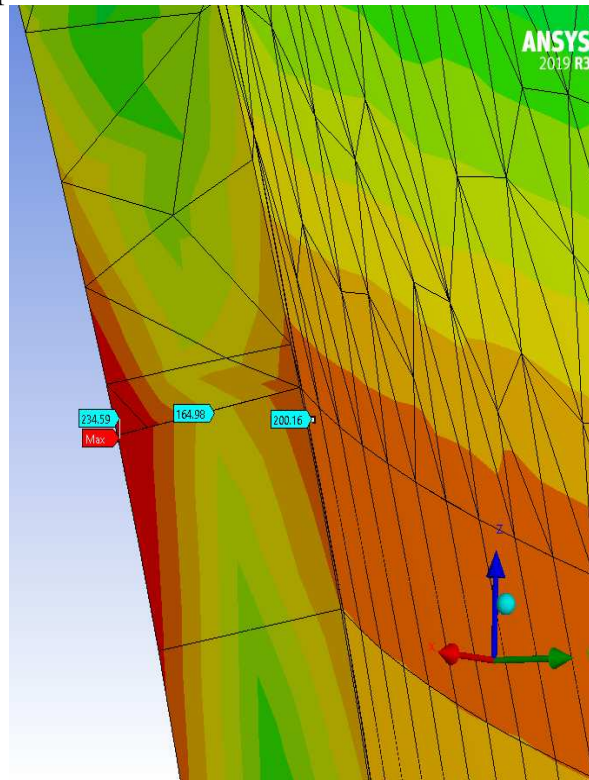


Рис. 15. Распределение эквивалентных напряжений по сечению стенки корпуса для нижней части переходной зоны температур

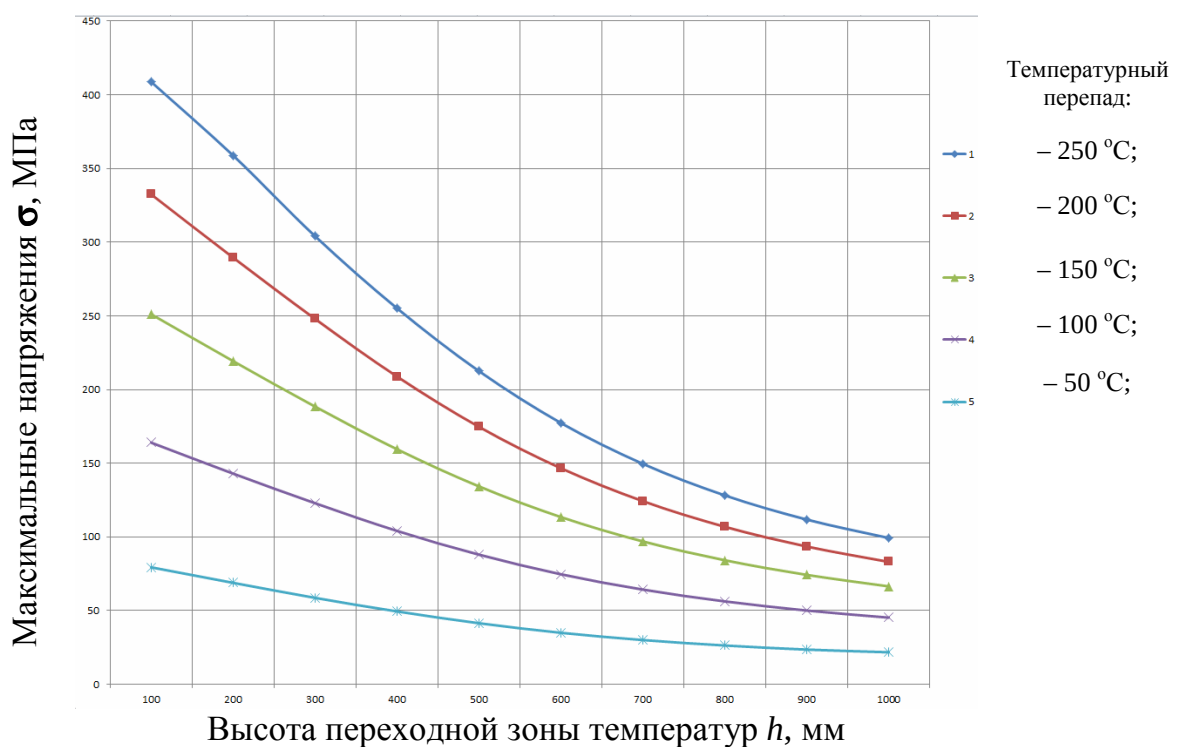


Рис. 16. Диаграмма влияния величины температурного перепада и высоты переходной зоны температур на величину расчетных максимальных изгибающих напряжений в цилиндрическом корпусе

Табл. 3. Данные полиномиальных зависимостей

№	Температурный перепад, °C	Коэффициенты				R^2
		m_0	m_1	m_2	m_3	
1	250	472,16	- 0,629	0,0002	6E-08	0,9996
2	200	385,82	- 0,5371	0,0002	0	0,9997
3	150	288,78	- 0,3815	0,0001	2E-08	0,9998
4	100	189,65	- 0,2602	0,0001	0	0,9998
5	50	92,405	- 0,132	6E-05	0	0,9998

Характер распределения напряжений свидетельствует о действии нагрузок изгиба для цилиндрической оболочки. В нижней части переходной зоны температур на наружной поверхности оболочки наблюдаются максимальные значения напряжений (234,59 МПа), несколько меньшие напряжения для внутренней поверхности оболочки (200,16 МПа). В серединной части оболочки наблюдается наименьший уровень напряжений (164,98 МПа). Во всех случаях наблюдается значительное превышение значения допускаемого напряжения материала (136 МПа), на наружной поверхности материала превышение предела текучести (218 МПа). Это говорит о том, что будет происходить образование и накопление необратимых деформаций, возникновение и развитие дефектов в виде растрескивания до сквозного.

До настоящего времени изгибающий характер возникающих напряжений в корпусах реакторов УЗК не обращал на себя внимание. Проявлением описанного механизма повреждения является образование необратимых деформаций (гофров) в зонах расположения кольцевых сварных соединений корпусов и протяженных растрескиваний кольцевых однородных сварных соединений корпусов в окружном направлении (до 5 м с наружной стороны) и разнородных сварных соединений с внутренних стороны (практически по всему периметру), при этом продольные сварные соединения повреждаются в значительно меньшей степени. Установленные в ходе проведения технической диагностики реакторов УЗК характер повреждений и факты эксплуатации реакторов УЗК в течение продолжительного времени с наличием протяженных растрескиваний кольцевых сварных соединений подтверждают предложенный механизм повреждений. Особенности распределения изгибающих напряжений по сечению стенки, с максимальными значениями на наружной и внутренней поверхностях и снижением с увеличением глубины до нулевого значения на серединной поверхности (нейтральном слое) определяет малую скорость и глубину развития растрескиваний. Дополнительное влияние оказывает нерегулярный характер возникновения максимальных изгибающих напряжений.

Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по предотвращению повреждений в виде гофрообразования. Наиболее рациональным действием представляется введение в технические требования для отечественной стали 12ХМ более высоких значений механических характеристик, прежде всего предела текучести в состоянии поставки, не менее чем для сталей зарубежного производства, как показано в таблице 4 [6].

Как видно, сталь 12ХМ по своим механическим характеристикам соответствует зарубежной стали более низкого класса 1, в то время как согласно

имеющимся данным [5], изготовление коксовых камер за рубежом производится исключительно из сталей более высокого класса 2.

Табл. 4. Технические требования сталей 12ХМ и «А387Gr11» [7, 8]

Марка стали	Диапазон значений предела прочности, МПа	Предел текучести, не менее, МПа
12ХМ	430-550	245
A387Gr11Class 1	415-585	240
A387Gr11Class 2	515-690	310

Для стали класса 2 пределы прочности не менее чем на 20% и пределы текучести не менее чем на 25% превышают пределы прочности и текучести стали класса 1. Применение стали с более низкими механическими характеристиками влияет на выполнение условий прочности и увеличивает повреждаемость. При рассмотрении результатов проведенного расчета НДС можно сделать вывод, что увеличение предела текучести материала для расчетных условий на величину 30-50 МПа позволит обеспечить выполнение условий прочности, что указывает на целесообразность применения более высокопрочного материала. В качестве основной меры предотвращения повреждений в виде гофрообразования реакторов УЗК наиболее рациональным действием представляется введение в технические требования для отечественной стали 12ХМ более высоких значений механических характеристик (предела текучести в состоянии поставки) на уровне сталей зарубежного производства A387Gr11Class 2.

Сравнительный анализ данных эксплуатации реакторов УЗК, отечественного производства и изготовленных за рубежом, показывает эффективность применения высокопрочных сталей в качестве материального исполнения реакторов УЗК [6], что подтверждает изложенный подход к оценке НДС реакторов УЗК в ходе эксплуатации.

Выводы

1) На основании временной локализации повреждений в виде растрескивания с разгерметизацией оболочек реакторов УЗК предложен механизм повреждения от воздействия изгибающих нагрузок, которые возникают в ходе стадии охлаждения водой.

2) Проведенное расчетное исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки реактора УЗК для стадии охлаждения водой установило, что эквивалентные напряжения могут достигать предельных значений предела текучести и привести к образованию необратимых деформаций и повреждению корпуса реактора УЗК с материальным исполнением из отечественной стали 12ХМ.

3) Получена расчетная диаграмма для оценки влияния величины температурного перепада и высоты переходной зоны температур на величину максимальных напряжений в цилиндрической оболочке реактора УЗК.

4) На основе результатов проведенного расчетного исследования напряженно-деформированного состояния реакторов УЗК сформулированы рекомендации по изменению материального исполнения реакторов УЗК с целью

повышения устойчивости к эксплуатационным повреждениям в виде применения высокопрочных сталей с учетом положительного зарубежного опыта применения таких сталей.

Список литературы

1. Stewart C., Stryk A., Presley L. Coke drum design // Petroleum Tech. Quarterly. 2006, no. 3, pp. 63-69.
2. Кузеев И.Р., Филимонов Е.А., Абызгильдин Ю.М., Кретинин В.М. Долговечность реакторов установок замедленного коксования. Тематический обзор. Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. – М.: ЦНИИТЭнефтехим. 1986. – 56 с.
3. Бадьин Ю.А., Бударагин М.В., Киселев А.Н., Пузанов А.И. Причины повреждений корпусов реакторов замедленного коксования и меры по их предотвращению. // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 6. – С. 173-186. – DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-173-186.
4. Бадьин Ю.А., Бударагин М.В., Киселев А.Н., Пузанов А.И. Исследование влияния температурных полей корпусов реакторов замедленного коксования на напряженно-деформированное состояние. // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 191-203. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-1-191-203.
5. API TR 934-G-2016. Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units. – Washington: American Petroleum Institute, 2016. – 57 p.
6. Бадьин Ю.А. Влияние материального исполнения реакторов замедленного коксования на повреждаемость в ходе эксплуатации // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, №2. – С.183-196. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-2-183-196.
7. ГОСТ 5520-2017. Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 31 с.
8. ASTM A387/A387M-17a. Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, ChromiumMolybdenum. – West Conshohocken: ASTM, 2017. – 6 p. – DOI: 10.1520/A0387_A0387M-17A.

Сведения об авторах:

Бадьин Юрий Аркадьевич – аспирант;

Кузеев Искандер Рустемович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование».

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К КАВИТАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ДИСПЕРГАТОРОВ И МУЛЬТИФАЗНЫХ ОСЕВЫХ НАСОСОВ

Харисов Э.Т.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва

Ключевые слова: кавитационное воздействие, диспергатор, мультифазный осевой насос, математическое моделирование, стендовые испытания.

Аннотация. В рамках выполнения данной работы были проведены исследования кавитационной устойчивости диспергатора в конструкцию, которого включено рабочее колесо осевого типа. По результатам проведенных исследований были выведены критерии, которые помогут усовершенствовать конструкцию диспергаторов и мультифазных осевых насосов, которые применяются на месторождениях для добычи флюида с высоким газовым фактором. Для достижения результата были проведены: математическое моделирование течения потока в в проточной части диспергатора; стендовые испытания исследуемой конструкции; составление расчетной программы для определения кавитационной устойчивости.

INVESTIGATION OF CAVITATION RESISTANCE OF GAS HANDLERS AND MULTIPHASE AXIAL FLOW PUMPS

Kharisov E.T.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow

Keywords: cavitation effect, dispersant, multiphase axial pump, numerical modeling, bench tests.

Abstract. Within the framework of this work, studies of cavitation stability of a gas handler with an axial-type impeller have been carried out. According to the results of the conducted researches the criteria were deduced, which will help to improve the design of dispersants and multiphase axial pumps, which are used in the fields for fluid production with high gas factor. To achieve the result, the following were carried out: mathematical modeling of the flow in the flowing part of the disperser; bench tests of the investigated design; compilation of the calculation program to determine the cavitation stability.

На сегодняшний день существует большое количество разных конструкций диспергаторов и мультифазных осевых насосов. Данный тип оборудования используется в составе установок электроприводных насосов для стабильной работы в условиях высокого газосодержания. Основной принцип работы газостабилизирующих устройств основан на том, что они не удаляют газовую фазу, а подготавливают ее до такого состояния, при котором далее идущие секции насоса могли ее прокачать в составе флюида. Диспергаторы обеспечивают мелкодисперсную смесь. Мультифазные осевые насосы сжимают газовую фазу, превышая давление насыщения.

При работе газостабилизирующего устройства происходят явления схожие с кавитацией. В рамках выполнения данной работы рассматривалась конструкция осевой ступени диспергатора представленная на рисунке 1 [1, 2].



Рис. 1. Схема ступени осевого насоса: 1 – гильза (статор); 2 – шнек (рабочее колесо); 3 – направляющий аппарат (статор); 4 – вал

Была выполнена серия стендовых испытаний и была выявлена зона, в которой исследуемая конструкция работала одинаково эффективно (создавала положительный перепад давления) независимо от объема содержания свободного газа β и давления на входе в диспергатор (рис. 2) [3, 4].

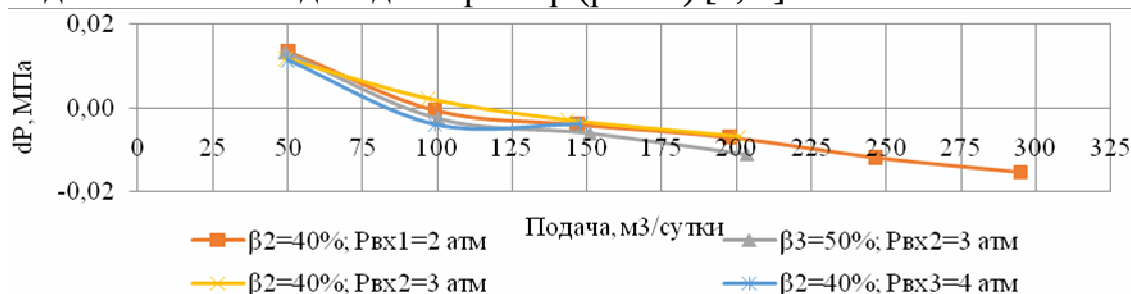


Рис. 2. Перепады давлений в диспергаторе при разном содержании свободного газа

Из представленных графиков видно, что в диапазоне подач от 50 до 100 м³/сутки работает эффективно. Это объясняется тем, что на данных режимах работы коэффициент кавитационной быстроходности принимает $C_{кр}$ высокие значения. В таблице 1 приведены результаты расчета $C_{кр}$ для соответствующих подач [5].

Табл. 1. Коэффициенты $C_{кр}$ для разных подач Q

№	Расход на входе Q , м ³ /сутки	Кавитационный коэффициент быстроходности $C_{кр}$
1	18,11	4682,083
2	44,30	4419,156
3	60,51	4229,903
4	83,97	4000,276
5	105,57	3827,59
6	130,94	3659,158
7	177,91	3413,24
8	198,83	3322,743
9	223,32	3227,537
10	263,12	3091,902
11	292,75	3002,774

Для удобства вычислений, оценки и определений срывной характеристики насоса была создана программа в Microsoft Excel. Программа содержит блок исходных данных и блок расчетной части с внесенными зависимостями.

Блок исходных данных содержит следующие переменные: частота вращения; давление насыщенных паров; диаметральный размеры рабочего колеса.

Блок расчетных данных включает следующие данные: давление на входе в насос; расход жидкости; напор насоса; коэффициент быстроходности; средняя меридиональная скорость потока; режимный параметр шнека; коэффициент кавитации; допустимый кавитационный запас; кавитационный коэффициент быстроходности.

В ходе выполнения данной работы было доказано, что исследуемая конструкция диспергатора является быстроходной и стойкой к явлениям кавитации. По вычисленным коэффициентам кавитационной быстроходности можно сделать вывод, что в диапазоне подач от 18,11 до 83,97 м³/сутки шнек постоянного шага длиной 70 мм наиболее эффективен и стоек к высокому содержанию свободного газа на входе.

Список литературы

1. Высокооборотные лопаточные насосы / Под ред. д-ра техн. наук Б.В. Овсянникова и д-ра техн. наук В.Ф. Чебаевского. – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.
2. Овсянников Б.В., Яловой Н.С. Моделирование и оптимизация характеристик высокооборотных насосных агрегатов. – М.: Машиностроение, 1992. – 256 с.
3. Боровский Б.И., Ершов Н.С., Селвфонов В.С. Расчет и проектирование шнекоцентробежного насоса: Учебное пособие / Под ред. Б.В. Овсянникова. – М.: МАИ, 1987. – 77 с.
4. Панайотти С.С., Савельев А.И., Кузнецов А.В. Автоматизированный расчет и проектирование высокооборотного шнекоцентробежного насоса: Руководство пользователя. – Калуга, 2008. – 70 с.
5. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные машины. Теория, расчет и конструирование. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.

Сведения об авторе:

Харисов Эмиль Тимурович – аспирант.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПО АУСТЕНИТНОМУ ВАРИАНТУ РЕАКТОРОВ УСТАНОВОК ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ

Бадьин Ю.А., Кузеев И.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: реактор замедленного коксования, коксовая камера, технология сварки разнородных сталей, напряженно-деформированное состояние, расчет на прочность, конечно-элементный метод.

Аннотация. В ходе эксплуатации реакторов установок замедленного коксования (или коксовых камер), изготовленных из биметаллов с основным слоем из хромомолибденовых сталей и плакирующим слоем из нержавеющей сталей возникают многочисленные случаи повреждений разнородных сварных соединений, изготовленных или ранее отремонтированных с применением сварки по аустенитному варианту, что свидетельствует о недостатках ранее применявшейся технологии сварки. Это определяет актуальность задачи совершенствования такой технологии сварки.

IMPROVEMENT OF AUSTENITIC WELDING TECHNOLOGY FOR REACTORS OF DELAYED COKING UNITS MADE OF CHROMIUM-MOLYBDENUM STEELS

Badin Yu.A., Kuzeev I.R.

Ufa Petroleum Technical University, Ufa

Keywords: delayed coking reactor, coke drum, dissimilar welding, stress-strain state, strength calculation, finite-elements method.

Abstract. During the operation of reactors of delayed coking units (or coke drums) made of bimetals with a base layer of chromium-molybdenum steels and a cladding layer of stainless steels, numerous cases of damage to dissimilar welded joints made or previously repaired using austenitic welding occur, which indicates the disadvantages of earlier the applied welding technology. This determines the urgency of the task of improving such welding technology.

В настоящее время реакторы установок замедленного коксования изготавливаются преимущественно из биметаллов с основным слоем из хромомолибденовых сталей и плакирующим слоем из нержавеющей сталей. Это определяет наличие разнородных сварных соединений для сварки плакирующего слоя при изготовлении такого оборудования. В ходе эксплуатации реакторов установок замедленного коксования (УЗК) возникает большое количество дефектов в виде растрескивания однородных сварных соединений, а также основного металла. Это также приводит к необходимости получения разнородных сварных соединений. Проведение сварки по перлитному варианту с получением однородных сварных соединений вызывает значительные затруднения в силу сложности организации предварительного подогрева и последующей термической обработки зон ремонта. Как правило, выбор делается в пользу проведения сварки по аустенитному варианту с получением

разнородных сварных соединений без необходимости проведения термической обработки. В ходе эксплуатации возникают многочисленные случаи повреждений в виде растрескивания разнородных сварных соединений плакирующего слоя. В ходе последующей эксплуатации наблюдаются многочисленные случаи повторного растрескивания в зонах ремонта, как показано на рисунках 1-2. Типичный вид мест растрескивания с внутренней стороны оболочки показан на рисунках 3, а и 3, б. Это свидетельствует о недостатках применяющейся технологии сварки при изготовлении и ремонте.

При рассмотрении рисунков 1 и 2 обращают на себя внимание характерные особенности растрескиваний – протяженные растрескивания в окружном направлении по линиям сплавления, а также поперечное растрескивание металла сварных швов с выходом в основной металл на малом протяжении (до 20 мм). При этом дальнейшего развития растрескивания в продольном направлении не происходит, несмотря на то, что растрескивание происходит по линии действия максимальных напряжений от внутреннего давления. Это подтверждает предположение о том, что возникновение таких повреждений обусловлено действием изгибающих нагрузок, возникающих в ходе проведения стадии охлаждения коксовой камеры водой [1, 2].

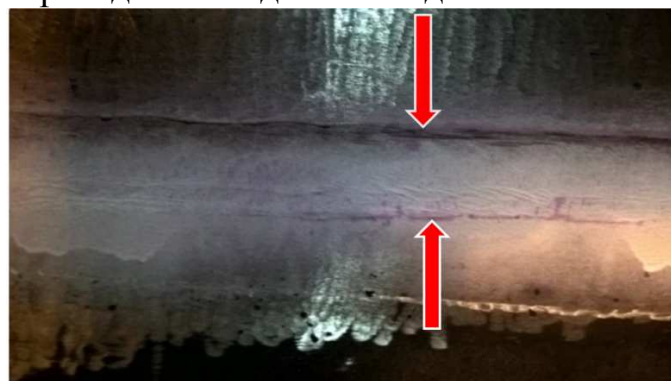


Рис. 1. Места ремонта кольцевого сварного соединения коксовой камеры с наружной стороны (ремонтные аустенитные сварные швы по линиям сплавления показаны стрелками); на рисунке показано наличие повторного ремонта по верхней и нижней линиям сплавления

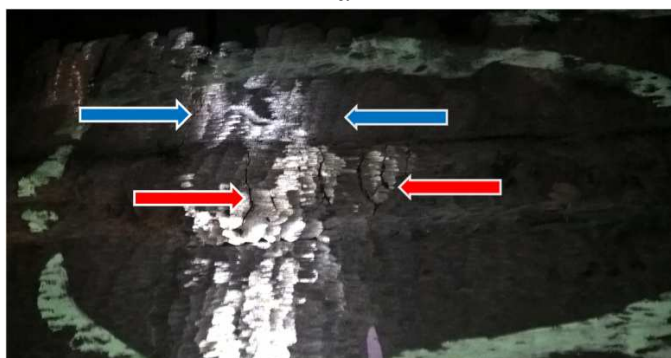


Рис. 2. Растрескивание в кольцевых сварных швах цилиндрического корпуса реактора (вид с наружной стороны), которые были ранее отремонтированы с применением аустенитного варианта сварки (показаны стрелками); поперечные трещины в кольцевом сварном шве; наблюдается распространение трещин на основной металл на малом протяжении (до 20 мм)

При рассмотрении рисунков 3, а и 3, б также можно отметить характерные особенности повреждений разнородных сварных сварки плакирующего слоя. Растрескивания аналогично имеет вид протяженных растрескиваний в окружном направлении по линиям сплавления, а также имеется поперечное растрескивание металла сварных швов с распространением на примыкающий плакирующий слой. Как видно из рассмотрения рисунка 4, растрескивание преимущественно происходит для кольцевых сварных швов корпусов, растрескивание продольных сварных швов происходит в значительно меньшей степени и преимущественно в зонах, приближенных к кольцевым сварным швам. Растрескивание кольцевых сварных швов плакирующего слоя с внутренней стороны происходит по линиям сплавления и в значительно меньшей степени в поперечном направлении. Наибольшее раскрытие поперечного растрескивания наблюдается в вершине валика усиления. Аналогичным образом как для растрескивания разнородных сварных соединений с наружной стороны корпуса, поперечное растрескивание разнородных сварных соединений плакирующего слоя распространяется на небольшое расстояние на примыкающий плакирующий слой (до 20 мм), дальнейшего развития растрескивания не происходит. Таким образом, это также подтверждает предположение о том, что возникновение таких повреждений для внутренней стороны корпуса обусловлено действием изгибающих нагрузок, возникающих в ходе проведения стадии охлаждения коксовой камеры водой [1-2].



а



б

Рис. 3. а) несквозные трещины по линии сплавления с нижней и верхней стороны кольцевого сварного шва корпуса коксовой камеры, выявленные в ходе капиллярной дефектоскопии (показаны стрелками) с внутренней стороны сосуда; б) поперечное растрескивание наплавленного слоя кольцевого сварного шва плакирующего слоя с внутренней стороны (показано красными стрелками), наибольшая ширина раскрытия до 1,5 мм в вершине валика усиления; поперечное растрескивание плакирующего слоя от линии сплавления в зоне, примыкающей к кольцевому сварному шву на малом протяжении (до 20 мм), показано синими стрелками

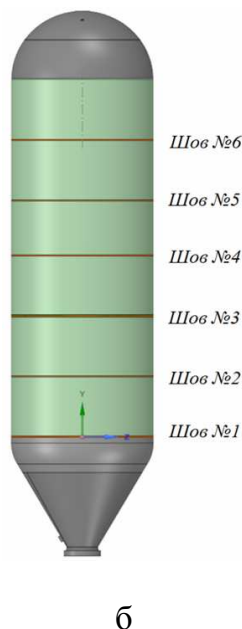
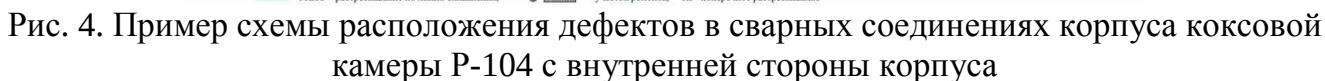


Рис. 5. а) распределение относительной протяженности растрескиваний с внутренней стороны кольцевых сварных швов корпуса, определенных для ремонта по высоте обследованных реакторов УЗК (технологические индексы Р-101, Р-102, Р-103, Р-104; б) расположение кольцевых сварных швов корпуса обследованных реакторов УЗК

87

особенностей эксплуатации такого оборудования с рассмотрением напряженно-деформированного состояния разнородных сварных соединений для проведения расчетного обоснования возникновения и предотвращения повреждений.

В настоящей работе предложен подход к оценке величины внутренних напряжений разнородных сварных соединений на основе оценки общего уровня напряжений в материале аустенитного сварного шва от стесненности температурной деформации с момента сварки в процессе охлаждения до заданной температуры. Данный подход представляется отражающим физическую картину в процессе проведения сварки с момента застывания жидкого металла и охлаждения, позволяющим прийти к пониманию физического явления образования «холодных трещин». Явление образования «холодных трещин» при проведении сварки хромомолибденовых сталей по аустенитному варианту отмечается многими авторами. Это подтверждает правильность подхода к оценке внутренних напряжений в разнородных сварных соединениях. Они в первом приближении могут быть определены по формуле:

$$\sigma^t = \left| \sum_{i=1}^n (\alpha_i^c \cdot E_i^c - \alpha_i^o \cdot E_i^o) \right|,$$

где n – число интервалов разбиения; t – расчетная температура, температура до которой производится охлаждение сварного соединения после сварки, °C; α_i^c, α_i^o – коэффициенты температурного линейного расширения металла шва и основного металла для i -го температурного интервала; E_i^c, E_i^o – модули продольной упругости металла сварного шва и основного материала для i -го температурного интервала.

Результаты оценки величины внутренних напряжений в разнородных сварных соединениях с различным материальным исполнением сварного шва показаны на рисунке 6.

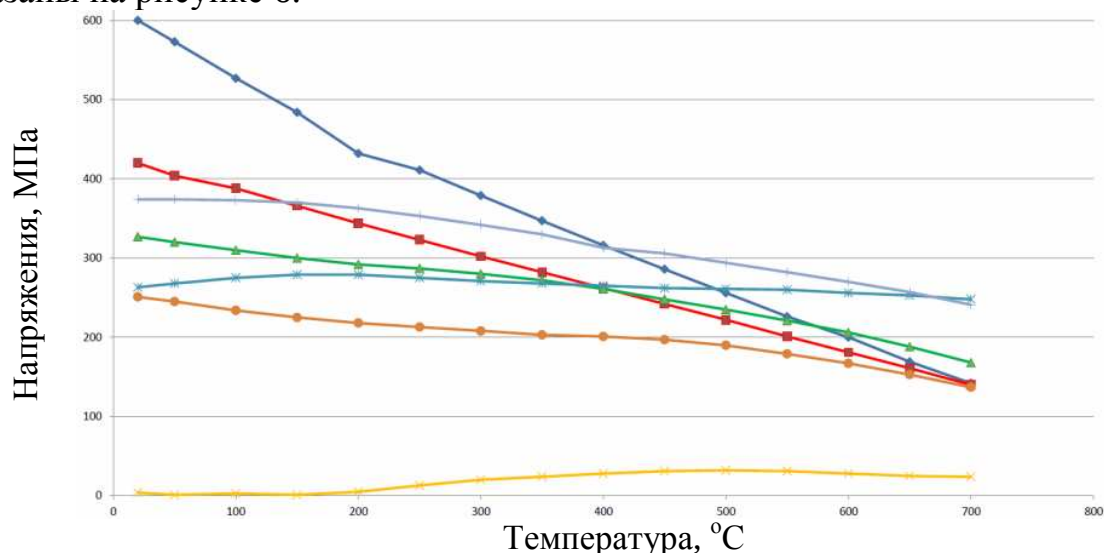


Рис. 6. Результаты расчета внутренних напряжений в разнородных сварных соединениях для стали 12ХМ с различным материальным исполнением металла шва в зависимости от температуры; 1 – 12Х18Н10Т (аналог ОЗЛ-6); 2 – 800Н (аналог АНЖР-2); 3 – ХН60Ю (аналог АНЖР-1); 4 – ХН70ВМТЮ; 5 – ХН75МБТЮ; 6, 7 – ХН78Т (физико-механические свойства согласно различным источникам)

Таким образом, установлено, что материальное исполнение сварного шва оказывает значительное влияние на НДС сварного соединения. Это связано с увеличением содержания никеля в металле сварного шва. Сплавы на никелевой основе по величине коэффициентов линейного расширения занимают промежуточное положение между аустенитными и перлитными сталями, причем ближе к последним [3]. Это обуславливает отсутствие значительных температурных деформаций и внутренних напряжений в сварном соединении и меньшую повреждаемость. Точный расчет внутренних напряжений проводится в программном комплексе конечно-элементного анализа «ANSYS Workbench 19.3».

В работе решены задачи о НДС разнородных сварных соединений при возникновении дополнительных изгибающих нагрузок, возникающих для корпусов реакторов УЗК в ходе проведения стадии охлаждения водой. Методика определения таких нагрузок изложена в [1].

В силу значительной затрудненности аналитического решения для решения задачи используется численный метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе конечно-элементного анализа «ANSYS Workbench 19.3». Расчетная модель показана на рисунке 7 с наличием кольцевого сварного соединения и соответствует 2 основным случаям.

1) Восстановительный ремонт по аустенитному варианту сварки сквозного растрескивания с односторонним доступом к зоне повреждения с наружной стороны сосуда (поперечное сечение разнородного сварного соединения показано на рисунке 8).

2) Основной вариант сварки и восстановительный ремонт по аустенитному варианту сварки растрескивания разнородного сварного соединения плакирующего слоя с внутренней стороны сосуда (поперечное сечение разнородного сварного соединения показано на рисунках 9, а и 9, б соответственно).

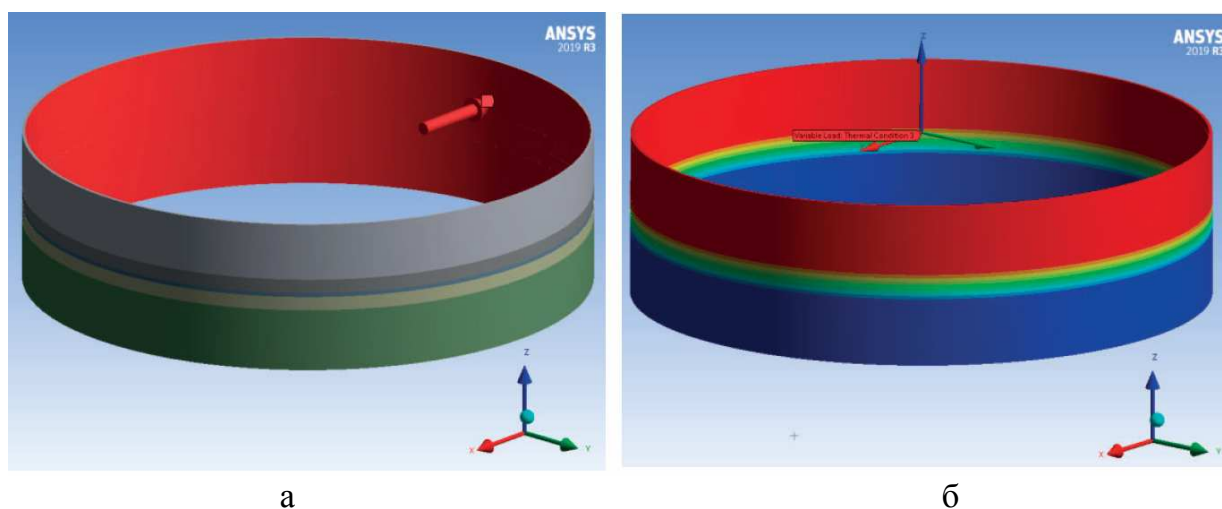


Рис. 7. Расчетная модель задачи (а) и распределение температур для задачи (б); задается переходная зона температур от 380°C в верхней части цилиндрического корпуса до 155°C в нижней части



Рис. 8. Поперечное сечение разнородного сварного соединения кольцевого сварного соединения цилиндрического корпуса реактора для случая восстановительного ремонта по аустенитному варианту сварки сквозного растрескивания с односторонним доступом к зоне повреждения с наружной стороны; предусматривается удаление валика усиления сварного шва

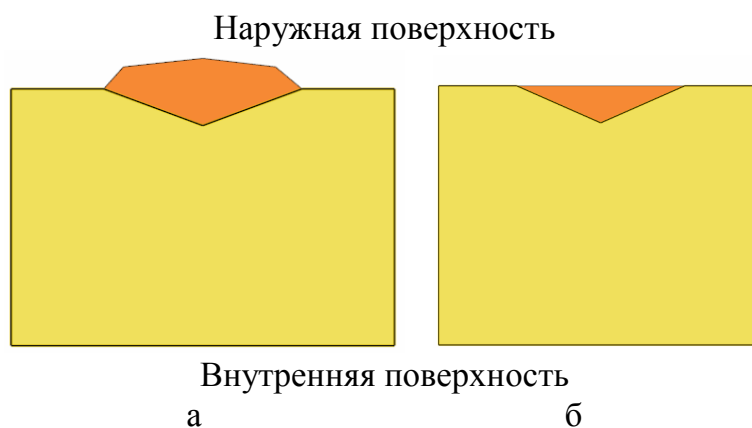


Рис. 9. а) поперечное сечение разнородного сварного соединения для случая основного варианта сварки внутреннего плакирующего слоя для фактического конструктивного исполнения с наличием валика усиления сварного шва; б) поперечное сечение разнородного сварного соединения для случая основного и восстановительного варианта сварки внутреннего плакирующего слоя; предусматривается удаление валика усиления сварного шва

Проведение расчетного исследования с использованием конечно-элементного метода позволило установить основные закономерности распределения основных компонентов напряжений и повреждений разнородных сварных соединений оборудования из теплоустойчивых сталей. По результатам расчетного исследования установлено, что значительную роль в образовании напряжений играют изгибающие нагрузки, зонами с наиболее высокими значениями напряжений являются наружная и внутренние поверхности корпуса (см. рисунок 10).

В ходе проведения стадии охлаждения с заполнением внутреннего пространства пористого коксового «пирога» водой материал разнородных сварных соединений испытывает воздействие изгибающих нагрузок, что вызывает растрескивания по линиям сплавления в зонах растяжения в окружном направлении и в поперечном в зонах сжатия.

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) используются стандартные средства программного комплекса «ANSYS».

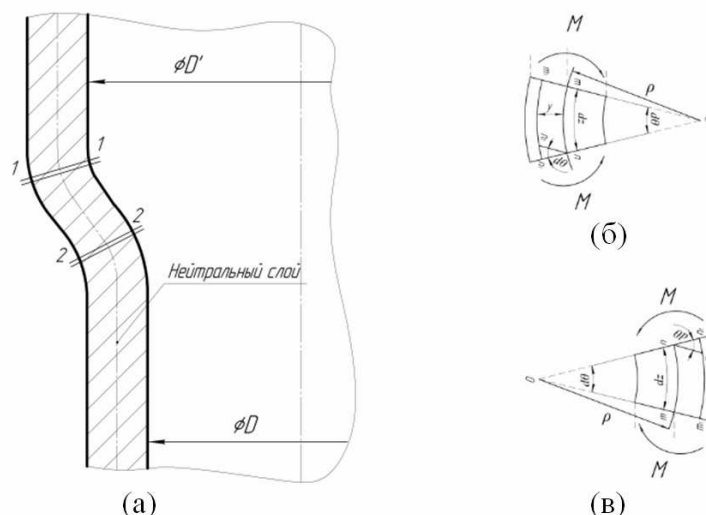


Рис. 10. Деформирование цилиндрического корпуса (продольное сечение); а – общая картина деформирования в переходной зоне температуры цилиндрического корпуса с расположением поперечных сечений корпуса; б – для верхней зоны, сечение «1-1» (зона растяжения на наружной поверхности, зона сжатия на внутренней); в – для нижней зоны, сечение «2-2» (зона растяжения на внутренней поверхности, зона сжатия на наружной)

Первым этапом расчетного исследования является исследование НДС фактического конструктивного исполнения сварного соединения с применением электродных материалов с малой степенью легирования и наличием валика усиления значительного размера, как показано на рисунке 7,а.

Проведенное расчетное исследование с использованием данных по распределению температур в цилиндрической оболочке корпуса реактора УЗК подтвердило возникновение высоких разрушающих напряжений в локальных местах сварного соединения. На рисунках 11, а и 11, б показано распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении сварного соединения по 4-й теории прочности (Мизеса) для расчетных сечений «1-1» и «2-2», зоны высоких разрушающих напряжений показаны красными контурными стрелками. Высокий уровень напряжений наблюдается по линиям сплавления разнородных сварных соединений, результаты расчетов подтверждаются данными обследования реакторов УЗК, согласно которым наблюдаются протяженные растрескивания по линиям сплавления, см. рисунок 3, а.

Также на рисунке 12 показано распределение минимальных компонентных напряжений (напряжений сжатия) в поперечном сечении «1-1»; возникновение зоны напряжений сжатия приводит к поперечному растрескиванию в вершине валика усиления сварного шва; зона показана сплошной красной стрелкой, результаты расчетов также подтверждаются данными обследования реактора УЗК, согласно которым наблюдаются поперечные растрескивания металла разнородного сварного шва, см. рисунок 3,б.

Таким образом, можно сделать вывод, что зоны концентрации напряжений совпадают с местами возникновения повреждений в виде растрескивания. Это верифицирует предложенный подход к проведению расчета напряженно-деформированного состояния разнородных сварных соединений реакторов УЗК.

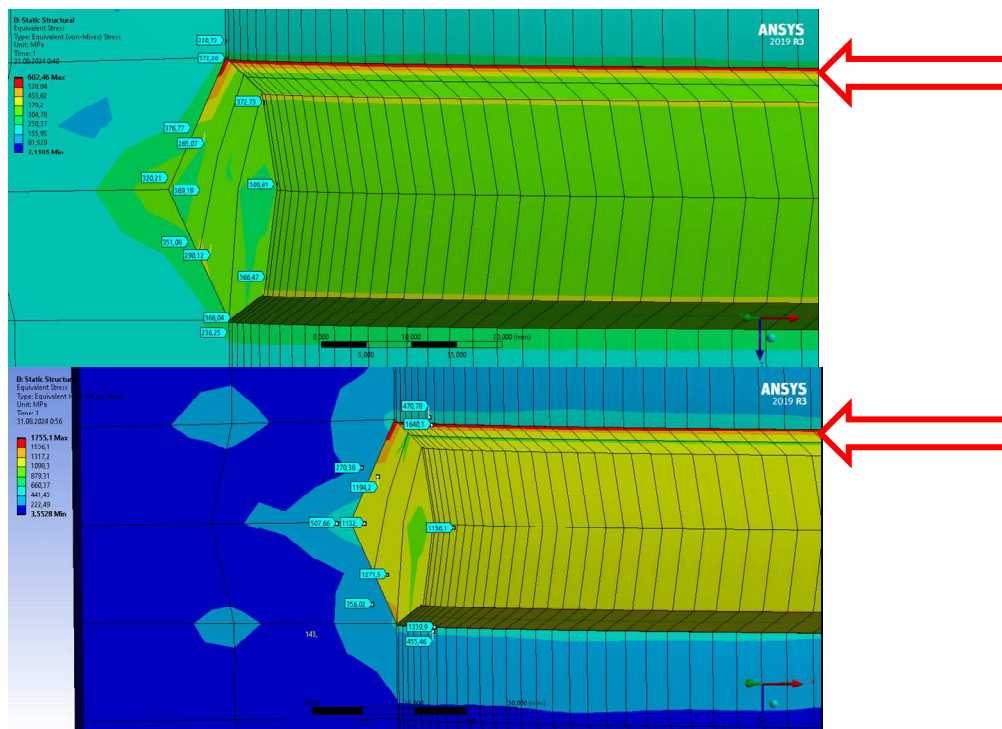


Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении сварного соединения по 4-й теории прочности для расчетных сечений «1-1», рисунок (а) и «2-2», рисунок (б); зоны высоких напряжений показаны красными контурными стрелками

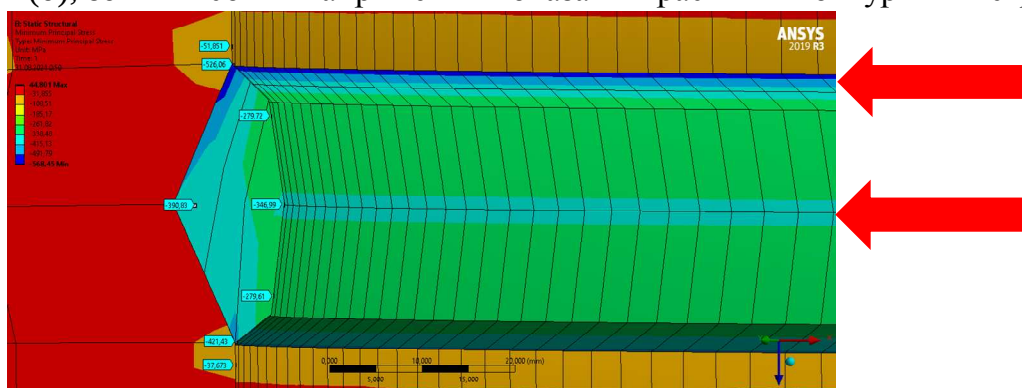


Рис. 12. Распределение минимальных компонентных напряжений (напряжений сжатия) в поперечном сечении «1-1»; зоны высоких напряжений в вершине валика усиления и по линии сплавления показаны сплошными красными стрелками

Во втором этапе исследований целью является исследование вопроса выбора электродных материалов.

Объектом исследования являются электродные материалы с малой, средней и высокой степенью легирования никелем. Для снижения внутренних напряжений в конструкции необходимо для плакирующего слоя предусматривать применение исключительно сталей типа 08X13 и ее аналогов.

Анализ результатов моделирования показывает следующее.

1) При проведении восстановительной ремонтной сварки с наружной стороны корпуса реактора необходимо использовать высоконикелевые электродные материалы с содержанием никеля более 60% масс., при этом состояние разнородного сварного соединения может быть оценено как ограниченно работоспособное, в поперечном сечении сварного соединения имеются зоны с высоким уровнем напряжения с наружной стороны корпуса;

эксплуатация возможна при условии организации периодического осмотра для выявления и устранения растрескиваний (пример расчета на рисунке 13);

2) При проведении сварки плакирующего слоя из стали 08X13, необходимо использовать высоконикелевые электродные материалы с содержанием никеля более 60% масс., таких как импортный электродный материал «ERNiCrMo-3» (содержание никеля в наплавленном металле не менее 64,8% масс. ; в этом случае обеспечивается как полностью работоспособное, для всего поперечного сечения сварного соединения напряжения в ходе эксплуатации не превышают предела текучести материалов основного металла и металла сварного шва (пример расчета на рисунке 14).

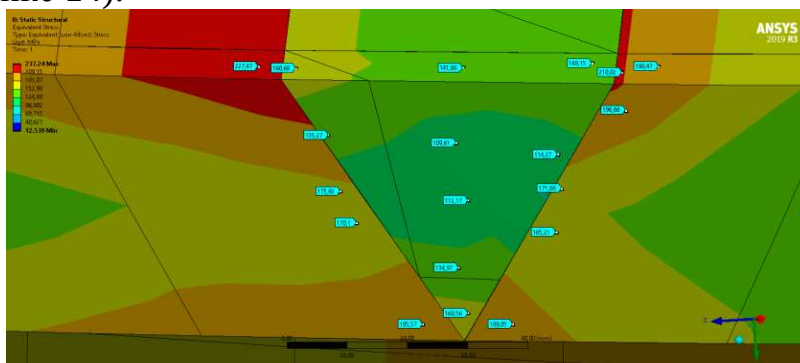


Рис. 13. Распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении «2-2» разнородного сварного соединения с высоконикелевым материальным исполнением сварного шва для восстановительной ремонтной сварки с наружной стороны корпуса реактора УЗК: для зон основного металла, примыкающих к линиям сплавления, напряжения находятся на уровне предела текучести только в верхней части сварного соединения (показана красным цветом)

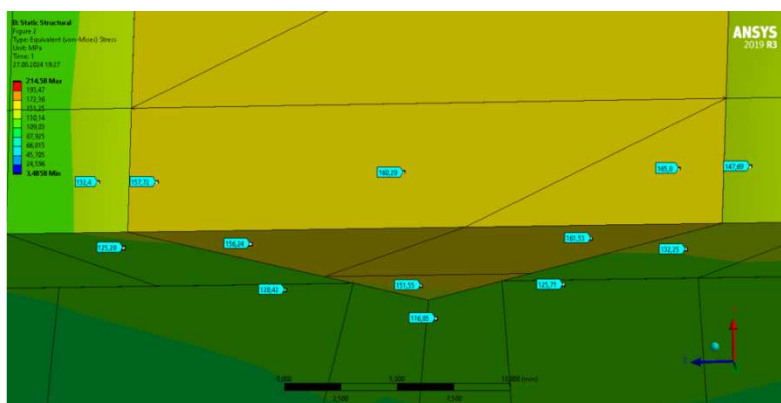


Рис. 14. Распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении «2-2» разнородного сварного соединения с высоконикелевым материальным исполнением сварного шва для сварки с внутреннего плакирующего слоя корпуса реактора УЗК; напряжения во всем сечении не превышают предела текучести материала сварного шва и основного металла

Зарубежная практика конструирования реакторов УЗК. Зарубежная практика конструирования реакторов УЗК подтверждает выводы о необходимости использования для сварки плакирующего слоя материалов с высоким содержанием никеля (более 60% масс.),

На рисунке 15 показан общий вид внутренней поверхности конической части РЗК зарубежного изготовления, наплавленный слой сварных швов

выполнен высоконикелевыми электродными материалами марки «ERNiCrMo-3» и четко выделяется по цвету относительно плакирующего слоя (материал «SA240TP410S», отечественный аналог 08X13), покрытого слоем коррозионных отложений, что говорит о более высокой коррозионной стойкости наплавки сварных швов, выполненной электродами с большим содержанием никеля.



Рис. 15. Общий вид внутренней поверхности конической части реактора УЗК зарубежного изготовления

В практику изготовления реакторов УЗК за рубежом введена операция удаления валиков усиления сварных швов [4], как показано на рисунке 16. Это уменьшает количество наплавленного металла и снижает внутренние напряжения в разнородных сварных соединениях. Аналогичные рекомендации даются при проведении ремонта плакирующего слоя с применением сварки, как показано на рисунке 17 [5].

Сравнительный анализ данных по эксплуатации отечественных и зарубежных реакторов УЗК показывает высокую устойчивость к повреждениям реакторов УЗК зарубежной поставки [6]. За 7 лет интенсивной эксплуатации для реакторов УЗК зарубежной поставки не зафиксировано повреждений в виде гофрообразования, растрескивания сварных соединений. Для аналогичных отечественных реакторов УЗК за такой же срок эксплуатации зафиксировано большое число протяженных растрескиваний сварных соединений снаружи и изнутри корпуса, имел место 1 случай аварийной остановки вследствие пропуска воды. Сравнительный анализ показывает эффективность внедренных за рубежом мероприятий.

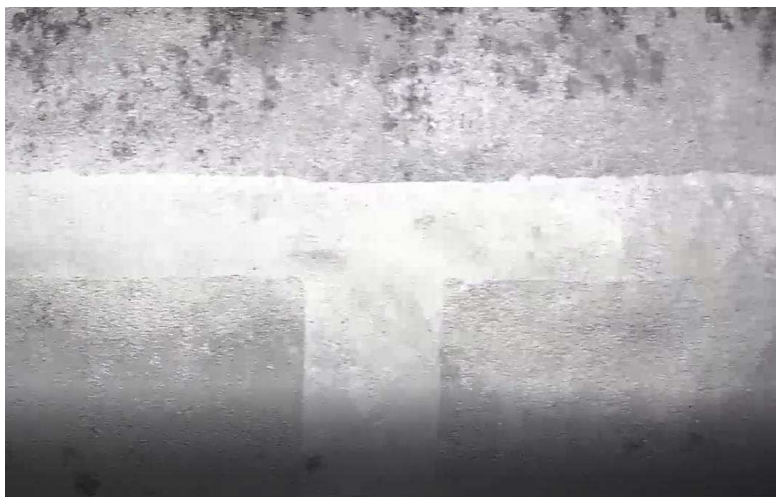


Рис. 16. Вид участка кольцевого шва с перекрестием продольного сварного шва с внутренней стороны корпуса реактора УЗК зарубежного изготовления; проведено удаление валиков усиления сварных швов

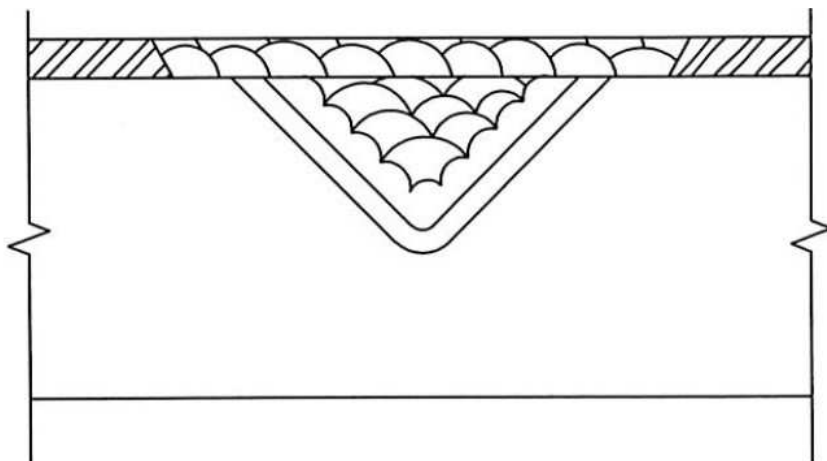


Рис. 17. Схема восстановления плакирующего слоя корпуса реактора УЗК [5]; введена технологическая операция по удалению валиков усиления сварных швов механическим способом

Мероприятия по предотвращению повреждений. Основная рекомендация состоит в расширении применения сварочных материалов с высоким содержанием никеля. Коэффициенты линейного расширения сплавов на основе никеля и теплоустойчивых сталей имеют близкие значения, это позволяет снизить внутренние напряжения в сварном соединении.

В существующих НТД по изготовлению и ремонту реакторного оборудования отсутствуют четкие указания по применению высоконикелевых электродных материалов. Например, согласно [7] для применения допускаются электродные материалы с различной степенью легирования никелем, например, ОЗЛ-6 с содержанием никеля 13% масс. Говорится, что «для сварки разнородных соединений, включающих теплоустойчивые стали и эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание, допускается применять аустенитные сварочные материалы, содержащие не менее 40 % никеля».

В научно-технической литературе фактор коррозионного растрескивания как причина повреждения РЗК не рассматривается. Поэтому в разрабатываемых технологиях сварки по аустенитному варианту обычно указывается применение материалов с малым и средним содержанием никеля. В отечественной практике

до сих пор преимущественное применение для сварки плакирующего слоя корпусов реакторов УЗК находят малоникелевые электродные материалы с содержанием никеля не более 13% масс. (например, марки ОЗЛ-6). Для обеспечения работоспособности разнородных сварных соединений необходимо четкое указание применения высоконикелевых электродных материалов. Широко используемые за рубежом нормативно-технические документы [4-5] по техническим требованиям к реакторам УЗК рекомендуют применение высоконикелевых электродных материалов при конструировании и проведении ремонта реакторов УЗК. Окончательно рекомендации могут быть сформулированы следующим образом:

Для предотвращения растрескиваний разнородных сварных соединений плакирующего слоя:

1) введение в технические требования для изготовления реакторов УЗК применения в качестве материального исполнения плакирующего слоя исключительно сталей 08Х13 и импортных аналогов; применение для сварки плакирующего слоя исключительно использование высоконикелевых электродных материалов с содержанием никеля в наплавленном металле не менее 60% масс., что обеспечивает выполнение условий прочности;

2) введение в технологию сварки операции механического удаления валиков сварных швов.

Совершенствование восстановительной ремонтной сварки:

1) при проведении восстановительной ремонтной сварки по аустенитному варианту для устранения растрескиваний сварных соединений и основного металла с наружной стороны корпуса реакторов УЗК рекомендуется использование высоконикелевых электродных материалов с содержанием никеля в наплавленном металле не менее 60% масс., что обеспечивает выполнение условий прочности, при этом необходима организация периодического осмотра в ходе эксплуатации зоны ремонта с целью выявления и устранения растрескиваний;

2) при проведении восстановительной ремонтной сварки по аустенитному варианту для устранения растрескиваний сварных соединений плакирующего слоя реакторов УЗК рекомендуется использование высоконикелевых электродных материалов с содержанием никеля в наплавленном металле не менее 60% масс., что обеспечивает выполнение условий прочности;

3) введение в технологию сварки операции механического удаления валиков сварных швов.

Опыт применения разработанных рекомендаций

В разработанной инструкции АО «ВНИКТИнефтехимоборудование» по проведению восстановительного ремонта реакторов УЗК отражены изменения в технологии сварки теплоустойчивых сталей по аустенитному варианту. Для предотвращения растрескиваний указывается применение исключительно высоконикелевых электродных материалов с содержанием никеля не менее 60% масс. Желательно применение электродных материалов с большей степенью легирования никелем, на уровне 70% масс.

Практика показала возможность обеспечения высокой работоспособности РЗК в условиях интенсивного растрескивания сварных соединений. Применение описанной технологии ремонта позволило исключить образование «холодных трещин» при проведении ремонтной сварки РЗК в условиях низких зимних температур. С 2020 г. проходит успешная эксплуатация реакторов УЗК на одном из нефтеперерабатывающих предприятий, число рабочих циклов каждого из 4-х реакторов превысило 400. Выявляемые растрескивания сварных соединений подвергаются ремонту по аустенитному варианту [8].

Это показывает возможность применения аустенитного варианта сварки для оборудования из сталей, склонных к подкалке, эксплуатируемого в условиях высокотемпературного циклического нагружения.

Выводы

1) Сформулирован механизм повреждения в виде растрескивания и решена задача о НДС разнородных сварных соединений от действия изгибающих нагрузок из-за образования перепада температур в элементах конструкции в ходе эксплуатации и наличия внутренних напряжений, образующихся при проведении сварки.

2) Установлены закономерности распределения основных компонентов напряжений и повреждений разнородных сварных соединений реакторов УЗК, которые вызваны действием изгибающих нагрузок с возникновением зон высоких напряжений.

3) Зоны концентрации напряжений совпадают с местами возникновения повреждений в виде растрескивания, что верифицирует предложенный подход к проведению расчета напряженно-деформированного состояния разнородных сварных соединений реакторов УЗК.

4) На основании результатов исследований разработаны рекомендации по совершенствованию технологии сварки по аустенитному варианту реакторов УЗК из хромомолибденовых сталей с целью предотвращения повреждений разнородных сварных соединений.

5) Имеющийся опыт эксплуатации и данные научно-технической литературы в области эксплуатации реакторов УЗК подтверждают целесообразность разработанных рекомендаций.

Список литературы

1. Бадьин Ю.А., Бударегин М.В., Киселев А.Н., Пузанов А.И. Причины повреждений корпусов реакторов замедленного коксования и меры по их предотвращению // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 6. – С. 173-186. – DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-173-186.
2. Бадьин Ю.А., Бударегин М.В., Киселев А.Н., Пузанов А.И. Исследование влияния температурных полей корпусов реакторов замедленного коксования на напряженно-деформированное состояние // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 191-203. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-1-191-203.
3. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей. – М.: Машиностроение, 1966. – 290 с.
4. API TR 934-G-2016. Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units. – Washington: American Petroleum Institute, 2016. – 57 p.

5. API TR 934-J-2024. Inspection, Assessment, Effects of Operating Practices, Monitoring, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units. – Washington: American Petroleum Institute, 2024. – 124 p.
6. Бадьин Ю.А. Влияние материального исполнения реакторов замедленного коксования на повреждаемость в ходе эксплуатации // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, №2. – С. 183-196. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-2-183-196.
7. Стандарт организации. Сварка разнородных соединений сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах. СТО 00220368-011-2007. ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры». Волгоград.
8. Бадьин Ю.А. Технология оперативного ремонта реакторов замедленного коксования // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: материалы I международной научно-технической конференции, Могилев, 24-25 ноября 2022 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2022. – С. 19-24.

Сведения об авторах:

Бадьин Юрий Аркадьевич – аспирант;

Кузеев Искандер Рустемович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование».

УСТАНОВКА МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПУШИВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Чащилов Д.В.¹, Манухина К.С.², Назмутдинов Р.А.^{1,2}, Кораблин А.А.^{1,2},
Злочевский Л.А.^{1,2}, Павлов И.Н.²*

¹*Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения
Российской академии наук, Бийск;*

²*Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск*

Ключевые слова: целлюлозные волокна, сырье в плотной форме, молотковая мельница, пневмотранспорт, армирующий наполнитель, полимерные композиционные материалы.

Аннотация. Установка состоит молотковой мельницы, валкового питателя и пневмотранспорта. Листовое сырье в плотной форме подается питателем в мельницу, дезагрегируется, распушенные волокна вентилятором пневмотранспорта засасываются в сборник-отделитель. Оработанный воздух частично возвращается под решетную деку мельницы, частично выбрасывается в атмосферу. Целлюлозные волокна, в распушенном состоянии, могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя для полимерных композиционных материалов.

INSTALLATION OF MECHANICAL FLUFFING OF SHEET CELLULOSE MATERIALS IN THE PRODUCTION OF REINFORCING FILLER FOR POLYMER COMPOSITE MATERIALS

*Chashchilov D.V.¹, Manukhina K.S.², Nazmutdinov R.A.^{1,2}, Korablin A.A.^{1,2},
Zlochevsky L.A.^{1,2}, Pavlov I.N.²*

¹*Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Biysk;*

²*Biysk Institute of Technology (branch) Polzunov Altai State Technical University,
Biysk*

Keywords: cellulose fibers, raw materials in a dense form, hammer mill, pneumatic transport, reinforcing filler, polymer composite.

Abstract. The installation consists of a hammer mill, a roller feeder and a pneumatic transport. The sheet raw materials in a dense form are fed into the mill by a feeder, disaggregated, the fluffed fibers are sucked into the filter separator by a pneumatic transport fan. The exhaust air is partially returned under the grate deck of the mill, partially released into the atmosphere. Cellulose fibers, in the fluffed state, can be used as a reinforcing filler for polymer composites.

Целлюлоза является одним из наиболее распространенных биополимеров. Физической формой целлюлозы являются волокна. В зависимости от источника происхождения целлюлозы, их длина может составлять до нескольких десятков миллиметров, толщина от 4 нм до нескольких сотен микрометров. Целлюлозные волокна имеют, преимущественно, природное происхождение – они выделяются из клеточной стенки растений [1].

Одной из распространенных физических товарных форм промышленного полуфабриката является листовая целлюлоза или целлюлоза в плотной форме [2]. В этом виде могут быть выработана как древесная целлюлоза, так и целлюлоза из однолетних растений – из соломы, плодовых оболочек злаков и т.п. Целлюлозное сырье может быть применимо для приготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ). Наиболее эффективно использование волокон для армирования ПКМ. При этом, такой наполнитель, в общем случае, будет неупорядоченным. Для получения наполнителя применяют разволокнение или распушивание целлюлозы [3].

Цель данной работы – разработка установки для механического распушивания листовой формы целлюлозных материалов, для получения армирующего наполнителя ПКМ.

Вновь предложенная установка представляет собой комплекс, состоящий из валкового питателя для подачи сырья, молотковой мельницы для механического распушивания, и пневмотранспорта для выгрузки распушенного материала [4]. Молотковая мельница имеет подроторную решетную деку. Также в состав пневмотранспорта входят центробежный пылевой вентилятор, фильтрующая или осадительная камера со сборником материала, фильтр, клапаны, воздухопроводы и материалопроводы.

При работе установки целлюлозное сырье питателем подается в рабочую камеру мельницы. Посредством удара и истирания происходит разрушение листов, их дезагрегация, разволокнение и последующее распушивание. Степень обработки при этом может быть различной, в зависимости от структуры исходного сырья и режима работы мельницы.

Распушенный целлюлозный материал проходит через деку мельницы и попадает во всасывающий пневмотранспорт. Также частично происходит подсос воздуха через мельницу, что препятствует выбросу пыли. Далее аэровзвесь поступает в осадительную камеру со сборником. Твердая фаза собирается в сборник, а отработанный воздух далее проходит через пылевой вентилятор. Затем поток воздуха разделяется. Часть отработанного воздуха через регулирующий клапан и фильтр выбрасывается в атмосферу. Другая часть, до 90% от общего расхода, через другой клапан, направляется на рециркуляцию. При этом рециркулирующий отработанный воздух подается под решетное пространство мельницы, где вновь используется для создания аэровзвеси с распушенным материалом. Удельная производительность установки $2,5 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{м}^3$.

По сравнению с ранее известными установками для разволокнения или распушивания целлюлозы [2, 3], новая установка имеет ряд преимуществ. Сокращается объем выбрасываемого в атмосферу отработанного воздуха, за счет использования рециркуляции, что сокращает потери энергии на преодоление гидравлического сопротивления фильтра. Также уменьшаются потери распушенного материала, вместе с выбрасываемым отработанным воздухом.

Представленная установка механического распушивания может быть использована для листовых целлюлозных материалов. Например, возможно обрабатывать такие материалы, как целлюлозную папку, целлюлозный картон, картон, гофрокартон, хром-эрзац, прессшпан, макулатуру, рулонную бумагу,

отдельные листы или стопки бумаги и т.п. Распушенное таким образом сырьё, может быть применено для получения ПКМ, в роли неориентированного армирующего наполнителя.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ для ИПХЭТ СО РАН, № государственной регистрации 124021200031-4, при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Список литературы

1. Keijsers E.R.P., Yilmaz G., Van Dam J.E.G. The cellulose resource matrix // Carbohydrate Polymers. 2013, vol. 93(1), pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
2. Борбузанов В.Г., Матухин Е.Л., Юсупов Ф.Т., Валишина З.Т., Косточко А.В. Автоматизированный комплекс подготовки целлюлозного сырья новой физической формы ** Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, №1. – С. 297-299.
3. Чащилов Д.В. Опыт исследования процесса разволокнения целлюлозных материалов и анализ работы оборудования: от лабораторного стенда – к промышленной установке // От химии к технологии шаг за шагом. – 2021. – Т. 2, №1. – С. 29-39. – DOI: 10.52957/27821900_2021_01_29.
4. Патент №2814436 РФ. Устройство для распушивания целлюлозы и материалов на основе целлюлозы / Д.В. Чащилов. – Заявка №2022133392 от 16.12.2022; опубл. 28.02.2024.

Сведения об авторах:

Чащилов Дмитрий Викторович – к.т.н., ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья;

Манухина Ксения Сергеевна – студентка;

Назмутдинов Руслан Анварович – лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья, студент;

Кораблин Арсений Александрович – лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья, студент;

Злочевский Леонид Анатольевич – лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья, студент;

Павлов Игорь Николаевич – к.т.н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств.

УСТАНОВКА С КАЧАЮЩИМСЯ АВТОКЛАВОМ ДЛЯ ГИДРОТРОПНОЙ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВОЛОКОН И ЛИГНИНА ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

*Чащиллов Д.В.¹, Савин Д.А.¹, Манухина К.С.², Назмутдинов Р.А.^{1,2},
Кораблин А.А.^{1,2}, Злочевский Л.А.^{1,2}, Павлов И.Н.²*

¹*Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения
Российской академии наук, Бийск;*

²*Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск*

Ключевые слова: гидротропная делигнификация, лигнин, растительные волокна, армирующий наполнитель, функциональный наполнитель, полимерные композиты.

Аннотация. Установка состоит из автоклава, привода и рамы. Автоклав может совершать возвратно-поступательные колебания вокруг своего центра тяжести. При этом происходит гидротропная делигнификация навески растительного сырья. От отработанного раствора отделяются растительные волокна, при регенерации этого раствора выделяется лигнин. Растительные волокна и лигнин могут быть использованы в качестве армирующего и функционального наполнителей, соответственно, для полимерных композитов.

INSTALLATION WITH ROCKING AUTOCLAVE FOR HYDROTROPIC DELIGNIFICATION OF PLANT RAW MATERIALS IN THE SEPARATION OF FIBERS AND LIGNIN FOR POLYMER COMPOSITES

*Chashchilov D.V.¹, Savin D.A.¹, Manukhina K.S.², Nazmutdinov R.A.^{1,2},
Korablin A.A.^{1,2}, Zlochevsky L.A.^{1,2}, Pavlov I.N.²*

¹*Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies" of the Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Biysk;*

²*Biysk Institute of Technology (branch) Polzunov Altai State Technical University,
Biysk*

Keywords: hydrotropic delignification, lignin, plant fibers, reinforcing filler, functional filler, polymer composites.

Abstract. The installation consists of an autoclave, a drive and a frame. The autoclave can oscillate back and forth around its center of gravity. At the same time, hydrotropic delignification of the suspension of vegetable raw materials occurs. Plant fibers are separated from the waste solution, and lignin is released during the regeneration of this solution. Plant fibers and lignin can be used as reinforcing and functional fillers, respectively, for polymer composites.

Растительные волокна могут быть получены путем делигнификации биомассы однолетних растений. Основа этих волокон – микрофибриллы целлюлозы [1]. Одним из перспективных направлений использования растительных волокон является армирование полимерных композиционных материалов (ПКМ) [2].

При традиционных способах делигнификации растительного сырья лигнин попадает в отходы. Одним из щадящих вариантов обработки является гидротропная варка [3]. В ее основе лежит использование растворов гидротропов,

повышающих растворяющую способность воды. Для делигнификации применяют, например, бензоат натрия или ксилосульфат натрия и т.п. Гидротропная обработка позволяет выделить лигнин, практически, в неизменном виде. Лигнин является термостойким материалом. Поэтому он может быть использован в ПКМ в качестве функционального наполнителя, например, для повышения огнестойкости.

Цель данной работы – разработка автоклавной установки, с перемешиванием, для гидротропной обработки растительного сырья.

В основе новой установки используется качающийся автоклав. Конструктивно установка включает в себя непосредственно автоклав и привод. Также в состав установки входят стойка с контрольно-измерительными приборами и баллон со сжатым азотом для обеспечения азотного дыхания.

Автоклав представляет собой удлиненный трубчатый цилиндрический корпус с плоскими фланцами, закрытый с торцов отъемными фланцевыми крышками. Крышки имеют полуэллиптические донья. Также в крышках установлено несколько бобышек – для манометра, датчика температуры, воздушника, подачи азотного дыхания, теплообменника, предохранительного клапана. Корпус имеет электрический обогрев и снабжен теплоизоляцией.

Номинальный объем автоклава составляет от 2 до 5 дм³, рабочее давление составляет от 1,0 до 2,5 МПа, в зависимости от конфигурации. Рабочая температура, соответственно, от 180⁰С до 224⁰С. Коэффициент заполнения сосуда составляет 0,6.

Сосуд закреплен на подрамнике, последний шарнирно установлен на раме, ось качаний проходит через центр тяжести автоклава. Также на раме установлен электромеханический привод, состоящий из электродвигателя, муфты и червячного редуктора. Для преобразования вращательного движения ведомого вала редуктора в возвратно-поступательные движения сосуда применен рычажный четырехшарнирный механизм. Последний состоит из трех звеньев – кривошипа и тяги, нижняя головка которой установлена на шейке кривошипа. Третьим звеном является подрамник сосуда, с которым через серьгу соединена верхняя головка тяги. Рычажный механизм имеет форму параллелограмма.

При работе установки привод позволяет подрамнику с сосудом совершать качательные колебания. Находящаяся внутри сосуда рабочая среда, при наклоне сосуда, попеременно перетекает из одной части сосуда в другую и обратно. При этом, происходит эффективное перемешивание, для выравнивания полей температур и концентраций рабочей среды. В автоклав помещается навеска обрабатываемого растительного сырья и свежий варочный раствор. При работе установки происходит делигнификация сырья, лигнин частично переходит в раствор. Также происходит частичный гидролиз термолабильных компонентов растительного сырья. Далее рабочая среда выгружается из автоклава. От отработанного раствора отделяются растительные волокна, которые дополнительно промываются. Из раствора выделяется лигнин, который также многократно промывается. Отработанный раствор может быть регенерирован упариванием.

Растительные волокна могут быть использованы для ПКМ, в качестве армирующего наполнителя. Лигнин также может быть использован в ПКМ, в качестве функционального наполнителя, например, для повышения термостойкости и огнестойкости. Так, для лигнина, при температуре 400⁰С, остаток составляет более 65%, то есть порядка двух третей.

Представленная установка с качающимся автоклавом может быть использована для гидротропной делигнификации растительного сырья, с выделением практически нативного лигнина. Степень делигнификации сырья, на примере шелухи овса, может достигать 0,8. Обработанное таким образом сырьё, а также выделенный лигнин, могут быть использованы для получения ПКМ, соответственно, как армирующий и функциональный наполнитель.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ для ИПХЭТ СО РАН, № государственной регистрации 124021200031-4, при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Список литературы

1. Keijsers E.R.P., Yilmaz G., Van Dam J.E.G. The cellulose resource matrix // Carbohydrate Polymers. 2013, vol. 93(1), pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
2. Bourmaud A., Shah D.U., Beaugrand J., Dhakal H.N. Property changes in plant fibres during the processing of bio-based composites // Industrial Crops and Products. 2020, vol. 154, p. 112705. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112705.
3. Денисова М.Н., Кухленко А.А., Павлов И.Н. Исследование влияния параметров гидротропной делигнификации на физико-химические характеристики целлюлозы из шелухи овса // Ползуновский вестник. – 2017. – № 2. – С. 95-98.

Сведения об авторах:

Чащилов Дмитрий Викторович – к.т.н., ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья;

Савин Дмитрий Алексеевич – м.н.с. лаборатории материаловедения минерального сырья, аспирант;

Манухина Ксения Сергеевна – студентка;

Назмутдинов Руслан Анварович – лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья; студент;

Кораблин Арсений Александрович – лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья; студент;

Злочевский Леонид Анатольевич – лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья; студент;

Павлов Игорь Николаевич – к.т.н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств.

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КОРРОЗИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ

*Щегольков Н.И., Комарова Л.Ю., Кондратов А.П.
Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: стальная поверхность, очистка, полимерный слой, коррозия, шероховатость, способ модификации.

Аннотация. В работе изучалось влияние шероховатости очищенной стальной поверхности на коррозионную устойчивость полимерного слоя. В исследовании применялись две технологии предварительной подготовки поверхности: лазерная и струйно-абразивная очистка. Продемонстрирована корреляция между шероховатостью поверхности и коррозионной устойчивостью полимерного слоя при испытании на декомпрессию в углеводородной среде. По результатам исследования авторы приходят к выводу, что струйно-абразивная очистка обеспечивает развитый микрорельеф поверхности, и как следствие, высокую коррозионную устойчивость лакокрасочного покрытия. Несмотря на меньшую устойчивость полимерного слоя при предварительной лазерной очистке, эта технология заслуживает дальнейшего изучения.

THE INFLUENCE OF STEEL SURFACE ROUGHNESS ON THE CORROSION OF PIPES WITH POLYMER COATING

*Shchegolkov N.I., Komarova L.Y., Kondratov A.P.
Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: steel surface, cleaning, polymer layer, corrosion, roughness, modification method.

Abstract. The study examined the effect of roughness of a cleaned steel surface on the corrosion resistance of a polymer layer. Two technologies for preliminary surface preparation were used in the research: laser and jet abrasive cleaning. A correlation was demonstrated between surface roughness and the corrosion resistance of the polymer layer during decompression testing in a hydrocarbon environment. Based on the results of the study, the authors conclude that jet abrasive cleaning provides a developed microrelief of the surface, and as a result, high corrosion resistance of the paint coating. Despite the lower stability of the polymer layer with preliminary laser cleaning, this technology deserves further study.

К основным задачам, при обеспечении коррозионной стойкости стальных изделий в нефтегазовой отрасли, относится подготовка их внешней и внутренней поверхностей для создания надежной адгезионной связи с защитным полимерным покрытием, что достигается требуемой степенью очистки от различных загрязняющих соединений и формированием оптимальной морфологии с увеличенной площадью поверхности, оцениваемой шероховатостью [1].

Сформировать оптимальную морфологии с увеличенной площадью поверхности стали можно различными известными способами ее очистки, в частности, струйно-абразивной и лазерной обработкой.

Струйно-абразивная очистка основана на удалении загрязнений путем воздействия на обрабатываемую поверхность твердыми частицами абразивного материала с высокой кинетической энергией [2].

Лазерная очистка является современным и развивающимся способом модификации стальной поверхности, основанным на принципе фотоабляции, когда частицы загрязняющих соединений поглощают энергию лазерного излучения и, как следствие, происходит их отделение от поверхности [3].

В нефтегазовой отрасли, для оценки коррозионной устойчивости полимерного покрытия в лабораторных условиях, проводят автоклавное испытание. Благодаря соответствующему оборудованию обеспечивается возможность для выдержки исследуемого образца полимерного покрытия в жидкости под давлением и высокой температуре. Таким образом моделируют условия эксплуатации скважинного оборудования [4].

Все стандарты по устойчивости полимерного покрытия к автоклавному испытанию основаны на технологии струйно-абразивной очистки, как традиционном способе модификации поверхности в нефтегазовой отрасли.

В силу новизны технологии лазерной очистки, в ходе анализа научной литературы не удалось найти данных об устойчивости полимерного слоя, нанесенного на поверхность после такой модификации, к воздействию коррозионно-агрессивных сред.

Для проведения исследования использовались пластины из стали марки Ст20. Размер пластин: 100x50x3,9 мм.

Для реализации процесса лазерной очистки использовался импульсный волоконный лазер с частотой излучения 100 кГц.

Для очистки поверхности пластин струйно-абразивным методом применяли стальную литую (колотую) дробь, улучшенную по ГОСТ 11964. Давление подачи абразивного материала из сопла установки составляет 0,4 МПа.

Среднее время процесса модификации поверхности одной пластины для каждой технологии составляло 16 секунд.

В качестве основы лакокрасочного материала использовались эпоксидно-фенольные смолы с отвердителем аминного типа.

На образцах после лазерной модификации наблюдается удаление следов ржавчины, но остаются участки, покрытые заводской окалиной.

На образцах после струйной абразивной модификации колотой дробью фиксируется глубокая степень очистки Sa3.

Шероховатость поверхности стальных пластин после процедуры очистки представлена в таблице 1

Табл. 1. Шероховатость поверхности стальных пластин после процедуры очистки

Способ очистки	Режим обработки	Шероховатость R_z , мкм
Контрольный образец	отсутствует	3,1
Лазерный	100 кГц	7,8
Струйно-абразивный, колотая дробь	0,4 МПа	32,1

После лазерной очистки шероховатость поверхности увеличивается от 3,1 до 7,8 мкм.

При подготовке поверхности абразивными материалами шероховатость увеличивается от 3,1 до 32,1 мкм.

Нанесение лакокрасочного покрытия производилось на лабораторной установке по принципу воздушного распыления.

Средняя толщина лакокрасочного покрытия после полимеризации составляет 170 мкм.

Определение коррозионной устойчивости покрытия проводилось согласно ГОСТ 58346-2019. Критерием устойчивости образца является отсутствие внешних дефектов в виде вздутий и/или отслоений лакокрасочного покрытия после проведения испытания.

Эпоксидно-фенольная основа лакокрасочного материала, используемая в исследовании для формирования лакокрасочного покрытия, рассчитана выдерживать воздействие коррозионно-агрессивных сред под давлением при повышенной температуре при целевом режиме проведения испытания: температура жидкой и газовой сред – $80 \pm 1^\circ\text{C}$; газовая среда – CO_2 ; давление газовой среды – 5 МПа; жидкая среда – 5%-ый водный раствор NaCl; время испытания – 24 часа.

В ходе определения нижней температурной границы коррозионной устойчивости шести образцов полимерного покрытия с предварительной лазерной модификацией поверхности три образца продемонстрировали положительные результаты, что свидетельствует о нестабильной устойчивости покрытия. Испытание проходило в следующих условиях: температура жидкой и газовой сред – $60 \pm 1^\circ\text{C}$; газовая среда – CO_2 ; давление газовой среды – 5 МПа; жидкая среда – 5%-ый водный раствор NaCl; время испытания – 24 часа.

Следующая партия образцов лакокрасочного покрытия с предварительной лазерной модификацией поверхности не выдержало целевой режим автоклавного испытания.

Стальные пластины с полимерным слоем, подготовленные струйно-абразивным методом модификации поверхности, выдержали целевой режим автоклавного испытания, что подтверждает надежность и эффективность технологии. На образцах не наблюдается вздутия покрытия.

Таким образом, подтверждена взаимосвязь между шероховатостью стальной поверхности и устойчивостью защитного полимерного слоя к воздействию коррозионно-агрессивной среды.

Традиционная технология струйно-абразивной очистки обеспечивает долговечность и надежность полимерного покрытия в условиях воздействия агрессивных сред. Лазерная очистка требует дальнейшего изучения и оптимизации для достижения сопоставимых результатов.

Список литературы

1. Sharun V., Rajasekaran M, Suresh Kumar S., Vikas Tripathi, Rajneesh Sharma, Puthilibai G., Sudhakar M., Kassu Negash. Study on Developments in Protection Coating Techniques for Steel // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022, article ID 2843043, 10 p.
2. Wu S., Jia X., Xiong S., Li F., Ma M., Wang X., Li C. Process Parameters Optimization of Wet Shot Peening for Paint // *Sustainability*. 2021, vol. 13(22), p. 12915.
3. Shusen Zhuang, Shigenobu Kainuma, Muye Yang, Manabu Haraguchi, Takahiro Asano. Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning // *Construction and Building Materials*. 2021, vol. 274(2), p. 122085.

4. Kovalev M., Alekseeva E., Shaposhnikov N., Lyashenko D., Tokarev V. Investigation of Factors Influencing the Autoclave Tests Results of Internal Anticorrosive Polymer Coatings // Metals. 2021, vol. 11(11), p. 1713.

Сведения об авторах:

Щегольков Никита Игоревич – аспирант, инженер-исследователь;

Комарова Людмила Юрьевна – к.т.н. доцент;

Кондратов Александр Петрович – д.т.н., профессор.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТНЫХ (НОРМАТИВНЫХ) ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НА УЧАСТКАХ ТЕПЛОСЕТИ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА КАЗАНИ

Хазиев Р.М.¹, Ахметова И.Г.², Лапин К.В.¹

¹АО «Татэнерго», Казань;

²Казанский государственный энергетический университет, Казань

Ключевые слова: тепловые потери, схема теплоснабжения, теплосеть, модель, температура, потери.

Аннотация. В данной статье представлены особенности моделирования расчетных тепловых потерь на участках теплосети в системе теплоснабжения города Казани. Рассматриваются модели расчета тепловых потерь на примере двухтрубной системы тепловых сетей участков теплосети. Данные модели позволяют сформировать исчерпывающую расчетную (нормативную) базу параметров теплоносителя по участкам трубопроводов.

BUILDING A MODEL OF CALCULATED (NORMATIVE) HEAT LOSSES IN SECTIONS OF THE HEATING NETWORK IN THE HEAT SUPPLY SYSTEM OF THE CITY OF KAZAN

Khaziev R.M.¹, Akhmetova I.G.², Lapin K.V.¹

¹JSC Tatenergo, Kazan;

²Kazan State Power Engineering University, Kazan

Keywords: heat losses, heat supply scheme, heating network, model, temperature, losses.

Abstract. This article presents the features of modeling calculated heat losses in sections of the heating network in the heat supply system of the city of Kazan. Two models for calculating heat losses are considered using the example of a two-pipe system of heating networks in heating network sections. These models make it possible to obtain and form an exhaustive computational (normative) base of coolant parameters for pipeline sections.

Теплоснабжение является ключевой отраслью промышленности, обеспечивающей неуклонный рост национальной экономики [1]. В условиях рыночной экономики немаловажное значение имеют тепловые потери, возникающие из-за дефектов изоляции и характеризуют непроизводительные затраты теплоснабжающей организации при эксплуатации тепловых сетей.

В связи с использованием в г. Казани двухтрубной системы тепловых сетей (по системам АО «Татэнерго») для исследования необходимо построение 2-х моделей расчетных тепловых потерь на участках теплосети: модель тепловых потерь на подающих участках, где поток теплоносителя направлен от источника теплоты к потребителям; модель тепловых потерь на обратных участках, где поток теплоносителя возвращается от потребителей к источнику теплоты. Согласно [1] в г. Казани имеются 194 системы централизованного теплоснабжения, из которых 7 – крупные системы с разветвленной теплосетью.

Состав модели расчетных тепловых потерь по участкам подающих трубопроводов состоит из расчетных схем участков тепловой сети; характеристики протяженности участков тепловой сети; расчетных параметров

теплоносителя на участках теплосети [1]. Нормы плотности теплового потока указаны для каждого диаметра трубопровода при предполагаемых среднегодовых температурах теплоносителя [2].

Изменение величины тепловых потерь для конкретного участка тепловой сети в течение отопительного периода определяли:

$$T_i^{тн.нач} = f(T_{нв}) \quad (7)$$

где $T_i^{тн.нач}$ – температура теплоносителя в начале i -го участка теплосети, задаваемая в соответствии с утвержденным температурным графиком, °С; $T_{нв}$ – температура наружного воздуха, °С.

$$Q_i^{н.н} = f(T_i^{тн.нач}, T_i^{тн.кон}, T_{нв}), \quad (8)$$

$$Q_i^{н.н} = c \cdot G_i \cdot (T_i^{тн.нач} - T_i^{тн.кон}) \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

где $Q_i^{н.н}$ – нормативные потери тепловой энергии на i -ом участке тепловой сети, рассчитанные в соответствии с [3], Гкал/ч; $T_i^{тн.кон}$ – температура теплоносителя в конце i -го участка теплосети, °С; c – удельная теплоёмкость теплоносителя, ккал/(кг·°С); G_i – расход теплоносителя на i -ом участке тепловой сети, т/ч.

Значение температуры теплоносителя в конце участка тепловой сети, °С при нормативной величине тепловых потерь:

$$T_i^{тн.кон} = T_i^{тн.нач} - \frac{Q_i^{н.н}}{c \cdot G_i} \cdot 10^3 \quad (10)$$

По ходу движения теплоносителя расход теплоносителя на следующем $(i+1)$ -ом участке теплосети корректируется в зависимости от суммы расходов потребителей, присоединенных к концу i -го участка, и нормированных утечек по формуле:

$$G_{i+1} = G_i - \sum_{n=1}^m G_n - G_i^{н.н} \quad (11)$$

где G_n – расход теплоносителя n -го потребителя по данным системы дистанционного снятия показаний из количества потребителей m , врезки тепловых вводов которых расположены в конце i -го участка, т/ч; $G_i^{н.н}$ – нормированные затраты (утечка) теплоносителя i -го участка, определяются исходя из [2], т/ч.

Примененная методика моделирования и построение математической модели расчетных (нормативных) тепловых потерь на участках теплосети в системе теплоснабжения имеет достаточную степень разработанности, позволяет сформировать исчерпывающую расчетную (нормативную) базу параметров теплоносителя по участкам трубопроводов [3].

Список литературы

1. Схема теплоснабжения МО г. Казань по 2040 г., утв. Приказом Минэнерго России от 30.12.2021 №1543 // Исполнительный комитет г. Казани. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kzn.ru/>, свободный.
2. Приказ Минэнерго России №325 от 30.12.2008 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя» // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2009. – №16. – 67 с.

3. Ахметова И.Г. Лапин К.В. Исследование нестационарных процессов теплообмена в тепловых сетях централизованного теплоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, №3. – С. 13-26.

Сведения об авторах:

Хазиев Раузил Магсумянович – генеральный директор;

Ахметова Ирина Гареевна – д.т.н., проректор по развитию и инновациям;

Лапин Константин Викторович – начальник отдела реализации, балансов и анализа потерь тепловой энергии.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ СХЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОРОД КАЗАНЬ

Абдуллазянов Э.Ю.¹, Гараев А.Л.²

¹*Казанский государственный энергетический университет, Казань;*

²*ООО ИЦ "Энергопрогресс", Казань*

Ключевые слова: теплоснабжение, схема, модель, надежность, мониторинг, тепловые сети.

Аннотация. Теплоснабжение является одной из ведущих отраслей промышленности, обеспечивающей рост национальной экономики, политической и социальной стабильности в РФ. Федеральный закон от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении», наряду с множеством новаций, регулирующих деятельность отрасли теплоснабжающей отрасли, законодательно зафиксировал необходимость создания и использования компьютерных электронных моделей систем теплоснабжения городов.

FEATURES OF THE ELECTRONIC MODEL OF THE HEAT SUPPLY SCHEME OF THE MUNICIPALITY OF KAZAN

Abdullazyanov E.Yu.¹, Garaev A.L.²

¹*Kazan State Power Engineering University, Kazan;*

²*ООО IC "Energoprogress", Kazan*

Keywords: heat supply, scheme, model, reliability, monitoring, heating networks.

Abstract. Heat supply is one of the leading industries that ensures the growth of the national economy, political and social stability in the Russian Federation. Federal Law No. 190-FZ of July 27, 2010 "On Heat Supply", along with many innovations regulating the activities of the heat supply industry, legislatively fixed the need to create and use computer electronic models of urban heat supply systems.

Регулирование в сфере теплоснабжения обеспечивает Федеральный закон №190-ФЗ «О теплоснабжении», который устанавливает правовые основы экономических отношений, возникающих в связи с производством, передачей, потреблением тепловой энергии, тепловой мощности, теплоносителя с использованием систем теплоснабжения, созданием, функционированием и развитием таких систем, а также органов государственной власти, органов местного самоуправления поселений, городских округов по регулированию и контролю в сфере теплоснабжения, права и обязанности потребителей тепловой энергии, теплоснабжающих организаций, теплосетевых организаций [1].

Вступивший в силу с августа 2010 г. Федеральный № 190-ФЗ «О теплоснабжении», наряду с множеством новаций, регулирующих деятельность отрасли вообще и предприятий тепловых сетей в частности, законодательно зафиксировал необходимость создания и использования компьютерных электронных моделей систем теплоснабжения городов.

Электронная модель системы теплоснабжения выполняет ряд функций.

1. Хранение и актуализация данных о тепловых сетях и сооружениях на них.

2. Гидравлический расчет тепловых сетей – определение диаметров всех участков трубопровода, обеспечивающих доставку каждому потребителю необходимого ему расчетного количества теплоносителя (энергоносителя); определение потерь давления энергоносителя при прохождении через соответствующий участок трубопроводной системы.

3. Моделирование всех видов переключений, осуществляемых в тепловых сетях.

4. Расчет энергетических характеристик тепловых сетей.

5. Моделирование перспективных вариантов схем теплоснабжения.

6. Расчет вероятности безотказной работы (надежности) системы теплоснабжения.

7. Использование исходных данных и средств моделирования для определения эффективного радиуса теплоснабжения в зонах действия систем теплоснабжения.

При внедрении электронного моделирования предприятия и администрация города даже в минимальной функциональности получают огромные ресурсные возможности по стратегическому и оперативному управлению системой теплоснабжения на основании расчета и моделирования по пунктам: оптимизация существующей системы теплоснабжения; оперативное моделирование аварийных ситуаций; мониторинг развития системы теплоснабжения. Благодаря электронной модели предприятия могут просчитывать возможные последствия планируемых мероприятий и принимать оптимальные экономически обоснованные решения по наладке, регулировке и модернизации системы теплоснабжения при обеспечении потребителей расчётными тепловыми и гидравлическими параметрами.

Таким образом, электронная модель схемы теплоснабжения – это универсальный инструмент для администрации города, позволяющий принять грамотные управленческие решения по эффективной организации функционирования системы теплоснабжения, по минимизации издержек по реконструкции источников теплоснабжения и тепловых сетей, что позволяет сдерживать рост тарифов для потребителей [2].

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в связке с партнерами АО «Татэнерго» и ИЦ «Энергопрогресс» имеет многолетний успешный опыт в разработке электронной модели системы теплоснабжения различных городов (свыше 10), населением до 500 тыс. чел. (защита проекта в ходе публичных слушаний) и свыше, когда схема теплоснабжения утверждается приказом Министерства энергетики Российской Федерации [3].

Список литературы

1. Федеральный закон №190-ФЗ от 27.07.2010 "О теплоснабжении" // «Собрание законодательства РФ». – 2010. – №31. – ст. 4159. – 107 с.
2. Схема теплоснабжения МО г. Казань по 2040 г., утв. Приказом Минэнерго России от 30.12.2021 №1543 // Исполнительный комитет г. Казани. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kzn.ru/>

3. Ахметова И.Г., Лапин К.В., Ахметов Т.Р., Бальзамова Е.Ю. Цифровизация учета тепловой энергии как средство повышения надежности теплоснабжения // 91-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики»: сборник трудов. – Ташкент, 2019. – С. 125-134.

Сведения об авторах:

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – к.т.н., ректор;

Гараев Алмаз Лябисович – директор.

ВАРИАНТ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОРОД НИЖНЕКАМСК

*Хазиев Р.М., Зверев О.И., Галиахметов Р.М.
АО «Татэнерго», Казань*

Ключевые слова: теплоснабжение, тепловые сети, изношенность, тепловые потери, индивидуальный тепловой пункт, горячее водоснабжение.

Аннотация. Системы теплоснабжения являются ключевым компонентом энергетического сектора любой страны. Поэтому проблемы теплоснабжения требуют организованных и рациональных решений. Как один из вариантов развития систем теплоснабжения муниципального образования город Нижнекамск с целью снижения тепловых потерь, динамики износа тепловых сетей города является переход на индивидуальные тепловые пункты.

FEATURES OF THE ELECTRONIC MODEL OF THE HEAT SUPPLY SCHEME OF THE MUNICIPALITY OF KAZAN

*Khaziev R.M., Zverev O.I., Galiakhmetov R.M.
Tatenergo JSC, Kazan*

Keywords: heat supply, heating networks, deterioration, heat losses, individual heating point, hot water supply.

Abstract. Heat supply systems are a key component of any country's energy sector. Therefore, heat supply problems require organized and rational solutions. As one of the options for the development of heat supply systems in the municipality of Nizhnekamsk in order to reduce heat losses, the dynamics of wear of the city's heating networks is the transition to individual heating points.

Системы теплоснабжения являются ключевым компонентом энергетического сектора. Теплоснабжение имеет большое стратегическое значение для любой страны мира и является основой промышленной и социальной отраслей экономики страны. Поэтому проблемы теплоснабжения требуют четко организованных и рациональных решений. Стратегической целью теплоснабжения являются: надежное снабжение теплом предприятий экономики и населения страны [1].

Анализ результатов хозяйственной деятельности теплоснабжающих и теплосетевых организаций города Нижнекамска показал очень высокий уровень потерь тепловой энергии в системе теплоснабжения города – 26%. Данные потери объясняются как техническим состоянием сетей горячего водоснабжения (ГВС), так и коммерческими потерями, вызванными тем, что потребители рассчитываются за горячую воду на основании нормативов нагрева горячей воды, который практически не учитывает циркуляционные потери и потери в сетях ГВС [2]. С учетом того, что сверхнормативные потери АО «Татэнерго» по большей части приходятся на ГВС и связаны и с техническим состоянием сетей и с особенностями коммерческого учета, наиболее оптимальным решением по снижению данных потерь является их полное исключение. Этого можно добиться за счет отказа от центрального теплового пункта (ЦТП) и перехода на индивидуальные тепловые пункты (ИТП). Наибольшую подверженность к износу

имеют сети ГВС, которые используются для транспортировки «приготовленной» горячей воды в центральных тепловых пунктах до потребителя при закрытой схеме теплоснабжения. Системы централизованного горячего водоснабжения по сравнению с другими инженерными сооружениями являются наименее надежными и долговечными. Срок службы для ГВС при закрытой схеме теплоснабжения от ЦТП и выполнении коммуникаций из стальных труб без антикоррозионных покрытий фактический не превышает 10 лет, а в отдельных случаях 2-3 года. Высокая повреждаемость сетей ГВС приводит к постоянным затоплениям каналов централизованных сетей теплоснабжения, ускорению их внешней коррозии и росту потерь в сетях теплоснабжения и ГВС. Даже при полной модернизации системы горячего водоснабжения через ЦТП не будет достигнута наиболее эффективная как с экономической, так и с функциональной точки зрения централизованная система снабжения горячей водой потребителей [3].

Одним из оправдавших себя способов повышения эффективности теплоснабжения является вывод из эксплуатации ЦТП и сетей ГВС и переноса функций «приготовления» горячей воды к потребителю посредством установки ИТП с индивидуальными водо-водяными подогревателями в многоквартирных домах. Строительство в последние годы домов новых серий с подвальными помещениями и производство бесшумных центробежных насосов способствует переходу во многих случаях к проектированию ИТП и повышению надежности горячего водоснабжения. Экономический эффект от перевода домов с ЦТП на ИТП будет получен как теплосетевой организацией, так и непосредственно потребителями. Снижение затрат для теплосетевой организации ожидается: 25% за счет снижения затрат на ремонты сетей и восстановление ЦТП до нормативно-технического состояния, более 35% за счет снижения потерь тепловой энергии в сетях ГВС и потерь холодной воды, а также за счет сокращения персонала, обслуживающего ЦТП, снижения налогов и прочих расходов. Для перехода на индивидуальные тепловые пункты потребуется оснастить город Нижнекамск ИТП 894 потребителя ГВС. При реализации проекта высвобождаемых средств будет достаточно для покрытия 85% потребностей в устройство ЦТП [2,3].

Список литературы

1. Федеральный закон №190-ФЗ от 27.07.2010 "О теплоснабжении" // «Собрание законодательства РФ». – 2010. – № 31. – ст. 4159. – 107 с.
2. Схема теплоснабжения муниципального образования – г. Нижнекамск на период до 2034 года // Официальный сайт Муниципальное образование город Нижнекамского района Республики Татарстан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://e-nkama.ru/infrastruktura/zkh/shema_teplo/
3. Запольская И.Н., Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Валеев А.Ф., Зверев О.И. Повышение эффективности систем ГВС установкой автоматизированных ИТП // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – № 4 (36). – С. 54-64.

Сведения об авторах:

Хазиев Раузил Магсумьянович – генеральный директор;

Зверев Олег Игоревич – заместитель генерального директора, директор по реализации тепловой и электрической энергии;

Галиахметов Рим Музаффарович – заместитель генерального директора по стратегическому развитию.

СИНХРОНИЗАЦИЯ СХЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРОГРАММОЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ Г. КАЗАНИ

Зверева Э.Р., Ахметова И.Г.

Казанский государственный энергетический университет, Казань

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, теплоснабжение, энергетическая утилизация, энергия, экология.

Аннотация. В данной статье раскрыты, согласно принятой и актуализированной схемы теплоснабжения муниципального образования город Казань по 2040 год, возможности утилизации твердых коммунальных отходов на тепловых электрических станциях Республики Татарстан. В результате эксплуатации таких электрических станций, помимо выработки энергии, решается важная социальная задача – утилизируются твердые коммунальные отходы.

SYNCHRONIZATION OF THE HEAT SUPPLY SCHEME WITH THE KAZAN ELECTRIC POWER INDUSTRY DEVELOPMENT PROGRAM

Zvereva E.R., Akhmetova I.G.

Kazan State Power Engineering University, Kazan

Keywords: municipal solid waste, heat supply, energy utilization, energy, ecology.

Abstract. This article reveals, according to the adopted and updated scheme of heat supply of the municipality of Kazan for 2040, the possibilities of MSW disposal at thermal power plants of the Republic of Tatarstan. As a result of the operation of such thermal power plants, in addition to energy generation, an important social task is being solved – municipal solid waste is disposed of.

В соответствии с Федеральным законом от 29 июля 2017 г. № 279-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О теплоснабжении" в качестве приоритетной задачи установлено повышению эффективности систем централизованного теплоснабжения и эффективности потребления тепловой энергии, а также для мероприятий по модернизации основных фондов [1]. Согласно прогнозу потребления электрической энергии энергосистемы Республики Татарстан на период 2024-2029 годов потребление электрической энергии по энергосистеме Республики Татарстан прогнозируется на уровне 37 261 млн кВт·ч. Среднегодовой темп прироста составит 1,75%. Прогнозируемые объёмы вывода из эксплуатации генерирующих мощностей на электростанциях энергосистемы Республики Татарстан в 2023-2029 годах составляют 939,9 МВт на ТЭС. Вводы новых генерирующих мощностей на электростанциях энергосистемы Республики Татарстан в период 2023-2029 годов с большой долей вероятностью предусматриваются в объёме 1060,0 МВт. В составе новых генерирующих мощностей запланировано и введение тепловой электрической станции на твердых коммунальных отходах, 55 МВт [2]. Сегодня развитие энергетики и экономики в целом нельзя представить в отрыве от экологической повестки. В современные экологические проблемы входят вопросы обращения с отходами, актуальные для большинства стран, в том числе для России. По данным разных источников, в РФ ежегодно образуется от 55 до 70 млн. т твердых

коммунальных отходов (ТКО), суммарный энергопотенциал которых составляет не менее 1,5 ГВт [3]. Как показывает мировой опыт, одним из перспективных решений проблемы и одновременно эффективным способом получения энергии может стать использование ТКО на тепловых электростанциях в качестве топлива. ТКО образуются в крупных городах, и гарантированно ежедневно их образование растет. В результате эксплуатации таких ТЭС, помимо выработки энергии, решается важная социальная задача – утилизируются отходы.

С 2020 года действует Федеральный закон РФ от 27 декабря 2019 г. № 450-ФЗ, который трактует энергетическую утилизацию как использование ТКО в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки. То, что в России ТКО отнесены к ВИЭ на государственном уровне, является важным шагом на пути решения проблемы отходов [3]. Однако, нужно помнить, что ТЭС на ТКО должны удовлетворять современным мировым требованиям экологической безопасности. Кроме того, чтобы отпускаемая энергия такой ТЭС была конкурентоспособной, капитальные затраты должны покрываться за счет платы за переработку ТКО или компенсироваться государственной поддержкой. Значительно повысить энергоэффективность ТЭС на ТКО можно путем интеграции установок для сжигания отходов в тепловую схему ТЭЦ на органическом топливе. Это позволяет повысить КПД действующей станции на ТКО примерно с 20% до 30-35% и тем самым увеличить ее установленную электрическую мощность, минимизировать расходы на строительно-монтажные работы, уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты за счет совместного использования ряда узлов, сэкономить традиционное топливо.

В целях более эффективного использования энергетического потенциала ТКО необходимо разработать концепцию энергетической утилизации ТКО на действующих генерирующих мощностях. Для этого необходимо: разработать экологичные технологии использования ТКО на традиционных ТЭС; сформулировать подходы к модернизации действующих ТЭС на ТКО; оценить энергопотенциал ТКО, целесообразность их утилизации на оборудовании действующих ТЭС и эффективность работы оборудования при минимальном воздействии на окружающую среду и др. [3]. Исследования в этой области могут стать мощным толчком для развития и реализации энергетической утилизации ТКО в Республике Татарстан.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 9.06.2020 N 1543-р (ред. от 15.06.2009) «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf>
2. Схема теплоснабжения МО г. Казань по 2040 г., утв. Приказом Минэнерго России от 30.12.2021 №1543 // Исполнительный комитет г. Казани. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kzn.ru/>
3. Зверева Э.Р., Тугов А.Н., Грунтович Над.Вл., Грунтович Ник.Вас., Марьин Г.Е. Перспективные направления белорусско-российского научного сотрудничества в

энергетике, экологии и экономике // Энергетическая стратегия. – 2024. – №1 (97). – С. 23-27.

Сведения об авторах:

Зверева Эльвира Рафиковна – д.т.н., профессор;

Ахметова Ирина Гареевна – д.т.н., проректор по развитию и инновациям.

МЕХАТРОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сковпень С.М., Лобанов Н.В., Малыгин Н.И.

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Северодвинск*

Ключевые слова: копируемые токарно-карусельные станки, деревянные литейные модели, мехатронные технологические комплексы, цифровые модели, автоматическое слежение, траектория движения.

Аннотация. Рассмотрены проблемные вопросы информатизации технологий производства крупноразмерных литейных моделей из древесины и деревокомпозитных материалов. Предложены технические решения по модернизации технологического оборудования, позволяющие придать оборудованию новые технологические возможности, повысить класс точности, расширить его функциональные возможности и номенклатуру обрабатываемых деревянных моделей и других изделий, снизить трудоемкость обработки. Разработан принцип и методы частотно-импульсного и широтно-импульсного цифрового управления одноприводных мехатронных технологических комплексов с разветвленной системой приводов подач. Рассмотрены основные особенности методов цифрового управления одноприводными мехатронными системами и профилем обрабатываемой поверхности изделия. Предлагаемые принципы и методы цифрового управления траекторией перемещения инструмента в одноприводных станках позволяют повысить качество обработки деталей до уровня обработки на станках с автономными электроприводами для каждой координатной оси подач, расширить их функциональность и повысить производительность.

MECHATRONIC TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR PROCESSING WOOD COMPOSITE MATERIALS

Skovpen S.M., Lobanov N.V., Malygin N.I.

Northern (Arctic) Federal University named by M.V. Lomonosov, Severodvinsk

Keywords: copying lathes-mill machines, wooden casting models, mechatronic technological complexes, digital models, automatic tracking, motion trajectory.

Abstract. Problematic issues of informatization of technologies for the production of large-size wood and wood composite materials casting model are considered. Technical solutions for the modernization of technological equipment are proposed, allowing to give the equipment new technological capabilities, to increase the accuracy class, to expand its functionality and the nomenclature of processed wooden models and other products, and reduce the labor intensity of processing. The principle and methods of frequency-pulse and width-pulse digital control of single-drive mechatronic technological complexes with a branched system of feed drives have been developed. The main features of digital control methods for single-drive mechatronic systems and the profile of the processed surface of the product are considered. The proposed principles and methods of digital control of the tool trajectory in single-drive machines make it possible to improve the quality of machining parts up to the level of machining on machines with autonomous electric drives for each feed coordinate axis, expand their functionality and increase productivity.

Введение

Древесина и деревокомпозитные материалы (ДКМ) широко используются в различных отраслях промышленности. Одним из видов их применения является

изготовление деревянных модельных комплектов в литейном производстве. Модельный комплект – набор специальной оснастки, предназначенной для получения литой заготовки детали. Деревянные модельные комплекты служат для формирования отливок деталей, и от качества их внутренних и внешних поверхностей зависит качество получаемых отливок и трудоёмкость механической обработки для получения окончательной формы деталей. Литейное производство тяжёлого общего и специального машиностроения часто характеризуется мелкосерийным и единичным типом производства. Важное место в нём занимает производство моделей. Значение литейного производства в народном хозяйстве, как одной из заготовительных баз в машиностроении, чрезвычайно велико. Литьём получают разнообразные конструкции отливок массой до 300 т, длиной до 20 м, со стенками толщиной до 500 мм. Литые детали из различных сплавов для большинства машин составляют до 50-80% их общей массы. Около 60% литейных деталей, идущих на изготовление машин, станков, различных механизмов и приспособлений, получают с применением моделей из древесины и ДКМ, а в отдельных отраслях – более 80%. Деревомодельная оснастка применяется в тяжёлом, общем и специальном машиностроении, судостроении, крупном энергомашиностроении, в отраслях с преобладанием единичного, мелкосерийного и серийного производства. В настоящее время заготовки моделей, имеющих форму тел вращения, диаметром до 3000 мм и более обрабатывают на универсальных токарно-лобовых станках.

Одной из задач, решаемых модельным производством, является создание моделей объектов, имеющих сложнопрофильные поверхности для получения которых необходимо применение обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ). Особенность сложнопрофильных поверхностей (СПП) заключается в их математическом описании не только набором простых поверхностей – плоскостей, цилиндров, конусов, но и поверхностями, задаваемыми набором точек или кривых в пространстве. Типичными примерами таких поверхностей в судостроении являются элементы сборных гребных винтов и их литейных, главным образом из деревокомпозитных материалов, моделей – лопасти, ступицы и обтекатели. Высокие трудозатраты связаны с тем, что качество формообразующих поверхностей моделей обеспечивается в основном в ручном режиме и определяется квалификацией исполнителей. Перспективным направлением, позволяющим снизить трудоёмкость и себестоимость изготовления модельной оснастки, является применение для основных формообразующих операций обработки поверхностей моделей технологических центров с ЧПУ. Многофункциональные обрабатывающие центры с ЧПУ, оснащенные точными системами позиционирования и высокоскоростными шпинделями, обеспечивают гибкость производства и повышение точности изготовления сложнопрофильных элементов модельной оснастки. Анализ опыта внедрения на различных предприятиях промышленности обрабатывающих центров при изготовлении моделей и модельной оснастки из древесины и ДКМ показывает возможность значительного снижения трудоёмкости изготовления модельных комплектов. Поэтому применение программно-управляемых обрабатывающих станков или

мехатронных технологических комплексов (МТК) в производстве литейных моделей из древесины и деревокомпозитных материалов актуально.

Объект и методы исследования

Основные принципы автоматизированного процесса подготовки производства изделий на станках с ЧПУ относятся к 70-м годам прошлого столетия. В 80-е годы исследователи работали над автоматизацией программирования процессов механической многокоординатной обработки с числовым программным управлением. В разное время с использованием графических построений были разработаны разные методы копирования – воспроизведения сложных поверхностей с помощью копиров. Эти методы обеспечивают процессы обработки трёхмерных и двухмерных поверхностей фрезерованием одно- и двухсторонними строчками по копиям с использованием фасонных копировальных фрез. Основная часть работ относится к методам и стратегии разработки управляющих программ для станков с ЧПУ, способам управления инструментом. Управляющая программа – это копир в неявном виде.

В настоящее время в деревообрабатывающей промышленности наблюдается значительный рост количества станков с ЧПУ. Деревообрабатывающие центры с ЧПУ эффективно применяются в разных отраслях деревообрабатывающей промышленности: в производстве мебели, при производстве строительных конструкций и др. Одним из преимуществ обрабатывающих центров является их технологическая гибкость и перенастройка на обработку нового изделия, что даёт большое преимущество их применения в мелкосерийных и единичных производствах.

Основу конструкции обрабатывающего центра составляет мощная станина, которую обычно собирают в виде жёсткой сварной конструкции достаточно устойчивой к деформациям и вибрациям. Станина имеет значительный вес, что обеспечивает демпфирование вибрации, которая возникает в процессе работы станка и передаётся на его основание. На станине могут быть смонтированы функциональные механизмы станка – механизм базирования заготовки, ходовая стойка, суппорт с несколькими обрабатывающими головками, направляющие координат, магазин для сменного дереворежущего инструмента, механизм управления и др. Столы обрабатывающих центров могут отличаться размерами, конфигурацией и способом фиксации заготовки. Для разных заготовок могут потребоваться разные условия закрепления, например, для обработки заготовок из прочных материалов требуются большие силы резания, что требует особого внимания к надёжности их крепления. Для фиксации таких заготовок на столе обрабатывающего центра используют наряду с вакуумными прижимными устройствами дополнительные крепёжные элементы. Для получения обработанной поверхности высокого качества необходимо, снижение вибрации заготовки, поэтому механизмы фиксации должны обеспечивать жёсткость. Следует отметить, что исследований по систематизации научно-технической информации касающейся деревообрабатывающих центров не достаточно.

Деревообрабатывающие центры с ЧПУ классифицируют по разным признакам, основные из них: технологическое назначение; уровень компоновки; количество степеней свободы; вид принципиальной схемы; конструктивные

признаки; конструктивная проработка; вид системы управления и обслуживающих устройств. По признаку назначения различают центры: для обработки плоских деталей; для обработки объёмно-фасонных деталей; для обработки деталей с формой тел вращения; для контурной обработки изделий.

Обработка деталей в виде тел вращения, с позиций формообразования, достаточно простая задача. Но для крупногабаритных элементов сборного гребного винта – ступицы и обтекателя диаметром два метра и более, проблемой является геометрическая точность изготовления литых заготовок. Это связано с особенностями материала отливки, например в титановых сплавах, суммарная толщина мелкозернистой корки и зоны столбчатых кристаллов не превышает 3 мм. При обработке с величиной припуска, превышающей это значение, вскрывается недопустимая зона крупных равноосных кристаллов. Что приводит к необходимости дополнительных операций наплавки и последующей обработки детали.

Как показала практика, применяемые предприятиями копировальные токарно-карусельные станки не позволяют обеспечивать достаточную точность обработки поверхностей литейных моделей из ДКМ.

Целью данной работы является разработка цифровых методов и технических средств повышения качества обработанной поверхности и геометрической точности литейных моделей из древесины и ДКМ, как основы обеспечения точности механической обработки литейных моделей и изделий машиностроения на финишных операциях технологического процесса.

Результата исследования и их обсуждение

Общий вид и принципиальная схема разработанной конструкции станка [1] представлена на рисунке 1 и включает: главный электропривод – 1; автоматическую коробку скоростей подач и управления осями – 2; блок электромагнитных муфт 3 ступенчатого изменения скоростей подач; блок электромагнитных муфт 4 управления горизонтальной осью ОХ; блок электромагнитных муфт 5 управления вертикальной осью ОZ; цифровая система управления – 6; перемещающийся по оси ОХ суппорт – 7; перемещающаяся по оси ОZ каретка 8, на которой в резцедержателе 9 крепится резец 10; датчик линейного перемещения суппорта по оси ОХ – 11; датчик линейного перемещения ползуна по оси ОZ – 12; обрабатываемая деталь – 13; планшайба – 14.

Работа станка с цифровой системой управления, осуществляется следующим образом. На планшайбу 14 устанавливается деталь 13, в резцедержателе 9 закрепляется резец 10. После этого в цифровую систему управления 6 вводится цифровая модель обрабатываемой детали 13, запускается главный электропривод 1 и в соответствии с технологическим процессом обработки детали задаются скорость подачи s , глубина резания t и ширина зоны слежения δ . После подачи команды «ПУСК» в соответствии с управляющей программой начинается обработка по заданной программой траектории. При этом цифровая система управления генерирует сигналы, которые поступают в блоки электромагнитных муфт 4 и 5 управления осями X и Z , и резец 10 перемещается в соответствии с заданной программой. При этом информация с

поступающих на соответствующие электромагнитные муфты управления (ЭМУ) подачами по осям.

У станков с отдельными электроприводами по каждой оси переход резца из точки начала в конечную точку отрезка можно задать по любой требуемой траектории за счёт использования различных типов интерполяторов, так как можно отдельно задавать требуемую скорость подачи по каждой оси. В токарно-карусельных станках (ТКС) с одним асинхронным электроприводом для двух управляемых координат ЭМУ применение интерполяторов невозможно [4], так как скорость подачи по обеим осям будет одинаковой и зависит от частоты вращения главного привода. Такой вариант не приемлем, так как не может обеспечить удовлетворительное качество обработанной поверхности.

Заключение

Применение цифрового управления траекторией перемещения инструмента [5-7] в одноприводных деревообрабатывающих мехатронных технологических комплексах позволяет расширить функциональность оборудования, применять его для решения задач обработки сложнопрофильных моделей из древесины и ДКМ, повышает точность и качество обработки поверхностей моделей до уровня качества обработки на станках с автономными электроприводами по каждой координатной оси подач.

Список литературы

1. Патент №2504456 РФ. Способ автоматизированного управления копировальным токарным станком / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Н.В. Лобанов, В.Т. Харитоненко, Д.А. Ульяничев. – Заявка №2012116175 от 20.04.2012; опубл. 20.01.2014.
2. Малыгин В.И., Черепенин Ф.В., Сковпень С.М., Лобанов Н.В., Ульяничев Д.А. Цифровые методы программного управления одноприводными токарно-карусельными станками // Вестник машиностроения. – 2012. – №10. – С. 50-55.
3. Черепенин Ф.В., Сковпень С.М., Ульяничев Д.А. Бызова М.А. Повышение качества обработки деревянных литейных моделей на токарно-карусельных одноприводных станках // Лесной журнал. – 2016. – №4. – С. 121-133.
4. Malygin V.I., Cherepenin F.V., Skovpen' S.M., Lobanov N.V., Ul'anichev D.A. Digital control system for a 1525 turret lathe // Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 12, pp. 799-803.
5. Патент №2543020 РФ. Способ автоматического управления копировальным токарным станком с автоматической коробкой скоростей подач станка / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Н.В. Лобанов, В.Т. Харитоненко, Д.А. Ульяничев, С.Н. Куликов, О.В. Рохин, А.В. Басакин. – Заявка №2013122789 от 20.05.2013; опубл. 27.02.2015.
6. Патент №2649353 РФ. Способ автоматического управления копировальным токарным станком с автоматической коробкой скоростей подач / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Л.В. Кремлева, Н.В. Лобанов. – Заявка №2017101701 от 19.01.2017; опубл. 02.04.2018.
7. Черепенин Ф.В., Сковпень С.М., Ульяничев Д.А. Цифровое моделирование при обработке литейных моделей из древесины и древесных материалов на станках токарной группы // Лесной журнал. – 2017. – №1. – С. 166-176.

Сведения об авторах:

Сковпень Сергей Михайлович – к.т.н., доцент, доцент кафедры;
Лобанов Николай Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры;
Малыгин Никита Игоревич – студент.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ПУТЕМ УСТАНОВКИ ПРОСЕИВАЮЩИХ КАМЕР В МОЛОТКОВУЮ ДРОБИЛКУ

Мерчалов С.В., Прядкин В.И.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
им. Г.Ф. Морозова, Воронеж*

Ключевые слова: дробилка, камера измельчения, просеивающие камеры, радиус сепарирующей поверхности, угол охвата камеры, ударное разрушение, модуль измельчения, затраты энергии.

Аннотация. Представлены результаты исследований дробилки с просеивающими камерами вместо серийного решета. Конструктивные параметры камер увеличивают долю ударного разрушения зерна с последующим быстрым удалением измельченного продукта. Просеивающие камеры установлены в новой крышке серий дробилки КДМ-2. В крышке, согласно выполненным исследованиям, угол α охвата просеивающей камеры рабочей камеры дробилки составил 60° , а радиус просеивающих сит принят как половина радиуса камеры измельчения. При таких конструктивных решениях сепарирующих поверхностей уменьшается скорость сходовых фракций при их выходе из просеивающих камер, а направление их скорости движения направлено перпендикулярно скорости молотков. Результаты исследований показали, что установка просеивающих камер в дробилку снижает расход энергии относительно серийной, работающей с заводским комплектом на 15-25%.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF GRAIN CRUSHING BY INSTALLING SCREENING CHAMBERS IN A HAMMER CRUSHER

Merchalov S.V., Pryadkin V.I.

Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh

Keywords: crusher, crushing chamber, screening chambers, separating surface radius, chamber coverage angle, impact fracture, crushing module, energy consumption.

Abstract. The research results of a crusher with screening chambers instead of a serial sieve are presented. The design parameters of the chambers increase the proportion of impact destruction of grain, followed by rapid removal of the crushed product. The screening chambers are installed in the new cover of the KDM-2 crusher series. In the lid, according to the performed studies, the angle α of coverage of the screening chamber of the working chamber of the crusher was 60° , and the radius of the screening sieves was assumed to be half the radius of the grinding chamber. With such design solutions for separating surfaces, the velocity of the discharge fractions decreases as they exit the screening chambers, and the direction of their velocity is perpendicular to the speed of the hammers. The research results have shown that the installation of screening chambers in the crusher reduces energy consumption relative to the serial, working with the factory set by 15-25%.

При измельчении зерна в молотковых дробилках на их разрушение расходуется не больше 10-15% от общих затрат энергии. Большая часть затрат требуются на перемещение кольцевого продуктового слоя внутри камеры дробилки [1]. Скорость слоя приблизительно равна половине скорости движения молотков и составляет примерно 35-40 м/с [2, 3] Увеличение доли ударного разрушения с последующим быстрым удалением измельченного продукта может

повысить эффективность измельчения. Данное условие может выполнить техническое решение, которое предлагает установить в конструкцию камеры измельчения молотковой дробилки просеивающие камеры вместо серийного решета [4]. Схема молотковой дробилки с просеивающими камерами представлена на рисунке 1.

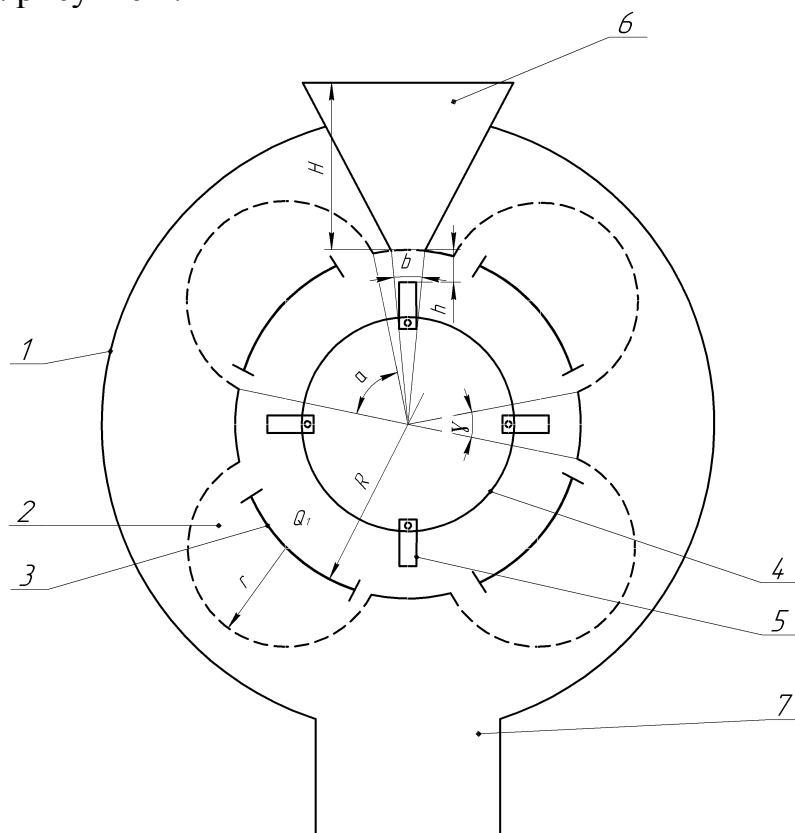


Рис. 1. Схема дробилки с просеивающими камерами: 1 – корпус; 2 – просеивающая камера; 3 – деки; 4 – ротор; 5 – пакет с молотками; 6 – загрузочное устройство; 7 – выгрузное устройство

В дробилки с просеивающими камерами (рис. 1) в корпусе 1 размещены просеивающие камеры с ситовыми поверхностями 2 и ротор 4 с молотками 5. Также дробилка укомплектована деками 3. Подача сырья осуществляется через загрузку 6, вывод измельченного зерна происходит по патрубку 7.

Процесс измельчения в дробилке следующий. Из загрузочного устройства 6 в рабочую камеру поступает зерно и ударами одного из пакетов молотков 5, измельчается и движется в просеивающую камеру 2. В камере происходит выделение мелких фракций на ситовой поверхности и их вывод из дробилки, а крупные, не выделенные в просеивающей камере, сходом направляются в зону работы молотков и подвергаются дополнительному измельчению. Далее процесс повторяется. В такой конструкции дробилки с просеивающими камерами, в отличие от серийной, можно выделить два отдельных процесса: измельчение зерна молотками в районе расположения дек и получение готового продукта в просеивающих камерах, что позволит увеличить долю ударного разрушения и снизить энергоемкость.

Для снижения скорости кольцевого слоя в камере измельчения предлагаемого технического решения являются сепарирующие поверхности в

просеивающих камерах 2, выполненные с определенным радиусом r таким образом, чтобы после прохождения камер, измельчаемые частицы двигались перпендикулярно траектории движения молотков. Данное техническое решение позволяет снизить скорость движения кольцевого слоя и направлять измельчаемое зерно в область работы молотков и повышать долю ударного разрушения. Согласно рис.1 радиус сепарирующей поверхности r можно рассчитать по формуле

$$r = R \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

где R – радиус камеры измельчения дробилки, м; α – угол охвата камеры, просеивающей камерой, град.

Количество рабочих камер можно определить из выражения

$$n_k = \frac{360 - (\beta + \sum \gamma)}{\alpha}, \quad (2)$$

где β – угол охвата дробильной камеры в месте установки загрузочной горловины, град; $\sum \gamma$ – угол охвата дробильной камеры деками град.

Оптимальное значение угла α из выражения (1) находится в пределах 50...70 градусов.

Для подтверждения эффективности предлагаемого решения, что установка просеивающих камер в камеру дробилки повысит эффективность измельчения были проведены лабораторные исследования и сделан сравнительный анализ с известной дробилкой КДМ-2. Вначале исследований определили оптимальные параметры просеивающих камер от угла установки α просеивающих камер в дробильной камере. Результаты экспериментов представлены зависимостями, представленные на рисунках 2 и 3.

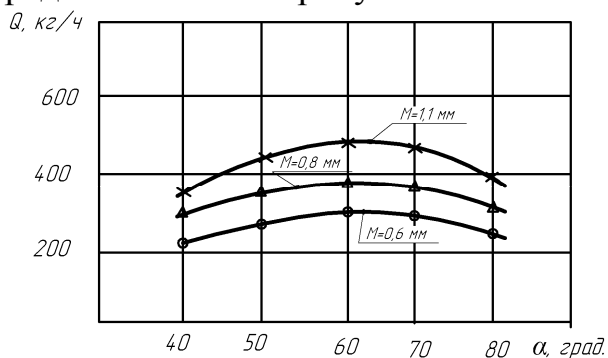


Рис. 2. Влияние угла охвата α просеивающих камер на производительности Q дробилки

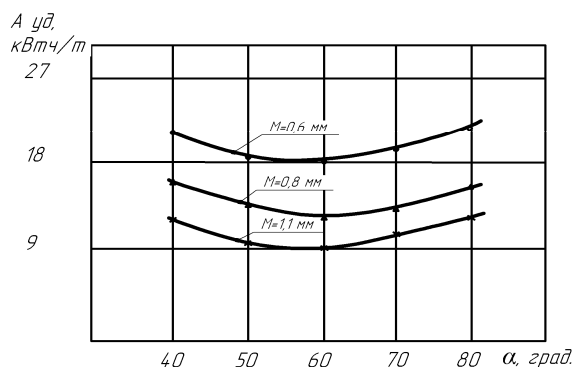


Рис. 3. Влияние угла охвата α просеивающих камер на удельные затраты энергии $A_{уд}$ дробилки

Графические зависимости (рис. 2, 3) показали, что при угле α охвата просеивающих камер равный 60° наблюдается наибольшая производительность и наименьшие удельные затраты энергии при измельчении зерна дробилкой с просеивающими камерами. Тогда согласно формуле (1) радиус сепарирующей поверхности r можно принять $0,5 R$ камеры измельчения

$$r = 0,5 R. \quad (3)$$

Для доказательства эффективности измельчения зерна при установке просеивающих камер в дробильную камеру использовали известную дробилку КДМ-2. Эта дробилка имеет диаметр рабочей камеры 500 мм.

Для таких исследований разработали новую крышку дробилки с деками и просеивающими камерами. Согласно выполненным исследованиям, угол α охвата просеивающей камеры рабочей камеры дробилки приняли 60° . Радиус сит приняли как половину радиуса камеры измельчения, и он составил 0,125 м. В такой конструкции имеется две просеивающие камеры. Такую крышку можно легко монтировать на дробилку и без затруднений менять ситовые поверхности. Крышка имеет несложную конструкцию, не требует дорогостоящих материалов на ее изготовление и может быть изготовлена собственными силами в фермерском хозяйстве. Конструкция крышки представлена на рисунке 4.

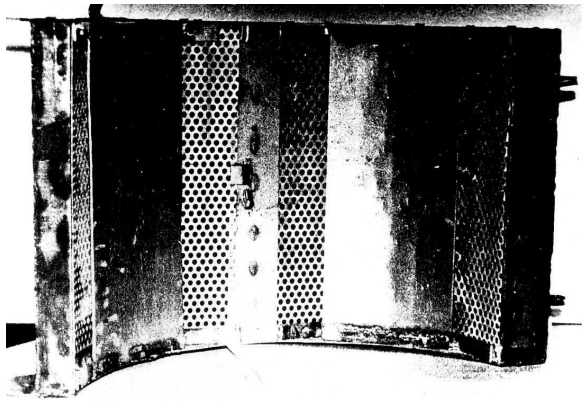


Рис. 4. Новая крышка дробилки КДМ-2 с просеивающими камерами

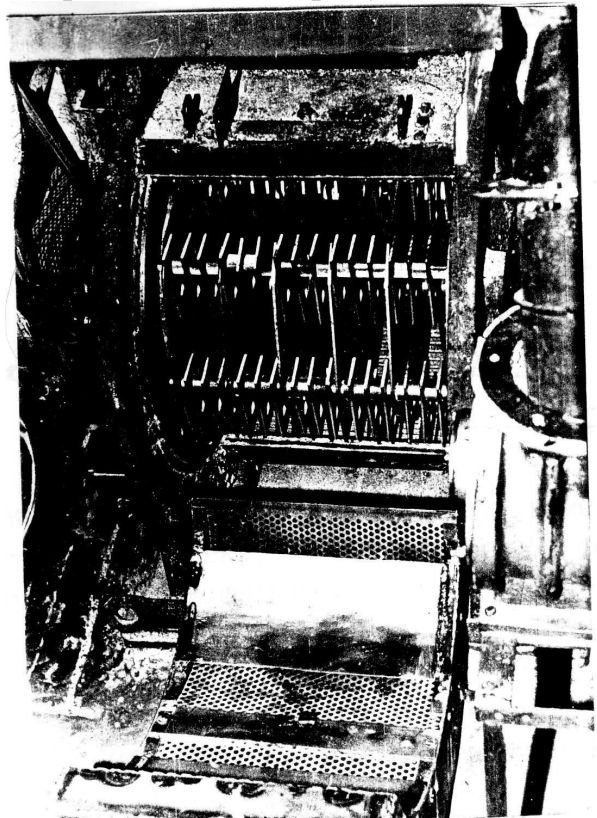


Рис. 5. Рабочая камера дробилки КДМ-2 с просеивающими камерами

При проведении экспериментов дробилка КДМ-2 работала с серийной крышкой и с новой с просеивающими камерами. В камерах использовали тонкие сита с диаметром отверстий 2; 3; 5; 6 мм, такие же устанавливались при работе дробилки КДМ-2 с серийной крышкой и работали с комплектом заводских (толстых) сит. Результаты исследований показаны на рисунке 6. При отборе проб фракций готового продукта при измельчении зерна в дробилке руководствовались методикой приведенной в источнике [5].

Результаты исследований (рис. 6) показывают, что при одинаковом модуле размола расход энергии дробилки с просеивающими камерами на 10-20% меньше, чем у серийной, работающей на тонких сепарирующих ситах, а для серийной дробилки с заводским комплектом меньше на 15-25%.

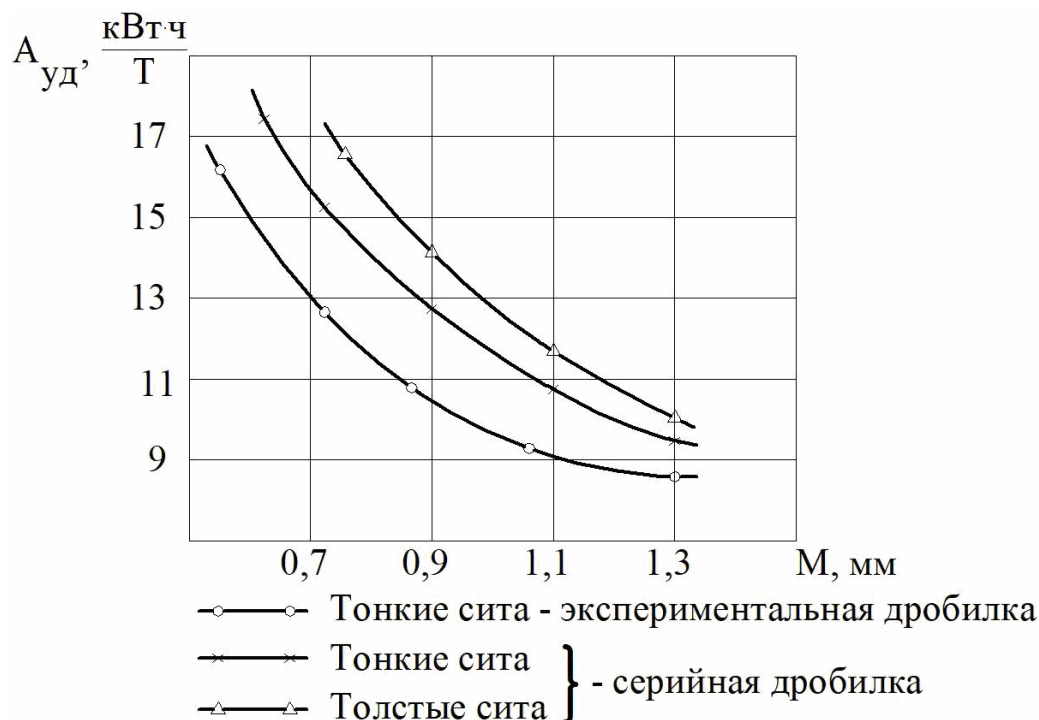


Рис. 6. Влияние модуля измельчения M экспериментальной и серийной дробилки на удельные затраты энергии $A_{уд}$

На основе анализа результатов полученных при проведении экспериментальных исследований молотковой дробилки КДМ-2 с серийной крышкой и с новой с просеивающими камерами, можно сделать следующие выводы.

Работа дробилки с просеивающими камерами уменьшает расход энергии на 10-20%, относительно серийной, работающей на тонких сепарирующих ситах, а с заводским комплектом на 15-25%. Это подтверждает утверждения о повышении доли ударного разрушения молотками по продукту при использовании просеивающих камер, в сравнении с серийной дробилкой.

Список литературы

1. Федоренко И.Я., Золотарев С.В., Смышляев А.А. Предпосылки к разработке способа промежуточной сепарации продуктов измельчения в дезинтеграторе // Совершенствованиетехнологий и технических средств в АПК: Юбилейный сборник. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2001. – С. 93-95.
2. Sysuev V., Savinyh P., Aleshkin A., Ivanovs S. 2017 Engineering for Rural DevelopmentProceedings // Investigation of oscillations of hammer rotor of grain crusherpp. 2017, pp. 1225-1232.
3. Goodband R.D., Tokach M.D., Nelssen J.L. The effects of diet particle size on animalperformance // Feed manufacturing. 1995, no. 2050, pp. 156-161.
4. А.с. 1144717 СССР. Устройство для измельчения кормов / Сундеев А.А., Барбицкий А.П., Дорофеев Н.С. – Заявка №3583080 от 04.02.83; опубл. 15.03.85, Бюл. № 10.
5. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. – М., 2011.

Сведения об авторах:

Мерчалов Сергей Васильевич – к.т.н., доцент.

Прядкин Владимир Ильич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ САХАРА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Печерица М.А., Мойдинов Д.Р., Степанова Е.Г.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Ключевые слова: экстрагирование, ультразвук, кавитационный эффект, диффузионный сок, гидромодуль, чистота, симплекс-метод.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований ультразвуковой обработки свекловичной стружки перед экстрагированием сахара, на основании которых проведен полный факторный эксперимент по плану 3^2 . Рассчитана регрессионная зависимость чистоты диффузионного сока от температуры, времени ультразвукового воздействия и гидромодуля. Установлено наибольшее влияние гидромодуля, при котором достигается максимальный выход сахара. С помощью симплекс-метода определены оптимальные значения выбранных факторов.

INVESTIGATION OF THE SUGAR EXTRACTION PROCESS USING ULTRASOUND

Pecheritsa M.A., Moidinov D.R., Stepanova E.G.

Kuban State Technological University, Krasnodar

Keywords: extraction, ultrasound, diffusion juice, purity, simplex method.

Abstract. The results of experimental studies of ultrasonic treatment of beet chips before sugar extraction are presented, on the basis of which a complete factorial experiment was conducted according to plan 32. The regression dependence of the purity of the diffusion juice on temperature, time of ultrasonic action and the hydraulic module is calculated. The greatest effect of the hydromodule has been established, at which the maximum sugar yield is achieved. The optimal values of the selected factors are determined using the simplex method.

Перевооружение свеклосахарного производства предполагает поиск инновационных методов воздействия на сырье и обрабатываемые среды [1, 2]. Одним из таких методов является воздействие ультразвуком (УЗ) [3]. В настоящее время интенсификация процессов селективного экстрагирования определяется скоростью внутреннего тепломассопереноса и внешней массоотдачей, из которой последняя является лимитирующей. Ультразвуковая обработка системы «жидкость-твердая фаза» нарушает сплошность потока жидкости, вызывая кавитационный эффект с образованием вихревых микропотоков и влияя на диффузионную проницаемость свекловичной ткани. В данной работе проведены экспериментальные исследования, направленные на установление аналитической зависимости чистоты диффузионного сока (экстракта, %) от температуры нагрева ($^{\circ}\text{C}$), времени УЗ-обработки при частоте 25 кГц (с) и массового соотношения экстрагента (воды) и свекловичной стружки (гидромодуля) по плану $Y = 2^3$ (табл. 1). Каждый опыт проводили в 2 повторностях. Характеристики плана сведены в таблицу 2.

Табл. 1. Пределы изменения факторов

Z_1	Температура нагрева, °C	60	80
Z_2	Время, с	30	300
Z_3	Гидромодуль	1,0	1,4
Y	Выход экстракта (диффузионного сока), %		

Табл. 2. Исходные данные к расчету полного факторного эксперимента

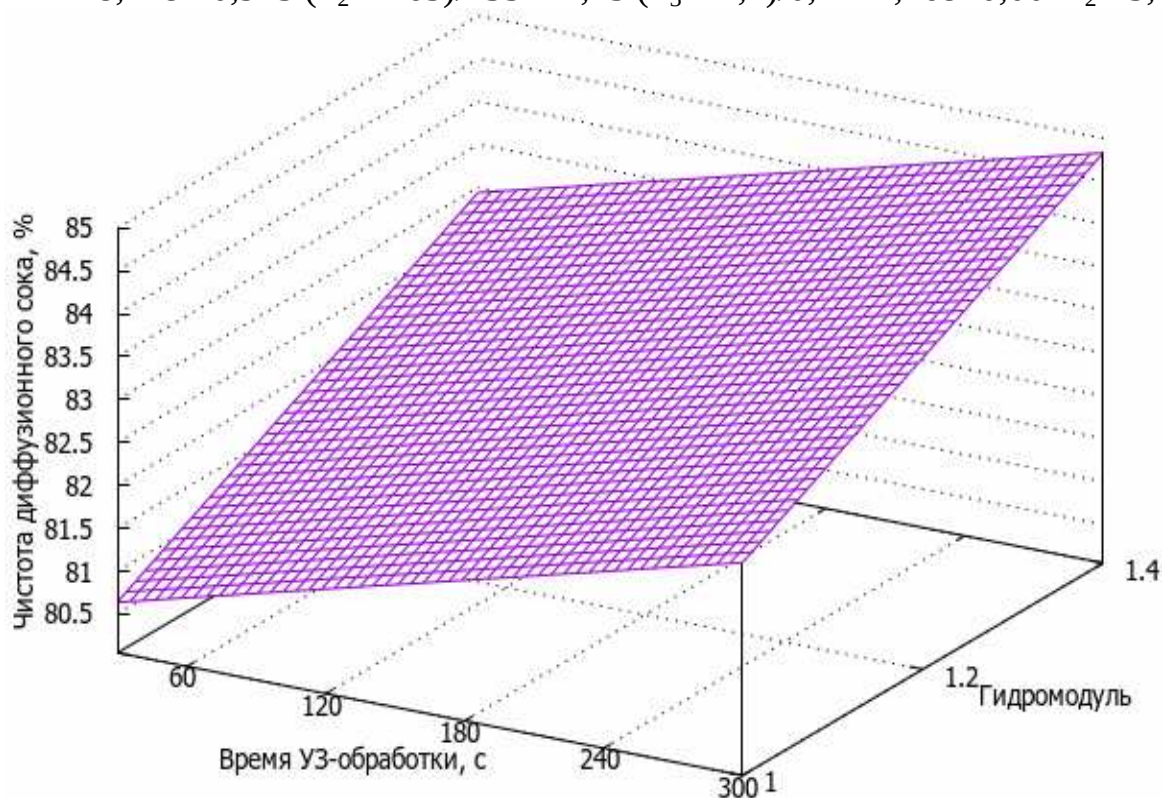
Опыт	Z_1	Z_1	Z_1	Y_1	Y_2	Y_3	Y_{cp}
1	+	+	+	85,2	85,5	85,6	85,4
2	-	+	+	84,5	85,6	84,3	84,8
3	+	-	+	82,2	84,7	83,4	83,3
4	-	-	+	81,9	81,5	83,4	82,2
5	+	+	-	84,1	82,5	83,4	83,1
6	-	+	-	82,3	80,3	81,7	81,7
7	+	-	-	82,3	80,1	80,8	81,1
8	-	-	-	80,1	80,7	81,15	80,6

Для каждого фактора находим центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной x_i от натуральной Z_i по формулам:

$$x_1 = \frac{Z_1 - 70}{10}, \quad x_2 = \frac{Z_2 - 165}{135}, \quad x_3 = \frac{Z_3 - 1,2}{0,2}.$$

Получено уравнение регрессии и построена графическая зависимость чистоты сока от времени УЗ-обработки и гидромодуля (рис. 1).

$$Y = 8,278 + 0,975 \cdot (Z_2 - 165)/135 + 1,15 \cdot (Z_3 - 1,2)/0,2 = 7,468 + 0,007Z_2 + 5,75Z_3$$

Рис. 1. Графическая зависимость $Y = Y(Z_1; Z_2)$

Условия начальной серии опытов для нахождения исходного симплекса приведены в таблице 3. Результаты расчетов оптимизации симплекс – методом представлены в таблице 4.

Табл. 3. Условия начальной серии опытов

№ опыта	X_1	X_2	X_3
1	0,5	0,289	0,204
2	-0,5	0,289	0,204
3	0	-0,578	0,204
4	0	0	-0,612

Табл. 4. Оптимизация опытных данных симплекс-методом

i	Фактор						Целевая функция Y_i		
	1-й		2-й		3-й		Поиск оптимума, шаг		
	x_{1i}	X_{1i}	x_{2i}	X_{2i}	x_{3i}	X_{3i}	1-й	2-й	3-й
1	0,5	100	0,289	116,7	0,204	1,2856	84	84	84
2	-0,5	20	0,289	116,7	0,204	1,2856	24	-	-
3	0	60	-0,578	-143,4	0,204	1,2856	83	83	83
4	0	60	0	30	-0,612	0,1432	-	-	-1

Данные расчетов будут использованы при назначении режимов экстрагирования с УЗ-обработкой сокоотрующей смеси.

Список литературы

1. Степанова Е.Г. Применение электротехнологии в производстве сахара из свеклы // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2007. – №1 (296). – С. 61-62.
2. Грачев Н.А., Зубко А.В., Мунасар Е.Х.А., Печерица М.А., Степанова Е.Г., Никонов О.И. Технические аспекты разработки оборудования при перевооружении сахарных заводов // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. – 2020. – Т. 29. – С. 26-32.
3. Печерица М.А., Степанова Е.Г., Липай И.С. Возможности применения ультразвука (УЗ) при экстрагировании сахара // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2024. – №4. – С. 250-256.

Сведения об авторах:

Печерица Михаил Алексеевич – аспирант;

Мойдинов Даниил Рустамович – аспирант;

Степанова Евгения Григорьевна – к.т.н., доцент.

Научное периодическое издание

Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№8

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 7,79.

Подписано в печать 28.01.2025г. Заказ №25-01.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/maippsim.html>
<https://doi.org/10.26160/2587-7577-2025-8>

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,
г. Санкт-Петербург).

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.

<http://srcms.ru>

E-mail: spbf@srcms.ru