

65 ЛЕТ ДОНГИ. НАУКА И ПРАКТИКА. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ИННОВАЦИИ

**Сборник тезисов докладов
юбилейной международной
научно-технической конференции**

13-14 октября 2022 г.

Часть 1



**ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

65 ЛЕТ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**65 ЛЕТ ДонГТИ.
НАУКА И ПРАКТИКА.
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ИННОВАЦИИ**

Сборник тезисов докладов
юбилейной международной научно-технической конференции

13–14 октября 2022 г.

Часть 1

Алчевск, 2022

Редакционная коллегия

Вишневский Д. А. — д.т.н., проф.
Кунченко А. В. — к.э.н., доц.
Смекалин Е. С. — к.т.н., доц.
Жильцов А. П. — к.т.н., доц.
Еронько С. П. — д.т.н., проф.
Гутько Ю. И. — д.т.н., проф.
Куберский С. В. — к.т.н., проф.
Коробко Т. Б. — к.т.н., доц.
Козачишен В. А. — к.т.н., доц.
Чебан В. Г. — к.т.н., доц.
Карпук И. А. — к.т.н., доц.
Шульгин П. Н. — к.т.н., доц.
Доброногова В. Ю. — к.т.н., доц.
Дьячкова В. В. — к.э.н., доц.
Псюк В. В. — к.т.н., доц.
Федорова В. С. — к.фарм.н., доц.
Кусайко Н. П. — директор НЦМОС

*Рекомендовано Ученым советом ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
(Протокол № 3 от 28.10.2022)*

Ш51 **65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации** : сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции (13–14 октября 2022 г.). Часть 1. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — 264 с.

Настоящий сборник содержит тезисы докладов преподавателей, научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений, работников промышленных предприятий, представленных на Юбилейной международной научно-технической конференций «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации». В сборник вошли материалы конференции, освещающие проблемы и новейшие технологии металлургического и горного оборудования, обработки металлов давлением, гидравлических машин, технологии машиностроения, охраны труда и экологии в машиностроении. Сборник адресован научным работникам, преподавателям, аспирантам, студентам, работникам промышленных предприятий, а также всем интересующимся проблемами в данных областях.

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов.

УДК 004 + 061 + 532 + 537 + 62 + 631 + 65 + 669 + 681

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА И СТАЛИ. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

<i>Кузин А. В., Ульяновцев Я. Э., Якимов Б. В.</i> К ВОПРОСУ О ПОВЕДЕНИИ КОКСОВОГО ОРЕШКА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	8
<i>Максаев Е. Н., Бойко А. С., Кислица В. В., Сомов С. А.</i> ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ ТОНКОГО НЕПРЕРЫВНОГО СЛЯБА.....	11
<i>Палто А. В., Насрединов В. Н.</i> ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МАРГАНЦЕВОГО АГЛОМЕРАТА	13
<i>Мирошниченко В. С., Гутько Ю. И., Голофаев А. Н.</i> ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	16
<i>Панченко Е. Б.</i> КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ АЗОТИРОВАНИЯ	20
<i>Куберский С. В., Проценко М. Ю., Красюк Д. В., Павлов А. В.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ	22
<i>Русанов И. Ф., Куберский С. В., Проценко М. Ю., Русанов А. Р.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	26
<i>Карпов А. В., Шмарин Д. С., Цымбал Т. В., Диментьев А. О.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОУГЛЯ В АГЛОДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	28
<i>Кузьминова С. Д., Гонтовая Н. В.</i> МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВА АГЛОМЕРАТА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА	31
<i>Куберский С. В., Великоцкий Р. Е., Должиков В. В.</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ НЕ ПРОШЕДШЕЙ ПРОТИВОФЛОКЕНОВУЮ ОБРАБОТКУ ТРУБНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ СТАРЕНИЯ	33
<i>Шубин Ю. П.</i> ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ДРЕВНЕГО МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА (ПО МАТЕРИАЛАМ КАРТАМЫШСКОГО АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОНБАССА).....	37
<i>Коробко Т. Б., Георгиаду М. В., Георгиадис Т.</i> ПОВЫШЕНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ	39
<i>Коробко Т. Б., Бондаренко А. И.</i> УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОСЕЙ	41
<i>Снитко С. А., Денищенко Н. П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРЕДЧИСТОВЫХ ОВАЛЬНЫХ РАСКАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ.....	43
<i>Руденко Е. А., Закарлюка С. В., Гончаров В. Е., Шевелев А. И.</i> «ПОДАВЛЕНИЕ» ДЕФЕКТОВ НЕПЛОСКОСТНОСТИ ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ	47
<i>Руденко Е. А., Закарлюка С. В., Гончаров В. Е.</i> СПОСОБ РАЗДАЧИ ШИРИНЫ ДЛИНОМЕРНЫХ СЛЯБОВ	50
<i>Руденко Е. А., Гончаров В. Е., Закарлюка С. В.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОКАТКИ ПОЛОС В ВАЛКАХ С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	53
<i>Кравцова С. И., Яковченко А. В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 20 НА БАЗЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОЧНЕННЫХ КОНСТАНТ ФОРМУЛ РАСЧЁТА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	56
<i>Денищенко П. Н., Шенишин А. А.</i> СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ	60

Чичкан А. А., Токарев А. В., Луцкий М. Б. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ С ПРОДОЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СТАНА «600» ФИЛИАЛА № 1 «АМК» ООО «ЮГМК».....	64
Рябичева Л. А., Коробко Т. Б., Королько В. В. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ	69
Рябичева Л. А., Дядичев А. В. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПЛОТНОСТЬ.....	71
Косьмина А. В., Митичкина Н. Г. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГОФРОВ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ.....	73
Гальцов И. А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	76
Горецкий Ю. В., Осипенко А. А. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ С ПОВЕРХНОСТИ ГОТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОРРОЗИИ В УСЛОВИЯХ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА «3000» ФИЛИАЛА № 1 «АМК» ООО «ЮГМК»	78
Коваленко О. А., Горецкий Ю. В., Сибилева В. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТИТНОЙ ФАЗЫ НА ЗАРОЖДЕНИЕ ЗЕРЕН АУСТЕНИТА В ПЛАСТИНЧАТОМ ПЕРЛИТЕ СТАЛИ	81
Полякова Д., Каунова С. А. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОЦЕССА ORIEN	83
Куберский С. В., Кучернюк А. И., Проценко М. Ю. ПОИСК ЭФФЕКТИВНЫХ ПУТЕЙ РЕЦИКЛИНГА ПЫЛИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ	86
Добров В. А. РАЗДУВКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПОЛЕЗНЫМ ОБЪЕМОМ 3000 м ³ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НЕЗАПЛАНИРОВАННОГО ПРОСТОЯ БЕЗ ВЫДУВКИ И СПУСКА НИЖЕЛЕТОЧНОГО ЧУГУНА.....	89
Анохина Е. А., Ланина Н. А. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ.....	90
Беляев В. В., Лисица И. Р. ХОЛОДНЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ РЕМОНТ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРОВ	93
Любименко В. С., Левченко А. Ю. ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБЛЕННЫХ Б/У ОГНЕУПОРОВ ПРИ РАЗДУВКЕ КОНЕЧНОГО КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА АЗОТОМ И ВО ВРЕМЯ ПРОДУВКИ ПЛАВКИ.....	96
ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	
Левченко Э. П., Зинченко А. М., Левченко О. А., Мальков С. Л. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЕМ КАЧЕСТВА ГОТОВОГО АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ДРОБИЛКАХ	98
Петров П. А., Изюмов Ю. В., Петров М. П. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВЫХ ПИЛ ГОРЯЧЕЙ РЕЗКИ СОРТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА	100
Петров П. А., Петров М. П., Медведев В. С. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ТРЕХМЕРНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	103
Ткачев М. Ю. НОВЫЕ ПОДХОДЫ В РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ СЛЯБОВЫХ МНЛЗ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	106
Сидоров В. А., Пичахчи А. В. ВЫБОР ТОЧЕК ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕДУКТОРОВ.....	107

<i>Левченко Э. П., Вишневецкий Д. А., Левченко О. А., Изюмов Ю. В.</i> ОСОБЕННОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДИСКОВЫХ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИН	111
<i>Еронько С. П., Ошовская Е. В., Понамарёва Е. А., Цыхмистро Е. С.</i> ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ КАТАПУЛЬТЫ ШИБЕРНОГО ЗАТВОРА СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНОГО КОВША	114
<i>Ушаков В. И., Саратовский Р. Н.</i> АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ	117
<i>Акимова О. И., Левченко Э. П.</i> ПРЕИМУЩЕСТВА РАСКАЛЫВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ ПРЯМЫМ СТЕСНЕННЫМ УДАРОМ	120
<i>Вишневецкий Д. А., Бондарь Н. А., Гайдар А. И.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ МЕТОДОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ	123
<i>Козлов Т. Р., Вишневецкий Д. А., Козачишен В. А.</i> ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КОНУСНОСТИ УЗКИХ ПЛИТ КРИСТАЛЛИЗАТОРА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ	127
<i>Сотников А. А., Пасечник С. Ю., Орлов А. А.</i> ПРАКТИКА ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	131
<i>Харламов Ю. А., Петров П. А., Мурга С. В.</i> РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ШАЙБОВОГО КАНТОВАТЕЛЯ	135
<i>Таровик А. Б., Желтобрюхова О. Е., Низмеев А. А.</i> КЛАССИФИКАЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ	138
<i>Кучма С. Н., Стародубов С. Ю.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	141
<i>Пипкин Ю. В., Зинченко А. М.</i> АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СТАНДАРТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В ОБЛАСТИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	144
<i>Пипкин Ю. В., Кучма С. Н.</i> АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СТАНДАРТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ	147
<i>Харитоненко А. А., Крупнов Я. Э.</i> РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	150
<i>Бревнов А. А., Бревнова О. В., Левченко Э. П.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ЛОПАТОК МАШИН РАЗГОННО-УДАРНОГО ТИПА	153
<i>Бочаров А. В., Непогожев Д. С.</i> ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОКРЫТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РОЛИКОВ НЕПРЕРЫВНО- ТРАВильНОГО АГРЕГАТА	155
<i>Бочаров А. В., Макаров А. О.</i> АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗМОЖНЫХ ОТКАЗОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ПРОСТОЮ АГРЕГАТА «ПЕЧЬ-КОВШ» ...	159
<i>Бочаров А. В., Зайцев С. Г.</i> ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ВЕНТИЛЯТОРА СТЕНДА ОТЖИГА КОЛПАКОВОЙ ПЕЧИ ЗА СЧЁТ ДОБАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ	162
<i>Зинченко А. М., Денисова Н. А., Кучма С.Н., Стародубов С. Ю.</i> СИЛА РЕЗАНИЯ КАК КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СИСТЕМУ «ИНСТРУМЕНТ — ДЕТАЛЬ»	165

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

<i>Чебан В. Г., Ковалинский Г. Н.</i> МЕМБРАННЫЙ АППАРАТ С ПЛОСКИМИ НАПОРНЫМИ КАНАЛАМИ	168
<i>Семина Д. А., Левашов А. Н., Ковалевский Д. С.</i> ВИХРЕКАМЕРНЫЕ НАГНЕТАТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ.....	171
<i>Левченко Э. П., Бойко Н. З., Ткачев Р. Ю., Бойко Е. А.</i> УПРАВЛЕНИЕ СЖИМАЮЩИМИ УСИЛИЯМИ НА МАТЕРИАЛ С ЭЛЕМЕНТАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ ТОЛКАТЕЛЕЙ ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ.....	174
<i>Геммерлинг О. А., Куфаев Д. О.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОКАЛИНЫ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	177
<i>Рутковский Ю. А., Рутковский А. Ю.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АСПИРАЦИИ ЛИТЕЙНОГО ДВОРА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	179
<i>Семина Д. А., Левашов Я. Н., Михайличенко А. А.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОТСАДОЧНЫХ МАШИН	181
<i>Рубежанский В. И., Чепурная Л. А.</i> СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ МИКРОСТРУКТУРНОЙ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ ГРАНИЦАМИ	183
<i>Пундик М. А.</i> О ВЛИЯНИИ ТРЕХФАКТОРНОГО ПАРАМЕТРА НА СКЗ ВИБРОУСКОРЕНИЕ ПРИ РАБОТЕ ГЕРМЕТИЧНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА	186
<i>Чебан В. Г., Павлиненко Е. И.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДА ДЛЯ МАЛОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	190
<i>Панов В. А., Черкасов А. А.</i> О ПРОЕКТИРОВАНИИ СОПЛА ГАЗОСТРУЙНЫХ АППАРАТОВ.....	193
<i>Бревнов А. А., Рязанова Ю. С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ЛАМИНАРИЗАЦИИ ПОТОКА... ..	194
<i>Головатенко Е. Л.</i> ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ СНИЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	197
<i>Тургенев И. А., Закрасовский Д. И.</i> ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СМАЗКИ КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ	199
<i>Байда Б. Ю.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОВОМПИМАННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ БРОСОВОЙ ТЕПЛОТЫ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	202
<i>Гайда А. С., Лысенко С. Г.</i> ПУТИ СНИЖЕНИЯ ШУМА ПРИ РАБОТЕ КОМБАЙНОВ.....	206
<i>Жижеккина Н. А., Тесля А. В., Тесля В. В., Василенко М. П.</i> АНАЛИЗ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С РОТОРАМИ (ВАЛАМИ), ВОССТАНОВЛЕННЫМИ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ	208
АВТОМАТИЗАЦИЯ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭЛЕКТРОНИКА	
<i>Бойко Н. З., Долгих В. П.</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА	211
<i>Филатов М. А., Левченко Э. П., Филатова Н. А., Макаревич А. Г.</i> СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	213
<i>Канчукова М. В.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ.....	215

Будков С. Ю. СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМА ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ ПОЛЕВОГО УРОВНЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ.....	218
Саратовский Р. Н., Ушаков В. И. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМ ПЛАВИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ НА ГП «ЛНПВК».....	220
Сергиенко С. Н., Юрьев С. А., Малюта Е. Р. ВОЗДУШНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РАЗРЯДНОГО КАНАЛА ПЛАЗМОТРОНА	223
Бажутин Д. В. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ТОЧЕК ЛИНЕАРИЗАЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ МОСТОВОГО КРАНА НА КАЧЕСТВО ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЕГО КОНСТРУКЦИИ..	226
Карпук И. А. РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, УПРАВЛЯЕМЫЙ ПО РОТОРУ, С ПОВЫШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ	229
Коцемир И. А., Овдей В. С. ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ФИКСИРОВАННОЙ ЧАСТОТЕ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ	231
Ткачев Р. Ю., Овдей В. С. О НЕКОТОРОМ ПРИКЛАДНОМ ПОДХОДЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА SP-ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ	233
Хамков А. А. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	236
Динкель О. А. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ДОПУСТИМЫХ НОРМ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	238
Захаров А. В., Розкаряка П. И., Мирошник Д. Н. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГИБРИДНОГО ИСТОЧНИКА «АККУМУЛЯТОРНАЯ БАТАРЕЯ-СУПЕРКОНДЕНСАТОР» ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ.....	241
Чаговец А. В., Ткачев Р. Ю. АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ КОЛЕБАНИЙ ОСНОВНОСТИ АГЛОМЕРАТА.....	244
Ткачев Р. Ю., Билан Г. А. СПОСОБ БАЙПАСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ УСТК.....	247
Ткачев Р. Ю., Денищик С. С. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ РЕАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ	250
Овдей В. С., Мишенин Н. А. ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК ПИ-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С БЛОКОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ	253
Верхола А. В., Коновалов С. А. ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ВАКУУМНЫХ КОНТАКТОРОВ.....	256
Бакаев О. В. МОНИТОРИНГ ИНТЕНСИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕСТРОЕК В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ ВПЕРЕДИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ.....	259
Бакаев О. В. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	262

УДК 669.162

Кузин А. В.
д.т.н., доц.,
Ульянцев Я. Э.
магистрант,
Якимов Б. В.
магистрант

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

К ВОПРОСУ О ПОВЕДЕНИИ КОКСОВОГО ОРЕШКА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Самой энергоёмкой стадией производства чёрных металлов является доменное производство. Как известно, эффективность производства чугуна в доменных печах определяется удельным расходом топлива. Стабилизация фракционного состава кокса и повышение его однородности обеспечивает улучшение работы доменной печи [1, 2].

Однако подготовка кокса по фракционному составу связана с повышенным количеством отсева кокса. Эта проблема решается путём выделения из отсева кокса мелкофракционного кокса (далее — коксовый орешек). В последние десятилетия на отечественных и зарубежных доменных печах начали широко использовать коксовый орешек, загружая его в смеси с железорудной частью шихты [3, 4]: расход коксового орешка варьируется от 10–30 до 100–150 кг/т чугуна.

В ряде случаев, при ухудшении работы доменной печи доменщики стараются выводить из состава шихты коксовый орешек, поскольку считают, что он, поступая в нижнюю часть печи, способствует загромождению горна. Однако до настоящего времени нет убедительных данных, позволяющих утверждать, какая доля коксового орешка поступает в горн печи. Оценку влияния расхода коксового орешка, загруженного в железорудную часть шихты, на перераспределение углерода для восстановления оксида железа, элементов чугуна и его науглероживание, выполнили с учётом удельной поверхности коксового орешка и кокса.

Общее количество углерода, расходуемое на прямое восстановление FeO , оценивали с учётом его прямого восстановления. Общее количество углерода, на прямое восстановление элементов чугуна и его науглероживание, оценивали по формуле [5]:

$$C^{rec+carb} = Od \cdot 0,75 + Cd_{el} + [C] \cdot 10, \text{ кг/т чугуна,}$$

где Od — количество кислорода, отнимаемого прямым путём, кг/т чугуна; Cd_{el} — количество углерода, расходуемое на восстановление кремния, марганца, фосфора и на ошлакование серы, кг/т чугуна; $[C]$ — содержание углерода в чугуне, %.

Количество углерода, расходуемое на восстановление кремния, марганца, фосфора и на ошлакование серы, определяли по формуле [5]:

$$Cd_{el} = \left(\frac{24}{28} \cdot [Si] + \frac{12}{55} \cdot [Mn] + \frac{5 \cdot 12}{2 \cdot 31} \cdot [P] \right) \cdot 10 + \frac{12}{32} \cdot \frac{(S)}{100} \cdot U, \text{ кг/т чугуна,}$$

где $[Si]$, $[Mn]$, $[P]$ — содержание кремния, марганца и фосфора в чугуне, %; (S) — содержание серы в шлаке, %; U — выход шлака, кг/т чугуна.

Количество углерода кокса и коксового орешка, расходуемое на прямое восстановление оксида железа, восстановление элементов чугуна и его науглероживание определяли с учётом их общей поверхности. Определяли также приход углерода с коксом и коксовым орешком. Если по результатам расчёта получали, что количество пришедшего углерода с

коксовым орешком не превышает количество углерода коксового орешка, расходуемое на прямое восстановление оксида железа, восстановление элементов чугуна и его науглероживание, то исходили из предположения, что весь загруженный коксовый орешек полностью расходуется и не доходит до воздушных фурм доменной печи. В противном случае количество углерода коксового орешка, дошедшего до фурм, оценивали с учётом разницы количества пришедшего углерода с коксовым орешком и количества углерода коксового орешка, потраченного на прямое восстановление оксида железа, восстановление элементов чугуна и его науглероживание.

В качестве исходных использовали данные о работе доменных печей с применением технологии вдувания пылеугольного топлива и различным расходом коксового орешка, выполнен расчёт материально-теплового баланса по этим данным. Из расчётов следует, что при использовании качественной шихты и расходе коксового орешка 30,6 и 169,3 кг/т чугуна полезный расход тепла составил 91,2 и 92,4 % соответственно. Для оценки влияния введения коксового орешка на долю прихода кокса на фурмы использовали данные об удельной поверхности кокса и коксового орешка со средними значениями диаметра 55 и 20 мм соответственно (рис. 1).

Расчеты показывают, что повышение в шихте количества коксового орешка с 20 до 169,3 кг/т чугуна (доля коксового орешка ко всему загруженному топливу колебалась от 4,6 до 55,5 %) способствует перераспределению функции восстановления FeO и элементов чугуна и науглероживанию чугуна преимущественно к углероду коксового орешка. Так, например, несмотря на сохранение общего расхода углерода (около 145 кг/т чугуна), количество углерода кокса при данных процессах снизилось с 130 до 35 кг/т чугуна, в то время как количество углерода коксового орешка повысилось с 15 до 110 кг/т чугуна. При этом повысилась доля дошедшего до фурм углерода кокса с 54 до 75 % (на 21 % абс.). Данные изменения означают, что скиповый кокс подвергается меньшему воздействию агрессивной газовой среды, химических, термических и др. процессов в шахте печи. Это неизбежно будет способствовать меньшему разрушению и окислению в печи скипового кокса, поступлению его в горн с качественно более высокими и близкими показателями по отношению к загружаемому коксу. По существу, это означает значительное повышение качества кокса в горне доменной печи, что, естественно, благоприятно скажется на её работе.

Из расчётов также следует, что при загрузке коксового орешка в железорудную часть шихты в количестве до 100 кг/т чугуна, приход его в горн не превышает 6 кг/т чугуна. Данное обстоятельство свидетельствует о практически полном расходе коксового орешка (при его расходе менее 100 кг/т чугуна) при реакциях восстановления и науглероживания чугуна до уровня воздушных фурм.

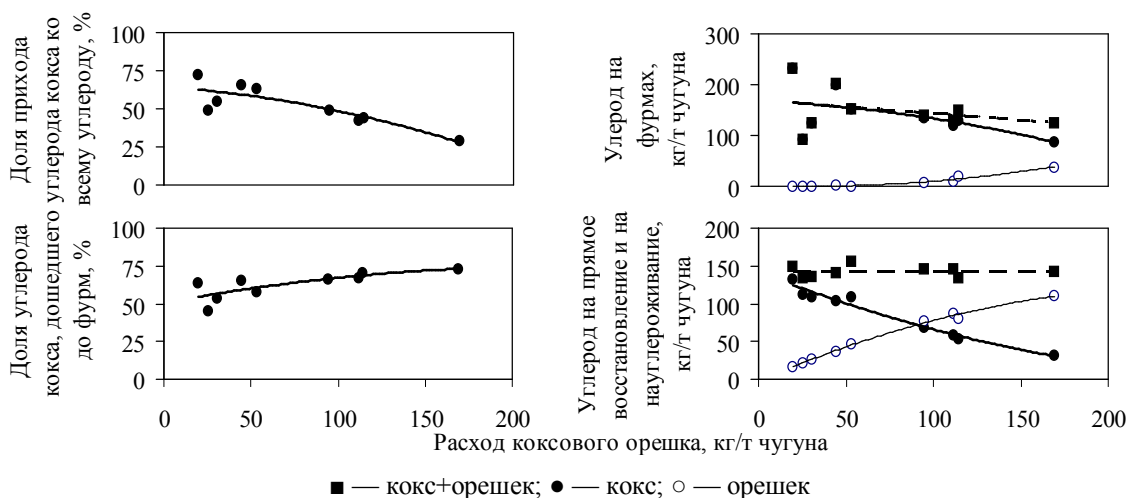


Рисунок 1 — Влияние введения коксового орешка на основные показатели доменной плавки

Эффективные компенсирующие мероприятия способствовали качественному улучшению ТЭП: при расходе коксового орешка 169,3 кг/т чугуна расход ПУТ составил 182 кг/т чугуна, а расход кокса скипового — 136 кг/т чугуна при незначительном снижении производительности печи. При этом, доля углерода, загруженного в печь с коксом, по отношению к общему его приходу с коксом, коксовым орешком и ПУТ снизилась до 30 %. Реализация описанной выше технологии создает предпосылки для повышения расхода ПУТ до 200 кг/т чугуна и выше и введения коксового орешка в количестве до 100–150 кг/т чугуна, снижения расхода скипового кокса до 100–200 кг/т чугуна, сохранения на базовом уровне или повышения производительности печей и качества чугуна.

Следует отметить, поскольку в доменной печи имеется слоевое распределение шихты, полностью изолировать контакт железорудных материалов с кусками кокса не представляется возможным. Кроме того, расчёт по предложенной методике выполнен при условии качественного перемешивания коксового орешка с железорудной частью шихты. В связи с этим в данной методике имеется возможность учесть данный фактор при применении различных схем шихтоподачи и использовании разных типов загрузочных устройств.

Реализация введения коксового орешка в доменную шихту возможна в реальных условиях доменных цехов, при использовании имеющегося кокса и железорудных материалов. Повышенный расход коксового орешка в шихте доменных печей может быть обеспечен за счёт покупного, производимого в значительных количествах современными коксохимическими заводами, и производимого в доменном цехе орешка, а также за счёт кокса специально производимого для изготовления коксового орешка из наименее ценных марок углей. Безусловно, реализация данного проекта потребует значительных капитальных вложений в коксохимические и металлургические предприятия. Однако, решение задачи по снижению расхода скипового кокса до 100–200 кг/т чугуна при современном уровне подготовки шихтовых материалов обеспечит окупаемость мероприятия в течение короткого времени, позволит качественно обновить отрасль, улучшить экологическую обстановку в промышленных регионах страны и др.

Таким образом, предложена методика оценки прихода коксового орешка в горн доменной печи, учитывающая удельную поверхность загруженных топлив, восстановление элементов и науглероживание чугуна. Показано, что введение коксового орешка в железорудную часть шихты в количестве от 20 до 169,3 кг/т чугуна способствует снижению участия углерода кокса с 130 до 35 кг/т чугуна при одновременном повышении участия углерода коксового орешка с 15 до 110 кг/т чугуна. Кроме того, это позволяет повысить долю углерода кокса, дошедшего до фурм с 54 до 75 % при использовании технологии пылевдувания. Усовершенствованы представления о поведении коксового орешка в доменной печи. Аналитически показано, что при загрузке коксового орешка в железорудную часть шихты в количестве до 100 кг/т чугуна приход его на фурмы не превышает 6 кг/т чугуна. Данное обстоятельство свидетельствует о практически полном расходовании коксового орешка при протекании реакции восстановления и науглероживания чугуна до уровня воздушных фурм.

Список литературы

1. Kuzin, A. V. Experience in coke preparation for blast-furnace smelting. Part 1 / A. V. Kuzin, N. S. Khlaponin // Metallurgist. — 2019. — Vol. 63. — Iss. 1–2. — P. 3–10.
2. Kuzin, A. V. Experience in coke preparation for blast-furnace smelting. Part 2 / A. V. Kuzin, N. S. Khlaponin // Metallurgist. — 2019. — Vol. 63. — Iss. 1–2. — P. 123–130.
3. Ухмылова, Г. С. Требования к качеству кокса для эффективной работы доменной печи с высоким расходом пылеугольного топлива // Кокс и химия. — 1993. — № 9–10. — С. 24–29.
4. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке / В. Г. Гусак, А. М. Кузнецов, А. В. Емченко [и др.]. — Киев : Наукова думка, 2011. — 216 с.
5. Готлиб, А. Д. Доменный процесс. — М. : Металлургия, 1966. — 503 с.

Максаев Е. Н.

главный специалист,

Бойко А. С.

главный специалист,

Кислица В. В.

к.т.н., начальник управления,

Сомов С. А.

начальник отдела

АО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса, РФ

ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ ТОНКОГО НЕПРЕРЫВНОГО СЛЯБА

Технология производства рулонного проката в условиях литейно-прокатных комплексов (ЛПК) успешно развивается со второй половины 80-х годов прошлого столетия. При совмещении процессов литья и прокатки исключены возможности промежуточной операции устранения дефектов сляба перед отдачей в прокатное производство. В связи с этим на тонкослябовые машины непрерывного литья заготовок (ТМНЛЗ) возлагаются особые требования, гарантирующие соответствующий уровень качества сляба, который задается в прокатный стан, минуя процесс остывания. С другой стороны, для эффективной работы ЛПК на ТМНЛЗ возложена задача обеспечения производительности, которая должна конкурировать с производительностью толстослябовых МНЛЗ.

В условиях действующего производства ЛПК АО «ВМЗ» за последние 4 года выполнен ряд реконструкций ТМНЛЗ для увеличения производительности и улучшения качественных показателей сляба. [1] Одной из главных задач в этом направлении было улучшение макроструктуры сляба для условий высокоскоростной разливки. Характерные для данных условий нарушения в макроструктуре в виде гнездообразных трещин, осевой пористости и осевой неоднородности, способны трансформироваться в дефекты проката и приводить к значительным потерям выхода годной продукции. Указанные дефекты имеют разную природу образования и требуют соответствующих контрмер для улучшения внутреннего качества сляба.

Модернизация роликовой проводки ТМНЛЗ, при которой были сокращены расстояния между роликами сегментов за счет уменьшения их диаметра, стала ключевым мероприятием по снижению вероятности образования гнездообразных трещин за счет снижения эффекта межроликового выпучивания для условий разливки с высокой линейной скоростью [2].

Осевая пористость и осевая химическая неоднородность являются неотъемлемой частью усадочных процессов, сопровождающих затвердевание непрерывнолитой заготовки. Механическое обжатие непрерывнолитой заготовки в участке затвердевания позволяет снижать осевые усадочные дефекты путем разрушения кристаллических перемычек и выдавливания жидкого раствора из осевой зоны, повышая ее плотность и однородность [3]. Мягкое обжатие непрерывнолитой заготовки в роликовых сегментах современных МНЛЗ осуществляется с помощью гидравлических цилиндров, управляемых в динамическом режиме системой автоматизации. Эффективность процесса обжатия зависит от корректности определения участка затвердевания с оптимальным соотношением твердой и жидкой фазы, а также интенсивности деформационного воздействия. Реконструкция ТМНЛЗ по увеличению металлургической длины с внедрением современных программ автоматизации, а также новых режимов вторичного охлаждения и мягкого обжатия позволили глобально усовершенствовать технологию разливки тонкого сляба. Точность расчета модели затвердевания в новой концепции динамического управления режимами охлаждения и обжатия достигается работой прикладных программ Q [1, 4].

Система Q-Cool оптимизирует условия вторичного охлаждения в соответствии с теплофизическими расчетами модели затвердевания. Согласно координатам изотерм начала и

окончания затвердевания, система Q-Core обеспечивает управление в динамическом режиме параметрами обжата непрерывнолитой заготовки с помощью гидравлических цилиндров. При этом интенсивность обжата корректируется в зависимости от положения участка затвердевания в сегменте. Верификация расчетных данных модели затвердевания осуществляется физической проверкой глубины жидкой фазы в разливаемой непрерывнолитой заготовке с помощью уникальной программы Q-Pulse. Алгоритм Q-Pulse работает в следующем порядке. Гидравлические цилиндры сегмента создают низкочастотное колебательное воздействие через роликтовую проводку на локальный участок поверхности непрерывнолитой заготовки. От области воздействия частотного импульса при наличии жидкой фазы в объеме непрерывнолитой заготовки передаются минимальные ответные колебания на уровень мениска жидкой стали в кристаллизаторе, фиксируемые изотопным датчиком. Характеристики сгенерированных и ответных колебаний анализируются системой при помощи быстрого преобразования Фурье на основании, которого выводятся данные о наличии или отсутствии жидкого металла в исследуемой позиции ручья.

Выполненные технические и технологические мероприятия обеспечили улучшение внутреннего качества сляба в условиях высокоскоростной разливки, способствовали увеличению темпа производства проката для трубной продукции ответственного назначения, в том числе, эксплуатируемой в низкотемпературных условиях.

Список литературы

1. Повышение производительности литейно-прокатного комплекса / В. В. Кислица, Е. Н. Максаев, А. С. Бойко, Е. А. Солдатов, Е. Л. Ворожева // *Металлург*. — 2022. — № 4. — С. 18–25.
2. Условия для увеличения производительности МНЛЗ без снижения качественных показателей / В. В. Кислица, Е. Л. Ворожева, В. Н. Лавров, А. С. Бойко, Е. Н. Максаев // *Сталь*. — 2021. — № 5. — С. 8–10.
3. Паршин, В. М. Непрерывная разливка стали / В. М. Паршин, Л. В. Буланов. — Липецк : ОАО «НЛМК». — 2011. — 97 с.
4. Danieli модернизирует МНЛЗ ОМК [Электронный ресурс] // Информация Международной промышленной выставки «Металл-Экспо 2020». — Режим доступа: <https://www.metal-expo.ru/en/news/3975>.

Палто А. В.
магистрант, начальник доменной группы аглодоменной лаборатории ЦЛК,
Насредин В. Н.
магистрант, начальник аглодоменной лаборатории ЦЛК
Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МАРГАНЦЕВОГО АГЛОМЕРАТА

Применение в доменной плавке кокса с низкой механической прочностью, повышенной трещиноватостью и истираемостью, сопровождается разрушением в доменной печи с образованием мелкой фракции. Это приводит к снижению текучести доменных шлаков и является одной из причин неровного хода печи, повышения сопротивления столба материалов проходу газа, загромождения горна и, как следствие, снижения производительности, повышения расхода кокса и прогар воздушных фурм. Вредное влияние коксовой мелочи усугубляется в условиях работы доменных печей на офлюсованном и магнизиальном агломерате. Известно, что в зонах горения кокса в горне и заплечиках, повышенное содержание закиси марганца приводит к уменьшению содержания коксовой мелочи в шлаке, повышению его жидкотекучести и газопроницаемости столба материалов [1].

Для очистки горна от мелких частиц кокса и графита, смешанных со шлаком, а так же повышения производительности печи, производятся технологические промывки марганец содержащим сырьем. Образующиеся шлаки характеризуются повышенной жидкотекучестью и низкой температурой плавления [2]. Для этого непосредственно в доменную печь производят загрузку марганцевой руды. Фракционный состав материалов, загружаемых в доменную печь, ограничен крупностью в пределах 20–60 мм, для обеспечения низкого сопротивления газовому потоку и ровному сходу шихты. Химический анализ марганцевой руды представлен в таблице 1.

На предприятии появилась возможность использования для промывки горна доменных печей марганцевого концентрата, с химическим составом, представленным в таблицах 2 и 3. Однако данный концентрат обладает повышенным содержанием фракции менее 10 мм (табл. 4). При загрузке его непосредственно в доменную печь, возможно, ухудшение газодинамики доменной плавки, увеличение выноса колошниковой пыли и нарушение хода печи.

Таблица 1 — Химический анализ марганцевой руды, % мас.

Компонент	Mn	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	S	P	MgO	Al ₂ O ₃	CaO
Содержание	15,2	19,0	19,5	0,01	0,04	2,11	2,18	20,0

Таблица 2 — Химический анализ марганцевого концентрата (данные сертификата), % мас.

Компонент	Mn	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO ₂
Содержание	41,75	3,95	7,44	0,05	11,17	0,05	0,16	66,07

Таблица 3 — Контрольный анализ марганцевого концентрата (данные лаборатории комбината), % мас.

Компонент	Mn	SiO ₂	CaO	ППП
Содержание	40,30	8,30	0,48	13,70

Таблица 4 — Фракционный состав марганцевого концентрата

Фракция, мм	–1	1–5	5–10	10–14	14–20	+20
Рассев, %	11,5	7,6	28,2	6,4	12,8	33,3

Для улучшения работы доменной печи и предотвращения перерасхода кокса, используемые марганцевые руды и концентраты целесообразно предварительно спекать в агломерационном цехе. В процессе агломерации обеспечивается переход высших трудновосстановимых окислов марганца в низшие: при высокой температуре процесса MnO_2 и Mn_2O_3 в атмосфере газовой фазы переходят в MnO [3].

При производстве агломерата из марганцевых руд и концентратов, важнейшей минералогической составляющей является пиролюзит (MnO_2), который легко диссоциирует еще в зоне подогрева (>400 °С). Образующийся браунит (Mn_2O_3) также диссоциирует и восстанавливается в зоне подогрева шихты и в зоне горения топлива. В твердой фазе гаусманит (Mn_3O_4) и манганозит образуют на контактах с кремнеземом ортосиликат марганца, плавящийся затем при температуре 1323 °С [4], что сопровождается перерасходом топлива и снижением скорости агломашин для равномерного спека слоя шихты.

На агломашине №6 было произведено спекание марганцевого концентрата в составе железорудной части шихты. Спекание производилось в течение 7 часов. Расходные коэффициенты на 1 т агломерата составили: 1,645 т Mn концентрата и 0,065 т топлива. Режим работы агломашин до производства марганцевого агломерата и во время спекания приведены в таблице 5.

Из приведенного режима работы видно, что производительность агломашин была снижена на 33,2 %, что обусловлено снижением фильтрующей способности спекаемого слоя из-за отсутствия окомкования в барабане вторичного смешивания (БВС), в сравнении с работой агломашин на железорудной шихте. Подогрев марганцевой шихты в БВС не производился из-за отсутствия технологической необходимости.

В результате спекания было произведено 210,45 тонн марганцевого агломерата с производительностью 29,7 т/ч (удельная производительность — 0,35 т/м²ч). Химический анализ и прочностные характеристики марганцевого агломерата представлен в таблице 6 и 7 соответственно.

Произведен расчет материального баланса при производстве марганцевого агломерата по контрольным химическим анализам сырья и конечного агломерата (табл. 8).

Таблица 5 — Режим работы агломашин № 6

Дата	Вид агломерата	Скорость аглоленты	Разрежение	Высота слоя	Температура горна	Температура коллектора	Вертикальная скорость спекания
		м/мин	мм вод.ст.	мм	°С	°С	мм/мин
16.01.2020	Железорудный	1,70	739	330	1227	111	18,7
17.01.2020	Марганцевый	1,14	627	330	1216	108	12,5

Таблица 6 — Химический состав марганцевого агломерата, % мас.

Компонент	Mn	CaO	SiO ₂	MgO	Fe
Содержание	32,30	9,0	8,90	0,63	20,0

Таблица 7 — Прочностные характеристики марганцевого агломерата

Рассев	Фракция	Кол-во
Горячий агломерат	<5 мм	3,0 %
Холодный агломерат после 2-х суток остывания		3,1 %
Холодный агломерат после перегрузки в ДЦ		3,8 %
Холодный агломерат после перегрузки на перевеску		40,5 %
Барабанная проба	Удар	Истирание
Горячий агломерат	87,0 %	3,0 %
Холодный агломерат	70,2 %	9,3 %

Таблица 8 — Материальный баланс при производстве марганцевого агломерата

Материал	Приход					Перешло в агломерат	
	Вес влажн.	Влага		ППП			
	т	%	т	%	т	т	%
Мп руда	342,50	17,60	60,28	13,70	46,92	235,30	68,70
Топливо	22,26	7,20	1,60	84,0	18,70	1,96	8,80
Итого	364,76	17,0	61,88	18,0	65,62	237,26	65,10

Всего потери составили: 127,5 т или 34,9 %. Невязка материального баланса составила: 11,3 % или 26,8 т. Невязка обусловлена просыпью шихты на агломерационной машине и потерями при последующей транспортировке готового агломерата к бункерам доменного цеха.

Вывод: опытно-промышленное спекание марганцевого концентрата показало возможность производства марганцевого агломерата в условиях АГЦ Филиала №1 «АМК» ООО «ЮГМК» с удовлетворительными прочностными характеристиками. Физико-химические свойства марганцевого агломерата позволяют использовать его для промывки горна доменных печей от коксового «мусора». Считаю целесообразным, продолжить опытные спекания данного материала и провести дальнейшие исследования по использованию марганцевого агломерата в доменной печи для окончательного определения его эффективности.

Список литературы

1. Старшинов, Б. Н. О влиянии коксовой мелочи на физические свойства шлаков в доменной печи / Б. Н. Старшинов, В. Д. Синицкий // Шлаковый режим доменных печей : сборник научных трудов. — М. : Metallurgia, 1967. — 216 с.
2. Руднева, А. В. О ходе процессов восстановления и шлакообразования при доменной плавке марганцевых руд / А. В. Руднева // Шлаковый режим доменных печей : сборник научных трудов. — М. : Metallurgia, 1967. — 99 с.
3. Готлиб, А. Д. Доменный процесс / А. Д. Готлиб. — 2-е изд. — М. : Metallurgia, 1966. — 176 с.
4. Вегман, Е. Ф. Теория и технология агломерации / Е. Ф. Вегман. — М. : Metallurgia, 1974. — 173 с.

Мирошниченко В. С.
аспирант,
Гутько Ю. И.
д.т.н., профессор,
Голофаев А. Н.
к.т.н., доцент

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Цифровые технологии занимают особое место в любой сфере. Как повседневной жизни, так и научной деятельности. Литейное производство не является исключением. Целые комплексы программ значительно облегчают разработку и усовершенствования параметров литья. К примеру, программы для создания САД-моделей являются неотъемлемой частью любого производства. А программы инженерного анализа — САЕ, помогают значительно снизить процент брака или же вовсе, добиться полного его отсутствия. Хотя в современных пакетах 3D-проектирования имеются в той или иной степени элементы компьютерного анализа литья, что позволяет избежать грубых ошибок в технологичности конструкции детали, но прогнозировать ее качество возможно при тщательном внесении технологических параметров в специализированный пакет программ (САЕ). Таких программ сейчас довольно много в широком диапазоне цен. Но даже самые лучшие (и дорогие) из них гарантируют прогноз с точностью около 90 %. Подтвердить эти теоретические 90 % и определить самые интересные последние 10 % приходится уже после изготовления оснастки в процессе экспериментов [1].

Целью данной работы является исследование дефектов в отливке тормоза БелАЗа при помощи компьютерного моделирования и разработка рекомендаций по их снижению.

Корпус тормоза БелАЗа (7555А), деталь ответственного назначения, так как она будет работать в условиях повышенных нагрузок и высокого трения. Масса корпуса 104 кг, габаритные размеры 501×285×264 мм. Твердость должна быть в пределах от 187 до 241 НВ (по Бринеллю) [2]. Внешний вид отливки показан на рисунке 1, выполненный в программе SolidWorks 2016.

При изготовлении данной отливки возникают различные виды брака, это связано со сложной конструкцией корпуса и большим весом отливки. Для более наглядного решения поставленной задачи была построена 3D-модель отливки в программе SolidWorks 2016 [3], а затем проводилось моделирование в программе LVMFLOW [4]. Литейная форма принималась, как виртуальная для сокращения времени расчетов. Было промоделировано три различных варианта отливки. Полученная расчетная модель первого варианта показана на рисунке 2.

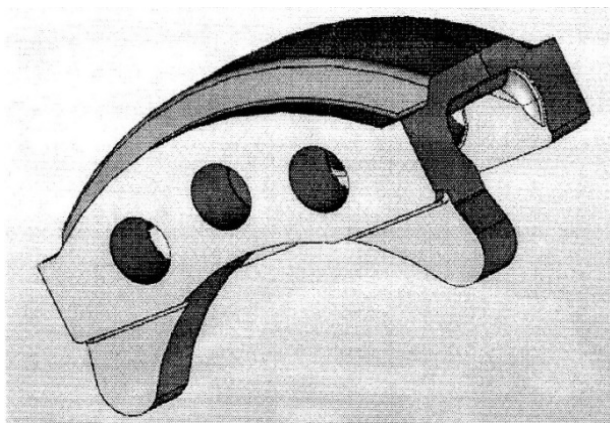


Рисунок 1 — 3D-модель детали

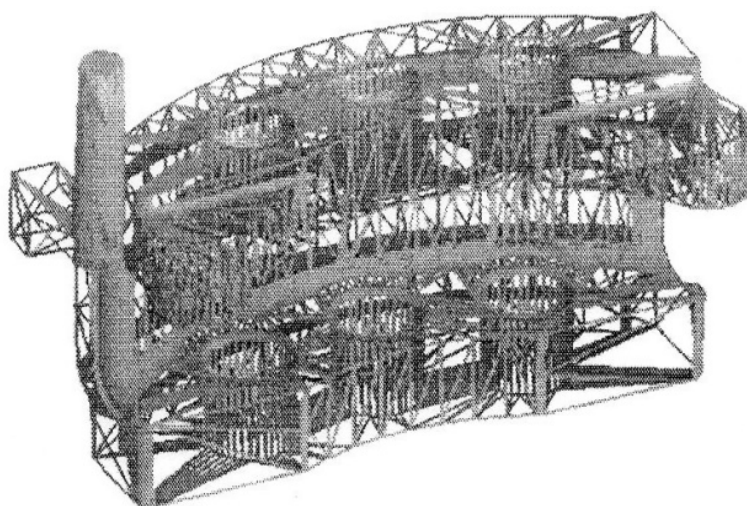


Рисунок 2 — Расчетная сеточная модель первого варианта отливки

В начале эксперимента была выбрана боковая литниково-питающая система (ЛПС), как самая простая и оптимальная для данного вида отливки (рис. 2).

На рисунке 3 видно, что усадочные раковины в верхней части отливки приводят к неисправимому браку. В связи с этим было принято решение изменить поверхность разъема и положение отливки при заливке. Второй вариант расчетной модели показан на рисунке 4.

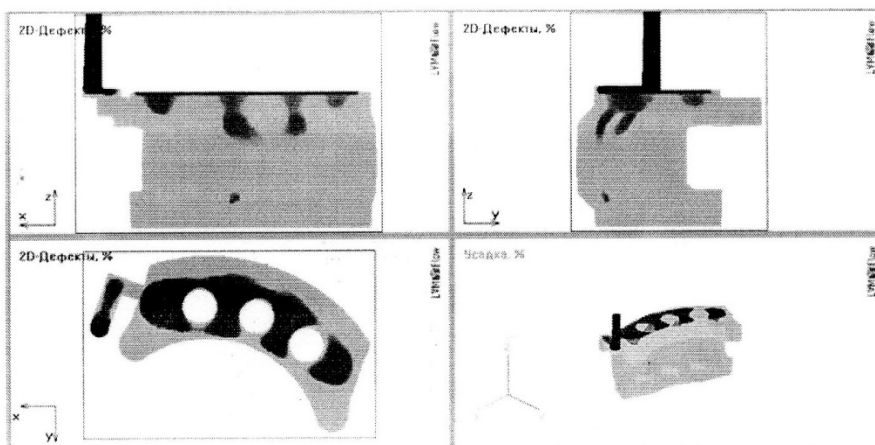


Рисунок 3 — Дефекты отливки при моделировании заливки первого варианта

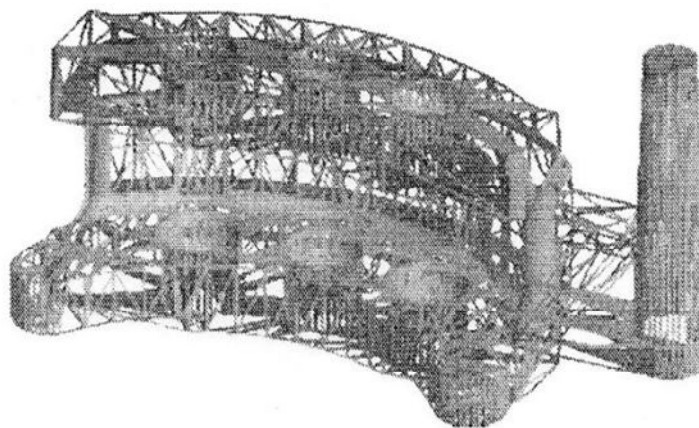


Рисунок 4 — Расчетная сеточная модель второго варианта отливки

Данный вариант заливки значительно уменьшает количество усадочных дефектов, но не решает поставленную задачу по получению бездефектной отливки. Данное утверждение подтверждает рисунок 5.

Для устранения всех дефектов было принято решение добавить питающую бобышку и поставить на термический узел прибыль. Расчетная модель третьего варианта и дефекты показаны на рисунках 6 и 7 соответственно.

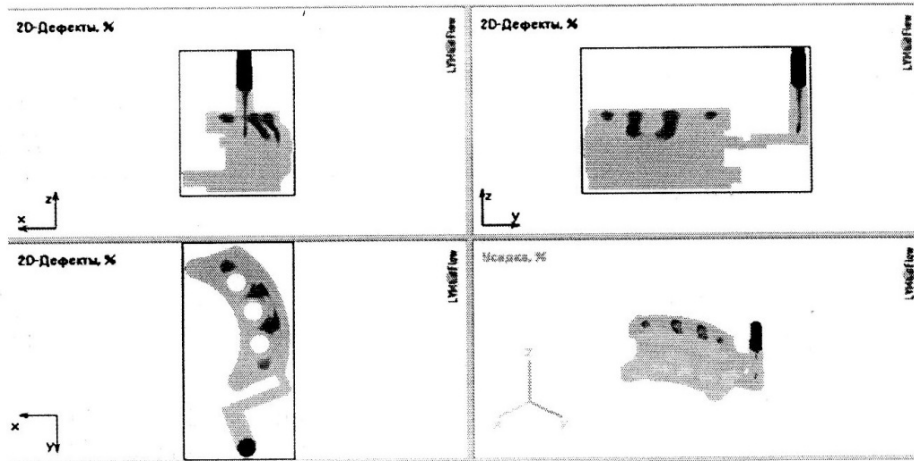


Рисунок 5 — Дефекты отливки при моделировании заливки второго варианта

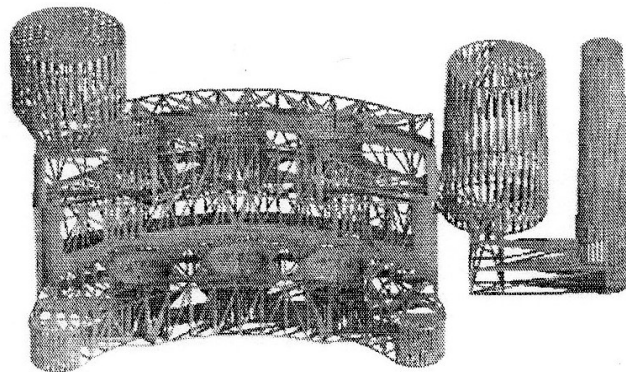


Рисунок 6 — Расчетная сеточная модель третьего варианта отливки

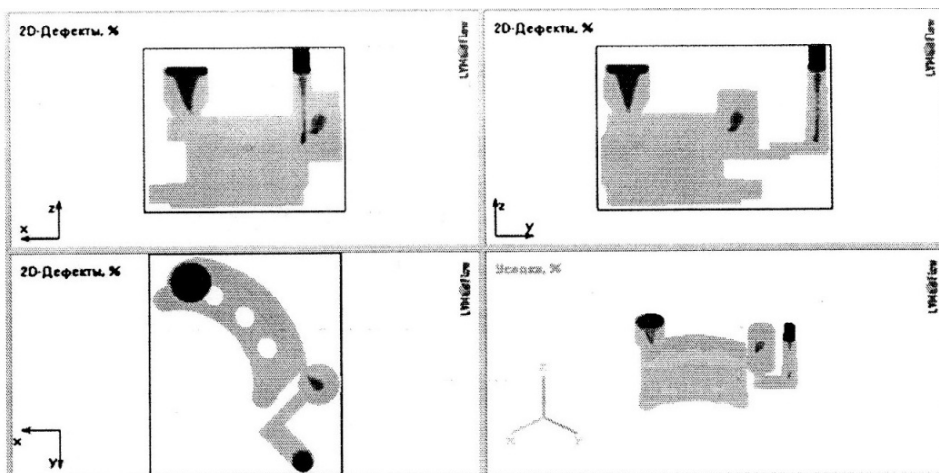


Рисунок 7 — Дефекты отливки при моделировании заливки третьего варианта

В результате виртуального моделирования технологических параметров литья отливки корпуса тормоза для БелАЗа было определено: оптимальное положение отливки при заливке, тип ЛПС, место расположения и необходимость прибыли и питающей бобышки, что позволило без дорогостоящих натуральных экспериментов ликвидировать дефекты в отливке.

Для снижения количества брака в отливке корпус тормоза для БелАЗа рекомендуется:

– при получении брака «усадочная раковина», необходимо установить прибыль на термическом узле;

– при получении брака «засоры», необходимо изменить конструкцию литниковой системы, путем установки питающей бобышки [5].

Список литературы

1. Манжула, Г. П. Цифровые технологии в производстве литых заготовок металлических деталей / Г. П. Манжула // Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь : материалы Международной научно-технической конференции. — Минск, 2017. — С. 150–157.

2. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. — Введ. 1981-07-01. — М. : Изд-во стандартов, 1980. — 15 с.

3. Дударева, Н. Ю. Самоучитель SolidWorks 2007 / Н. Ю. Дударева, С. А. Зайко. — СПб. : БХВ, 2011. — 416 с.

4. Моделирование литейных процессов [Электронный ресурс]. — Воронеж: ООО «НПО „ПроМодель“». — Режим доступа: <http://www.lvmflow.ru> (17.09.2022).

5. Гурьев, А. М. Контроль качества отливок в машиностроении / А. М. Гурьев, В. А. Марков. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. — 280 с.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ АЗОТИРОВАНИЯ

Азотирование представляет собой способ химико-термической обработки, заключающийся в насыщении поверхности стальной детали азотом.

Азотирование было впервые предложено еще в начале 20 века академиком Н. П. Чижевским [1]. С тех пор и по настоящее время, такая обработка активно развивалась и может осуществляться различными методами.

Если перед исследователем ставится задача, решаемая с помощью азотирования, то требуется уточнение способа проведения процесса. Ведь азотирование может выполняться с помощью различных технологических приемов, которые также требуют использование различного оборудования. Целью данной работы является структурированное изложение разных методов и способов азотирования. Лучшим способом представления такой информации является классификация. Ниже представлены восемь классификационных признаков, по которым можно подобрать наиболее подходящую методику для конкретной задачи.

Первый классифицирующий признак — среда азотирования. Согласно этому различают:

– газовое азотирование, которое в основном проводят в атмосфере частично диссоциированного аммиака со степенью диссоциации 20–60 %, смешанного с азотом, кислородом и различными углеродсодержащими газами;

– жидкостное азотирование, которое выполняется в расплавах солей, содержащих азот, например, нитрат натрия NaNO_3 , нитрат калия KNO_3 , нитрит натрия Na_2NO_2 ; также это могут быть соли, содержащие цианистую группу (цианистый калий KCN , цианистый натрий NaCN , железстосинеродистый калий $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$);

– порошковое азотирование, которое осуществляется в азотосодержащих порошках, чаще всего применяют древесный уголь в смеси с желтой кровяной солью $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ или цианамид натрия CaCN_2 с добавками активаторов;

– ионное или ионно-плазменное азотирование, которое проводится в плазме тлеющего разряда в газовой среде, содержащей азот; процесс отличается от обычного газового азотирования тем, что диффузия ионов азота интенсифицируется действием электрического поля, вызываемого электрическим разрядом [2, 3].

Вторым классифицирующим признаком является диффундирующий элемент:

– азотирование, во время которого поверхность насыщается только азотом;

– карбоазотирование или углеродоазотирование, при котором происходит одновременное насыщение углеродом и азотом;

– оксиазотирование, при котором вместе с азотом диффундирует кислород;

– оксикарбоазотирование или оксиуглеродоазотирование, во время которого поверхность насыщается кислородом, углеродом и азотом.

Третьим классифицирующим признаком является температура процесса:

– низкотемпературное азотирование проводится при температуре ниже точки A_1 в системе железо-азот;

– среднетемпературное, проводимое при температуре выше точки A_1 в системе железо-азот, но ниже точки A_1 в системе железо-углерод;

– высокотемпературное, проводимое при температуре выше точки A_1 в системе железо-углерод.

Четвертый классифицирующий признак разделяет процессы по давлению, при котором они проходят:

– азотирование при повышенном давлении;

– азотирование при пониженном давлении;

– азотирование при пульсирующем давлении.

Пятый классификационный признак — структура получаемых слоев на поверхности стали:

– получение композиционного слоя, при котором на поверхности образуется нитридная зона ϵ - и γ' -фазы, ниже располагается диффузионный подслой, состоящий из α -фазы, избыточной γ' -фазы, специальных нитридов и карбидов (карбонитридов);

– внутренне азотирование, в результате которого образуется только диффузионный подслой – $\alpha + \gamma' + MN(M_2N)$ фазы + карбиды (карбонитриды);

– антикоррозионное во время, которого образуется беспористая плотная поверхностная нитридная ϵ -фаза или оксикарбонитридная зона (Fe, M) (N, C, O) [4].

Шестой классифицирующий признак разделяет комбинированные процессы:

– азотирование с последующей закалкой;

– азотирование с последующей закалкой при нагреве токами высокой частоты или лазером;

– азотирование и механическое упрочнение поверхностной пластической деформацией;

– азотирование и последующее оксидирование;

– цементация с последующим азотированием.

Седьмым классифицирующим признаком является способ подвода энергии:

– нагрев за счет конвекции;

– нагрев излучением;

– нагрев с помощью низкотемпературной плазмы;

– индукционный электронный и лазерный нагрев.

Восьмым классифицирующий признак разделяет способы азотирования по типу нагревательного устройства:

– азотирование в камерных печах;

– азотирование в шахтных печах;

– азотирование в тигельных печах;

– азотирование в других типах нагревательных устройств [5].

Не исключено, что приведенные выше способы классификации не учли всего многообразия факторов, по которым можно разделять методы азотирования, однако уже позволяют в большинстве случаев выбрать наиболее подходящий набор технологических приемов для конкретной задачи.

Список литературы

1. Академик Чижевский Н. П. Избранные труды. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. И. П. Бардина. — М. : АН СССР, 1958. — 439 с.

2. Ионная обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. — М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. — 398 с.

3. Рамазанов, К. Н. Исследование структурно-фазовых превращений и свойств поверхностных слоев сталей при ионном азотировании в тлеющем разряде низкого давления / К. Н. Рамазанов. — Уфа : УГАТУ, 2015.

4. Теория и технология азотирования : монография / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. Шпис, З. Бемер. — М. : Металлургия, 1991. — 320 с.

5. Эффективность азотирования конструкционных сталей / Л. И. Куксенова, С. А. Герасимов, В. Г. Лаптева и др. — М. : Институт машиноведения им. А. А. Благонравова, 2011.

Куберский С. В.
к.т.н., профессор,
Проценко М. Ю.
к.т.н., доцент,
Красюк Д. В.
магистрант,
Павлов А. В.
магистрант

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Одним из основных условий формирования качественного непрерывнолитого слитка, является работа шлакообразующей смеси (ШОС) на мениске жидкой стали и в зазоре между формирующейся заготовкой и рабочей стенкой кристаллизатора. Используемые в кристаллизаторе ШОС обеспечивают смазку контактирующих поверхностей и позволяют регулировать теплоотвод на участке жидкая сталь — корка слитка — ШОС — стенка кристаллизатора — охлаждающая вода. Использование ШОС либо жидких смазок позволило значительно уменьшить количество подвисаний заготовок в кристаллизаторе, а, следовательно, и вероятность образования прорывов. Большинство прорывов, не связанных с прямым нарушением технологии и состоянием оборудования МНЛЗ, относятся к так называемым «шлаковым» прорывам [1]. В процессе непрерывной разливки в зазор между формирующейся стальной корочкой и стенками кристаллизатора, благодаря вертикальным его качаниям, вовлекается расплавленный шлак, обеспечивающий смазку и препятствующий прилипанию корочки к стенкам кристаллизатора. Тем не менее, в существующей практике непрерывной разливки, подвисания имеют место и могут возникать в случае недостаточной или неравномерной смазки ШОС рабочей поверхности медных стенок кристаллизатора (неправильно подобрана или не качественная ШОС), попадания неметаллических включений между стенками кристаллизатора и поверхностью непрерывнолитой заготовки, увеличения зазора между стенками и корочкой более допустимых значений и других технологических факторов [2].

Равномерность затекания смазки может нарушаться при повышенной вязкости жидкого шлака, большом количестве неметаллических включений (НВ), попадающих в кристаллизатор из промежуточного ковша и оказывающих влияние на состав и свойства жидкой ШОС, недостаточном слое жидкого шлака. По данным работ [3, 4], требуемые значения глубины ванны жидкого слоя ШОС для условий разливки со скоростью примерно до 1 м/мин составляют 7–10 мм, а для высокоскоростных МНЛЗ — 15–20 мм, оптимальная толщина жидкого слоя шлака в зазоре для сортовой заготовки должна быть 0,04–0,05 мм, круга 0,08–0,10 мм, блюма 0,08–0,15 мм, сляба 0,15–0,23 мм.

Основными причинами попадания в расплав НВ являются вторичное окисление, захват шлака при технологических переливах, перемешивание металла и шлака, а также разрушение футеровки. Размер таких НВ составляет от 3–5 до нескольких десятков микрометров. Поэтому, эти включения могут негативно влиять на свойства ШОС и попадать вместе с ШОС в зазор между стенками кристаллизатора и поверхностью непрерывнолитой заготовки, способствуя образованию дефектов [5].

Для обеспечения безаварийного режима непрерывной разливки и получения качественного металла ШОС должна обладать определенным, соответствующим условиям разливки, уровнем технологических свойств (скорость и температурный интервал плавления, вязкость, температура затвердевания, поверхностное натяжения, смачивание и др.) которые обеспечиваются соответствующим ее химическим составом.

Поэтому основной задачей данной работы была разработка методики для исследования поведения жидкой ШОС и НВ в зазоре между стенкой кристаллизатора и корочкой непрерывнолитого слитка в зависимости от их свойств и в первую очередь вязкости и смачивания.

Для проведения исследований была предложена физическая модель (рис. 1), имитирующая зазор между стенкой кристаллизатора и корочкой непрерывнолитого слитка. Модель представляет собой 2 стекла (150×150 мм) соединенных между собой зажимами и закрепленных вертикально в штативе. Для образования зазора по краям стекол в вертикальной плоскости укладываются полоски полиэтилена шириной 10 мм. Необходимая толщина зазора обеспечивается укладкой различного количества полосок, изменялась в пределах 0,05–0,50 мм и контролировалась с помощью измерительного щупа. Таким образом, обеспечивалось геометрическое подобие толщины зазора на модели и в реальных условиях непрерывной разливки на слябовых МНЛЗ изменяющейся от 0,1 до 0,5 мм в зависимости от скорости разливки и параметров качания кристаллизатора [6].

Следующим этапом исследований был подбор модельной жидкости для исследования поведения жидкой ШОС и НВ в зазоре. С этой целью было определено влияние температуры на вязкость различных ШОС, применяемых в условиях действующего производства и относительно доступных масел, которые предполагалось использовать для физического моделирования (рис. 2).

Вязкость определяли по методике, описанной в работе [7] с использованием электроротационного вискозиметра с точностью измерения 5–7 % и с воспроизводимостью результатов в диапазоне измеряемых величин вязкости от 0,01 до 10 Па·с.

Представленные на рисунке 2 данные свидетельствуют о том, что вязкость силиконового и машинного масел в температурном диапазоне 12–37 °С очень близка к вязкости ШОС при температурах 1200–1400 °С. Поэтому данные масла могут быть использованы для физического моделирования исследуемых процессов. Для изучения поведения НВ в зазоре между стенками кристаллизатора и корочкой НЛЗ в качестве НВ можно использовать касторовое масло, так как оно по своей вязкости ближе к вязкости НВ, чем к вязкости исследованных масел и ШОС.

Смачивание контактирующих поверхностей силиконовым, машинным и касторовым маслом можно оценивать по величине краевого угла смачивания.



Рисунок 1 — Физическая модель для исследования поведения ШОС и НВ в зазоре

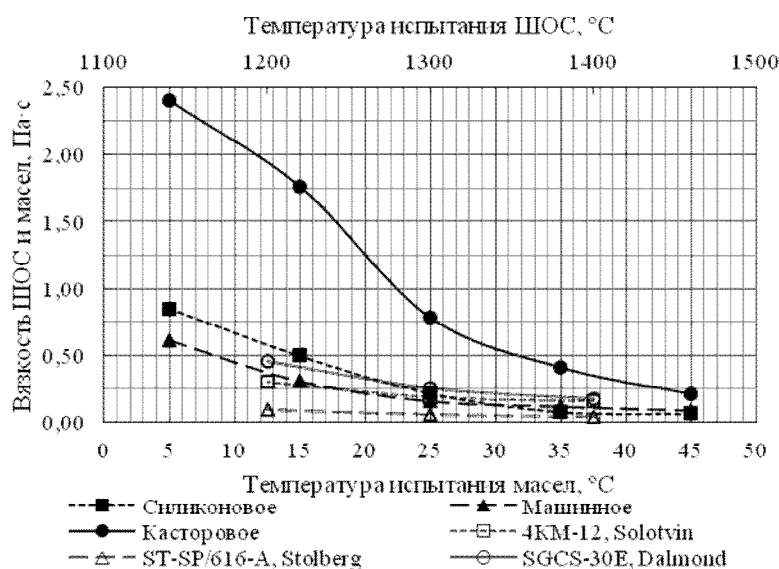


Рисунок 2 — Вязкость ШОС и масел при различной температуре

На основании представленных данных и изготовленной физической модели была предложена методика исследований поведения ШОС и НВ в зазоре между стенкой кристаллизатора и корочкой непрерывнолитого слитка заключающаяся в следующем:

- обезжиривается внутренняя часть стеклянных пластин, укладываются полоски полиэтилена для обеспечения необходимого зазора и стекла скрепляются зажимами;
- подготовленную модель размещают в штативе и выравнивают с помощью уровня в горизонтальном положении;
- под модель устанавливается мерная емкость для сбора масла после его истечения через зазор;
- в зазор модели подается масло, имеющее определенную температуру (вязкость);
- в процессе эксперимента визуально и с помощью видео камеры фиксируется время движения масла в зазоре и наполнения мерной емкости;
- уровень масла в ванне модели необходимо поддерживать постоянным, для имитации поведения жидкого шлака на мениске металла в кристаллизаторе.

Аналогичная последовательность действий может быть использована и при проведении экспериментов по исследованию поведения НВ в ШОС. Основное отличие состоит в том, что после равномерного заполнения зазора силиконовым или машинным маслом, в него с помощью шприца вводится капля касторового масла и фиксируется, время ее перемещения.

По результатам экспериментов определяется линейная скорость движения масла в зазоре, обусловленная преобладающими капиллярными силами $V_{\text{кап}}$ т. е. время, за которое масло движется от верха до низа модели. Такой механизм характерен нормальному режиму работы ШОС в зазоре с непрерывной подпиткой новыми порциями и неразрывным фронтом ее перемещения в зазоре. Кроме того, необходимо определять скорость полного заполнения зазора физической модели исследуемым маслом $V_{\text{расх}}$ по объемному расходу масла, истекающего с нижнего среза модели в приемную мерную емкость за определенный промежуток времени и пересчитывать на линейную скорость движения жидкости в зазоре. Этот механизм имеет место в случае нарушения или прекращения подачи ШОС в зазор, т. е. при разрушении целостности фронта движущейся пленки жидкой смеси.

Отношение этих скоростей $K = V_{\text{расх}}/V_{\text{кап}}$ позволяет оценить поведение жидкости в зазоре в случае нарушения или прекращения затекания в него жидкой ШОС т. е. определить преобладание одной скорости над другой.

Для сокращения количества опытов по определению поведения ШОС при различной величине зазора и температуре модельной жидкости целесообразно использовать метод

двухфакторного планированного эксперимента с двумя звездными точками для диапазона зазоров 0,05–0,5 мм и температуры 5–45 °С.

По результатам экспериментов строятся зависимости скоростей движения масел в зазоре от его величины и их вязкости, а также определяются краевые углы смачивания различных подложек используемыми маслами.

Полученные зависимости позволят прогнозировать расход ШОС в зависимости от ее вязкости и величины зазора.

Список литературы

1. Вдовин, К. Н. Рафинирование металла в промежуточном ковше МНЛЗ : монография / К. Н. Вдовин, М. В. Семенов, В. В. Точилкин. — Магнитогорск, 2006. — 120 с.
2. Смирнов, А. Н. Анализ поведения ШОС в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ и её влияние на образование прорывов / А. Н. Смирнов, Е. Н. Максеев, С. В. Куберский // Сбор. науч. трудов. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — Вып. № 38. — С. 112–122.
3. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.
4. Stone, D. T. Measurement and modeling of heat transfer across interfacial mold flux layers / D. T. Stone, B. G. Thomas. — Canadian Metallurgical Quarterly, 1999. — P. 301–375.
5. Лейтес, А. В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А. В. Лейтес. — М. : Металлургия, 1984. — 320 с.
6. Milone, M. K. Industrial development of Master-Cast system for real time prediction of stainless slab surface quality / M. K. Milone, G. T. Spacoratella. — М. : Conf. on continuous casting, 1998. — P. 831–842.
7. Смирнов, А. Н. Повышение стойкости футеровки сталеразливочных ковшей : монография / А. Н. Смирнов, Г. Г. Немсадзе, С. В. Куберский. — Днепр : ООО « Гир-Интернешнл », 2017. — 205 с.

Русанов И. Ф.
к.т.н., доцент,
Куберский С. В.
к.т.н., профессор,
Проценко М. Ю.
к.т.н., доцент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,

Русанов А. Р.

магистрант

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Тепловые электростанции (ТЭС и ТЭЦ) несут основную нагрузку по обеспечению спроса на электроэнергию в единой энергетической системе России. При их общей мощности равной 167 тыс. МВт (без учета мощностей электростанций Донбасса) они генерируют около 50 % от общего количества вырабатываемой электроэнергии. Основная масса тепловых электростанций работают на природном газе.

В народных республиках Донбасса вся электроэнергия вырабатывается тепловыми электростанциями, работающими на местных энергетических углях марок ГСШ АШ, Т и Г. Их общая установленная мощность 10,7 МВт. Удельный расход условного топлива (топлива при сгорании 1 кг которого выделяется 29,3 МДж тепла) при отпуске электрической энергии с учетом комбинированного производства электрической и тепловой энергии составляет около 300 г у. т./кВт·ч. Теплота сгорания используемых улей находится в пределах от 22 до 27 МДж/кг, и поэтому фактический расход топлива составляет 325–400 г у. т./кВт·ч.

Среднее содержание золы в пересчете на сухую массу в энергетических углях Донбасса составляет 11–23 %. Основными компонентами химического состава золы (табл. 1) являются оксиды SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO с незначительными примесями MgO, TiO₂, P₂O₅ оксидов щелочных металлов Na₂O и K₂O, и серы.

Кроме основных компонентов в небольшом количестве в золе содержится ряд элементов [1], кварки которых позволяют рассматривать их в качестве подлежащих извлечению (табл. 2).

При годовой выработке ТЭС республик 25 млрд кВт·ч. электроэнергии образуется около 1,5 млн т золы. При низкой степени использования золы она накапливается в шламонакопителях, терриконах и отвалах в значительном количестве. К примеру, по данным, приведенным в работе [1], на Украине при очень низкой доле используемой золы ТЭС (всего порядка 1 %) накоплено более 370 млн т золошлаковых отходов, которые занимают площадь около 3170 га.

В отличие от Украины, во многих странах переработке и утилизации образованных отходов топливно-энергетического комплекса уделяется повышенное внимание. В России используется около 50 %, в США около 20 %, в Великобритании — 60 %, в Германии — 72 %, в Финляндии — 84 %, а в Японии — практически 100 % образующихся золошлаковых отходов.

Таблица 1 — Содержание основных компонентов в золе

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S
Содержание, %	50–58	18–25	11–17	1,5–3,7	1,7–3,1	0,9–1,1	0,5–1,35	2,3–4,1	0,1–1,7	0,6–0,5

Таблица 2 — Содержание в золе компонентов подлежащих извлечению

Элемент	Pb	Cu	V	Mn	Cr	Li	Zn
Содержание, мг/кг	38,8–497,5	21,3–63,7	133–241,7	371–987	112,1–159,2	53,9–109,4	100–121,7
Кварк	20	57	130	650	100	6	80

Главным образом золошлаковые отходы тепловых электростанций используются в качестве строительных материалов для производства цемента, бетона, строительной керамики, теплоизоляционных материалов [2]. Кроме того, они являются универсальным материалом для дорожного строительства, перспективным материалом при приготовлении смесей для заполнения земляных выработок. Их можно также использовать в качестве дешевых сорбентов паров азотной кислоты, для очистки сточных и поверхностных вод от нефти и нефтепродуктов.

Так как золошлаковые отходы содержат большое количество ценных компонентов, их переработка позволяет получить различные виды товарной продукции на основе железа, алюминия, титана и других элементов.

Одним из способов извлечения ценных компонентов из золошлаковых отходов может быть их дуговое глубинное восстановление (ДГВ) непосредственно в железоуглеродистые расплавы для реализации процессов раскисления-легирования [3]. В работе [4] показана эффективность такого способа для извлечения кремния из песка. Учитывая достаточно большое содержание кремнезема в золе использование процесса ДГВ для извлечения кремния может быть достаточно эффективным. Частичное восстановление кремния из золы позволит получить шлак близкий по составу к бокситу, который может успешно использоваться для разжижения высокоосновных металлургических шлаков.

Перспективным методом переработки золы ТЭС, по нашему мнению, является метод, основанный на металлотермическом восстановлении алюминием.

Как известно, при металлотермическом восстановлении образуется три фазы: жидкая, твердая и газообразная. Распределения соединений и восстановленных элементов определяется термодинамикой процесса, их свойствами и тепловым уровнем процесса. Поэтому для разработки метода необходимо проведение тщательных исследований. В зависимости от распределения соединений и элементов между фазами целесообразно разрабатывать способы извлечения ценных компонентов.

В тоже время, учитывая химический состав золы несомненно, что в результате металлотермического восстановления основными продуктами будут ферросилиций марки ФС75 и оксид алюминия. Последний, может использоваться как сырье для получения алюминия.

Список литературы

1. Касимов, А. М. Исследование процессов миграции ионов тяжелых и редких металлов в почвах в зоне размещения накопителей золошлаков угольных ТЭС / А. М. Касимов, И. В. Удалов // Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия : Геология. География. Экология. — 2015. — № 43. — С. 189–200.
2. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций / Л. И. Худякова, А. В. Залуцкий, П. Л. Палеев // XXI век. Техносферная безопасность. — 2019. — С. 375–391.
3. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
4. Использование метода дугового глубинного восстановления для извлечения кремния из песка в железоуглеродистые расплавы / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, И. А. Белан // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 14 (57). — С. 37–45.

Карпов А. В.*к.т.н., доцент,***Шмарин Д. С.***студент,***Цымбал Т. В.***аспирант**Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, РФ,***Диментьев А. О.***к.т.н., доцент**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОУГЛЯ В АГЛОДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Экономика многих развитых стран в значительной мере зависит от металлургической промышленности. За 2020 год во всем мире выплавлено 1864,1 млн тонн стали, из которой около 64,4 % произведено по традиционной схеме, имеющей двухстадийный передел (доменная печь — конвертер).

Агломерационное и доменное производство подразумевает потребление большого количества топлива и как следствие выделение соответствующего объема углекислого газа, что, несомненно, приводит к изменению климата. В мировых масштабах на металлургические предприятия приходится около 6,7 % выбросов CO₂. Поэтому в Париже было принято соглашение, согласно которого страны участницы обязаны не превышать определённый уровень выбросов [1, 2].

Основными видами топлива в аглодоменном производстве являются: природный газ, кокс и уголь, в результате горения, которых, выделяется большое количество CO₂, попадающего в атмосферу. Экологический аспект вызвал необходимость поиска альтернативных видов топлива, позволяющих уменьшить выброс парниковых газов в атмосферу. Одним из таких вариантов являются биоматериалы или биомасса, обладающие углеродно-нейтральным следом. Их использование в металлургии имеет достаточно высокий потенциал, благодаря хорошей реакционной способности и приемлемому химическому составу.

Биомасса представляет собой отходы сельского хозяйства или различного рода древесину, поэтому эти материалы не могут непосредственно заменить используемые виды топлива в аглодоменном производстве из-за низкой теплотворной способности и низкого содержания углерода. В связи с этим перед использованием целесообразно проводить предварительную подготовку биомассы, продуктом которой является биоуголь.

Основным способом производства биоугля является нагрев биомассы без доступа кислорода (пиролиз) в разных вариациях (скорость и величина нагрева), газификация и гидротермальная карбонизация (рис. 1).

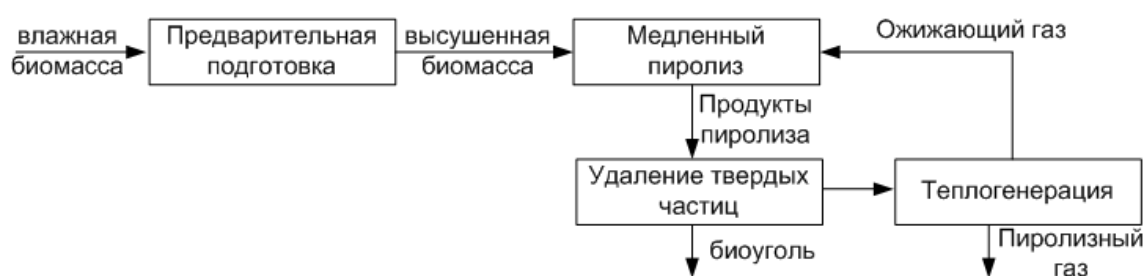


Рисунок 1 — Технологическая схема производства биоугля методом медленного пиролиза

Наибольшее распространение получила технология медленного пиролиза, суть которой заключается в том, что высушенная биомасса пиролизуется с получением биоугля и синтез-газа, с выделением тепла при температуре 400 °С и атмосферном давлении, в широком диапазоне временных масштабов от нескольких минут до нескольких дней. Из-за низкой скорости нагрева и длительного периода обработки, большая часть коагулируемых органических соединений, в биомассе превращается в твердый углерод (биоуголь), легкий газ и конденсирующуюся жидкость (в основном воду, карбоновую кислоту и альдегид).

От исходного материала биотоплива зависит качество получаемого продукта. Для аглодоменного производства наиболее предпочтительно использовать биоуголь, полученный из древесных отходов, который обладает многими преимуществами, такими как более высокая теплотворная способность, высокое содержание углерода, низкое содержание примесей (например, серы), высокая площадь поверхности и большая пористость.

На данный момент основным железосодержащим компонентом шихты для получения чугуна в доменной печи является агломерат, который получают из большого количества мелкодисперсных компонентов, путем их спекания за счет горения мелкого кокса (коксика) при просасывании воздуха через слой шихты. Известны исследования [3], показывающие, что частичная замена коксика биоуглем приводит к повышению концентрации СО и СО₂ в отходящих газах, а также снижению концентрации SO_x и NO_x в нем. Первое объясняется повышением общего расхода топлива, т. е. расход биоугля больше, чем коксика, а второе меньшим содержанием серы S и азота N в биотопливе. В результате повышение выбросов СО_x сокращает углеродный след из-за нейтральности биоугля.

Однако частичная замена коксика биоуглем, приводит к повышению скорости спекания агломерата и снижению прочности получаемого продукта [4]. Первое связано с изменением скорости горения твердого топлива, которая будет увеличиваться по мере роста доли биоугля в шихте, так как реакционная способность биоугля значительно выше, чем кокса при температурах 700–800 °С. Известны результаты, согласно которым, при замене более 40 % коксика на биоуголь наблюдается несогласованность скорости фронта пламени и теплового фронта в период спекания агломерата, что приводит к снижению эффективности горения топлива [5].

Из-за более пористой структуры биоугля, ухудшается прочность агломерата, так как биоуглем впитывается значительно больше влаги, чем коксиком, и, следовательно, влажность такой агломерационной шихты перед спеканием будет выше и составит 8,5 % против 7,1 %. Как результат, в отходящих газах наблюдается более высокая концентрация H₂O, уменьшается максимальная температура в слое и ухудшается его проницаемость. Таким образом, результаты этих исследований указывают на то, что с точки зрения экологических и экономических аспектов, можно считать частичную замену коксика на биоуголь в агломерационном процессе достаточно перспективным направлением, несмотря на негативное влияние его на прочность получаемого продукта. Однако для увеличения доли биоугля в агломерационной шихте, необходимо разработать технологию его производства с целью получить требуемые физико-химические свойства, такие как его микроструктура и химическая реакционная способность.

Замена биоуглем кокса и пылеугольного топлива (ПУТ) в доменном производстве, также является достаточно перспективным, так как его можно подавать сверху (через колошник) и снизу (через фурмы) [6–10]. Использование биоугля в качестве твердого топлива, загружаемого через колошник, не целесообразно ввиду его мелкого размера и низких показателей холодной и горячей прочности. Напротив вдувание биоугля через воздушные фурмы доменной печи вполне возможно и вероятно это позволит довести его удельный расход до 200 кг на тонну чугуна, аналогичного подаваемому ПУТ. Причем такой расход биоугля не приведет к отрицательным последствиям в работе доменной печи.

Проведенный анализ показал, что биоуголь может быть эффективно использован в качестве углеродсодержащей добавки в технологии спекания агломерата, при этом процент замены коксовой мелочи может достигать 60 %, что позволит значительно снизить выбросы СО_x, SO_x и NO_x. Также биоуголь может быть использован в доменном производстве путем вдувания его через воздушные фурмы, что позволит снизить расход кокса (или пылеугольного топлива) и сократить чистые выбросы СО₂ до 40 %.

Список литературы

1. Зиновьева, Н. Г. Черная металлургия Китая в 2020 г. и мировой криз / Н. Г. Зиновьева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2021. — Т. 77. — № 3. — С. 251–261. — DOI 10.32339/0135-5910-2021-3-251-261
2. Салин, В. Н. Конъюнктура мирового рынка стали: экономико-статистический анализ / В. Н. Салин, В. В. Нарбут, Е. П. Шпаковская // Проблемы экономики и юридической практики. — 2020. — Т. 16. — № 1. — С. 72–81.
3. Substitution of Charcoal for Coke Breeze in Iron Ore Sintering / L. Lu, M. Adam, M. Kilburn, S. Napugoda, M. Somerville, S. Jahanshahi, and J.G. Mathieson // ISIJ International. — 2013. — Vol. 53. — No. 9. — P. 1607–1616.
4. Effect of H₂O(g) Content in Circulating Flue Gas on Iron Ore Sintering with Flue Gas Recirculation / X. Chen, Y. Huang, M. Gan, X. Fan, Z. Yu, and L. Yuan // Journal of Iron and Steel Research International. — 2015. — Vol. 22. — No. 12. — P. 1107–1112.
5. Теплоэнергетические особенности электроплавки железорудных металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи / Э. Э. Меркер, О. И. Малахова, Л. Н. Крахт, В. О. Казарцев // Сталь. — 2017. — № 3. — С. 22–26.
6. Use of biomass in integrated steelmaking — Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies / Hannu Suopajarvi, Kentaro Umeki, Elsayed Mousa et al. // Applied Energy. — 2018. — Vol. 213. — P. 384–407.
7. Biomass as blast furnace injectant — Considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry / C. Wang, P. Mellin, J. Lovgren, L. Nilsson, W. Yang, H. Salman, A. Hultgren, and M. Larsson // Energy Convers. Manag. — 2015. — Vol. 102. — P. 217–226.
8. BIO-PCI, charcoal injection in blast furnaces: state of the art and economic perspectives / C. Feliciano-Bruzual and J.A. Mathews // Revista de Metalurgia. — Vol. 49. — No. 6. — P. 458–468.
9. Using Biomass for Pig Iron Production: A Technical, Environmental and Economical Assessment / G. Fick, O. Mirgaux, P. Neau, and F. Patisson // Waste and Biomass Valorization. — 2014. — Vol. 5. — No. 1. — P. 43–55.
10. Environmental and Economic Aspects of Charcoal Use in Steelmaking / T. Norgate and D. Langberg // ISIJ International. — 2009. — Vol. 49. — No. 4. — P. 587–595.

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВА АГЛОМЕРАТА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

В аглодоменном производстве актуальность и важность проблемы снижения колебаний состава железорудных материалов и готового агломерата общепризнанна. Именно поэтому усилия технологов и исследователей направлены, в первую очередь, на разработку мероприятий по повышению эффективности усреднения железорудного сырья и стабилизации состава технологических смесей. Вполне очевидно, что поиск эффективных решений возможен лишь на основе объективного и корректного анализа причин и закономерностей процесса формирования колебаний состава шихтовой смеси и готового агломерата.

Анализ причин и закономерностей формирования колебаний состава агломерата может быть результативным лишь в том случае, если по ходу его выполнения может быть вскрыто происхождение этих колебаний, их внутренняя структура. Это предполагает использование математической модели процесса формирования колебаний, которая в полной мере отражала бы суть происходящих явлений, и позволяла количественно учитывать влияние отдельных факторов.

На базе целого ряда разработок и математических моделей основных усреднительных устройств, разработанных в ДонГТИ в ходе исследований в области проблем усреднения сырья, была разработана комплексная методика диагностики процесса формирования колебаний состава агломерата в реальных условиях производства.

Диагностика процесса формирования колебаний состава агломерата выполняется поэтапно в следующей последовательности:

1. Составление схемы технологических потоков аглофабрики и выявление особенностей организации процесса усреднения сырья.

2. Выбор численных характеристик оборудования складского хозяйства и цепи аппаратов аглофабрики (количество, размеры, емкость штабелей и бункеров, параметры укладочных, заборных и дозирочных устройств).

3. Выбор численных характеристик состава и расхода исходных материалов аглопроизводства по данным технологического контроля (средний химический состав, расходные коэффициенты, величина опробуемого массива).

4. Определение фактических характеристик колеблемости состава и расхода материалов, поступающих на аглофабрику, путем статистической обработки данных технологического контроля: расчет СКО σ_i и АКФ $r_i(\tau)$ колебаний состава от куска к куску, СКО по опробуемым массивам σ_θ и коэффициентов вариации расходов $v_{\text{в}}$.

5. Проверка достоверности паспортных данных на поступающее сырье.

6. Расчет характеристик колебаний состава технологических смесей, образующихся до поступления в штабель путем дозированной подачи в общий поток.

7. Расчет коэффициентов усреднения материалов в штабеле.

8. Расчет характеристик колебаний состава материалов на выходе из штабеля.

9. Для обобщенной характеристики колеблемости сырья в отдельных сечениях технологического потока при необходимости такого анализа вычисляются СКО состава условно объединенного потока всех шихтовых материалов, включая те из них, потоки которых в соответствующих сечениях сохраняют автономность (например, колебания шихты в шихтовом отделении).

10. Расчет усреднительных возможностей цепи аппаратов аглофабрики.
11. Анализ эффективности регулирования состава аглошихты.
12. Расчет численных теоретических и фактических характеристик колебаний состава агломерата.

13. Анализ причин колебаний состава агломерата; ранжирование причин по значимости; определение лимитирующих стадий подготовки сырья к агломерации.

14. Для прогноза эффективности различных мероприятий по совершенствованию усреднения сырья и выбора оптимальной схемы шихтоподготовки производится сопоставление результатов расчетов по пунктам 1–13 ряда конкурирующих вариантов организации потоков и схем усреднения, приемлемых в реальных (или проектируемых) условиях работы аглофабрики.

Разработанный алгоритм сквозного анализа всего технологического цикла аглопроизводства позволяет получить общую картину процесса формирования колебаний состава готового агломерата в реально существующих условиях работы конкретной аглофабрики путем последовательного учета влияния каждой стадии на этот процесс. Заложенные в алгоритм математические модели позволяют расчетным путем установить количественное влияние на колебания состава агломерата всех важных факторов: характеристик колебаний состава сырья, особенностей технологической схемы организации подготовки материалов к агломерации, параметров оборудования и технологии его использования.

Тем самым оказывается возможным вскрыть причины колебаний состава агломерата, количественно оценить вклад каждой из них в общую величину дисперсии колебаний, и теоретически, расчетным путем, прогнозировать эффективность влияния различных мероприятий по изменению существующих технологий любой стадии на конечный результат — стабильность состава агломерата на выходе с аглофабрики.

Список литературы

1. Алгоритм оптимального регулирования основности агломерата / С. Д. Кузьмина, С. Н. Петрушов, Н. В. Гонтовая // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2005. — Вып. 19. — С.150–155.

2. Кузьмина С. Д. Анализ особенностей регулирования состава агломерата в шихтовых отделениях аглофабрик / С. Д. Кузьмина, С. Н. Петрушов, Н. В. Гонтовая // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2005. — Вып. 19. — С. 156–164.

3. Кузьмина, С. Д. Анализ причин колебаний состава железорудной смеси, формируемой в штабеле / С. Д. Кузьмина, С. Н. Петрушов, Н. В. Гонтовая // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2005. — Вып.19. — С. 174–180.

4. Петрушов, С. Н. Математическая модель процесса формирования колебаний состава смеси разнородных железорудных материалов в штабеле / С. Н. Петрушов, С.Д. Кузьмина, Н.В. Гонтовая // Сб. науч. трудов ДонГТУ. Спец. выпуск: Информационные технологии в научных исследованиях и учебном процессе : мат-лы II междунар. науч.-практ. конф. (14–16 ноября 2006 г., г. Луганск). — Алчевск : ДонГТУ; Луганск : ЛНПУ, 2006. — С. 154–158.

Куберский С. В.*к.т.н., профессор**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,***Великоцкий Р. Е.***ведущий инженер**Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР,***Должиков В. В.***к.т.н., доцент**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ НЕ ПРОШЕДШЕЙ ПРОТИВОФЛОКЕНОВУЮ ОБРАБОТКУ ТРУБНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ СТАРЕНИЯ

Трубная сталь, категории прочности К60 (предел прочности $\sigma_B \geq 600$ МПа), принадлежит к группе малоуглеродистых низколегированных сталей (МНС) феррито-перлитного класса. Как правило, при производстве данной стали не возникает особых проблем с обеспечением необходимых механических свойств по прочности и ударной вязкости, однако из-за высоких требований по σ_B иногда возникает отсортировка по относительному удлинению (δ_5). Основным видом брака при производстве данной стали является отсортировка по хладостойкости [1]. Термическая обработка (ТО) горячекатаного толстолистового проката (ГТП) после ускоренного охлаждения выполняется, если необходимо повысить пластичность металла. Такую обработку листов, заключающуюся в нормализации ГТП, т. е. нагреве в аустенитное состояние (выше A_{c3}) и дальнейшем охлаждении на воздухе, производят в методических нагревательных печах. Считается, что процесс старения металла для магистральных труб высокого давления (МТВД) обусловлен диффузионно-контролируемым движением атомов углерода к дефектам решетки и образованием частиц карбидов по границам зерен феррита, что приводит к снижению величины предела макроупругости [2]. С повышением уровня старения, снижается предел макроупругости стали и длительность инкубационного периода коррозионного растрескивания [3]. Отличительной особенностью современной технологической схемы производства данной стали является противфлокеновая обработка непрерывнолитых слябов заключающаяся в их медленном охлаждении в течение нескольких десятков часов для борьбы с образованием флокенов. Чем медленнее протекает охлаждение, тем больше вероятность глубокой очистки стали от водорода, снятия внутренних напряжений и меньше вероятность образования флокенов [4]. Продолжительность противфлокеновой обработки (ПФО) разнообразных сталей, полученных на разных агрегатах и заводах, колеблется в широких пределах [5].

Основной целью данных исследований был анализ влияния ПФО, ТО и старения на свойства трубной стали, категории прочности К60.

Для решения поставленной цели в условиях действующего производства были исследованы листы одной плавки стали 10Г2ФБЮ, выплавленной в кислородном конвертере комбинированного дутья емкостью 300 т и разлитой на двухручьеваой МНЛЗ в слябы сечением 220×1200 мм. Единственное отличие при производстве данной плавки от стандартной технологии заключалось в том, что медленное их охлаждение в штабелях на протяжении 72 ч со скоростью ~10–15 °С/ч не производилось. Слябы были разложены на холодном полу (температура в ККЦ около минус 5 °С) и остыли с 950 °С до 40–50 °С примерно за 10–12 ч, т. е. средняя скорость охлаждения литого сляба составила ~80–100 °С/ч. В дальнейшем данные слябы были нагреты в методической печи блюминга и подвергнуты стандартному термомеханическому контролируемому процессу (ТМКП) на стане «3000», в соответствии с существующими техническими условиями [6]. Определение количества вязкой составляющей (КВС) образцов из проката, выполняли при испытании падающим грузом (ИПГ) стандартных образцов с прессованным надрезом по ГОСТ 30456-97 при температуре минус 20 °С на

копре УМУ-10000. Определение химического состава образцов выполняли спектральным методом на установке Spectrolab.

Анализ механических свойства данного металла показал, что они находятся в пределах нормы, за исключением хладостойкости. КВС при ИПГ имело значения 5–10 %, при норме ≥ 80 %.

Для определения влияния ТО на механические свойства исследуемого металла с использованием стандартных методик были отобраны опытные образцы. В процессе ТО все образцы нагревались в муфельной печи в течение 30 мин, при температуре 915 °С, затем охлаждались на воздухе до температуры на 20 °С выше (740 °С) и на 40 °С ниже (680 °С) температуры эвтектоидного превращения A_{c1} , которая по формуле Гольдштейна [7] составила 720 °С. Далее образцы помещали в муфельные печи и выдерживали по 30 мин при этих температурах. После каждого нагрева и выдержки, образцы охлаждали до комнатной температуры со скоростью 10 °С/мин, 5 °С/мин и 1 °С/мин.

Механические свойства исследованной плавки, полученные после ТО, представлены в таблице 1.

В соответствии с данными таблицы 1, при снижении скорости охлаждения с 10 °С/мин до 1 °С/мин наблюдается уменьшение временного сопротивления с 525–529 МПа до 478–493 МПа (примерно на 50 МПа), повышение относительного удлинения с 30,5 % до 35 % (на 4–5 %), а ударной вязкости на 30–70 Дж/см² с 172–195 Дж/см² до 246–255 Дж/см² (KCV⁻²⁰), и с 191–210 Дж/см² до 226–234 Дж/см² (КСУ⁻⁷⁰). Предел текучести практически не изменился. КВС уменьшилось с 10 % до 0–5 %, по сравнению с исходным состоянием металла для всех режимов ТО, за исключением режима № 2.

После термической обработки металл полностью охрупчился (КВС=0–5 %), однако, после режима ТО № 2, количество вязкой составляющей при ИПГ увеличилось в 2,5 раза, с 10 % до 25 % (табл. 1). Снижение хладостойкости с 10 % до 0 % КВС образцов исследованной плавки после проведенной ТО, по нашему мнению, невозможно объяснить существующими в настоящее время представлениями [8] о природе и механизме водородного охрупчивания МНС.

Поэтому в ходе последующих исследований с интервалом 2–3 недели от даты выплавки анализируемого металла, в течение 38 недель проводили определение КВС при ИПГ используя образцы, отобранные от листов проката, хранящихся на складе металла.

Результаты исследований КВС при ИПГ, после старения в течение 38 недель ГТП исследуемой плавки, представлены на рисунке 1.

Анализ представленных на рисунке 1 данных свидетельствует о том, что в течение первых 20 суток после ТМКП, хладостойкость металла увеличилась с 10 % до 20 % КВС (участок А–В на рис. 1). Скорее всего, это свидетельствует о незавершенной и продолжающейся диффузии атомарного водорода (Н) из феррита и его дальнейшей адсорбции, в результате чего давление молекулярного водорода (Н₂) в коллекторах снижается, и, как следствие, приводит к повышению КВС примерно на 10 %.

Таблица 1 — Механические свойства проката после ТО

Механические свойства	Исходное состояние	Скорость охлаждения, °С/мин					
		10		5		1	
		Температура нагрева, °С					
		680	740	680	740	680	740
№ режима ТО							
КВС, %	10	5	25	5	0	5	0
σ_B , МПа	659	525	529	515	519	493	478
σ_T , МПа	557	345	350	361	368	366	342
δ_5 , %	21,5	30,5	30,5	29,5	28,5	35,5	34
KCV ⁻²⁰ , Дж/см ²	194	172	195	197	140	246	255
КСУ ⁻⁷⁰ , Дж/см ²	218	191	210	193	238	234	226

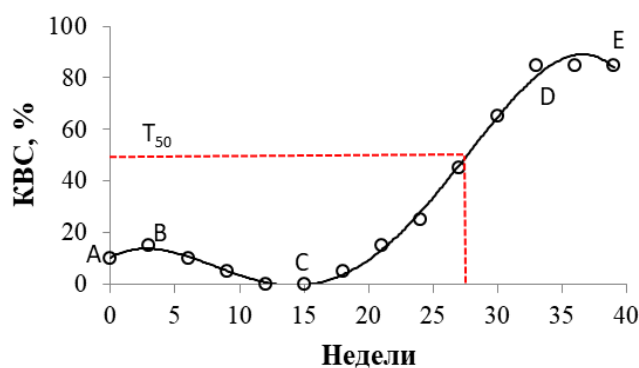


Рисунок 1 — Изменение КВС в процессе старения образцов, не прошедших ПФО

В течение последующих 12 недель старения (участок В–С на рис. 1), наблюдается снижение КВС с 20 % до 0 %. По-видимому, водородная хрупкость металла на втором участке определяется, не давлением H_2 , сегрегированного в коллекторах, и не средней концентрацией H , растворённого в решётке феррита, а увеличением концентрации H_2 и др. газов в зоне максимальных объёмных напряжений кристаллической решётки.

Начиная с 15-й недели старения (участок С–D на рис. 1), наблюдается повышение хладостойкости с 0 % до 85 % КВС. Данное резкое повышение хладостойкости, вероятнее всего, является следствием релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит, что приводит к последующей стабилизации хладостойкости на удовлетворительном уровне, в результате старения термически, деформационно и фазово напряжённого металла (напряжения II и III рода).

Примерно после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне 85 % КВС (участок D–E на рис. 1), что очевидно свидетельствует о завершении процессов релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит обусловленных напряжениями II и III рода.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при отсутствии ПФО непрерывнолитых слябов, предусматривающей их замедленное охлаждение, не обеспечивается требуемый уровень хладостойкости. ТО этого металла по различным режимам нагрева, выдержки и охлаждения не оказывает существенного позитивного влияния на хладостойкость. Анализ изменения КВС в процессе старения листового проката из стали К60 на протяжении 38 недель позволил выделить 4 характерных участка и предложить механизм их образования. Показано, что после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне, удовлетворяющем большинство существующих в настоящее время стандартов и этот процесс, может использоваться производителями в случае невозможности проведения предусмотренного технологией замедленного охлаждения непрерывнолитых слябов для обеспечения необходимых требований по хладостойкости.

Список литературы

1. Куберский, С. В. Влияние химического состава и микроструктуры трубной стали класса прочности К60 на её хладостойкость / С. В. Куберский, Р. Е. Великоцкий // Сборник научных трудов ДонГТИ — 2021. — № 24 (67). — С. 54–60.
2. Горицкий, В. М. Восстановленные нефтегазопроводные трубы повторного применения для конструкций четвертой группы / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 2. — С. 24–33.
3. Оценка степени обезводородивания листовой стали повышенной прочности при контролируемой прокатке / Л. А. Рябичева, В. И. Алимов, Ю. С. Колчина, Е. Э. Павлюченко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. — 2019. — № 3 (28). — С. 18–26.

4. Повышение эффективности противоблоковой обработки непрерывнолитых заготовок / А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий, Г. А. Кашира, О. Е. Полозюк // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2001. — Вип. 11. — С. 1–5.
5. Карпенко, Г. В. Влияние водорода на свойства стали / Г. В. Карпенко, Р. И. Крипякевич. — М. : Metallurgizdat, 1962. — 196 с.
6. ТУ 14-1-5493-2004. Прокат толстолистовой из низколегированной стали классов прочности К52-К60 и Х56-Х70 для электросварных труб на рабочее давление от 5,4 до 7,4 МПа. — М. : ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», 2014. — 34 с.
7. Trzaska, J. Modelling of CCT diagrams for engineering and constructional steels / J. Trzaska, L. A. Dobrzanski // Journal of Materials Processing Technology. — 2007. — Vol. 192–193. — P. 504–510. — DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.099.
8. Влияние способа изготовления проката из стали типа 10Г2ФБ на микроструктуру, механические свойства и хладостойкость после отжига при температурах полной и неполной фазовой перекристаллизации / П. Г. Мартынов, М. Ю. Матросов, А. Б. Григорьева [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2016. — № 3. — С. 80–87.

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ДРЕВНЕГО МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА (ПО МАТЕРИАЛАМ КАРТАМЫШСКОГО АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОНБАССА)

В настоящее время имеются многочисленные работы, посвящённые изучению разных аспектов древнего металлургического (медеплавильного) производства, позволившие выполнить некоторые обобщения [1, 2]. Исследования в этой области направлены на изучение археологического материала свидетельств древней металлургии, продуктов экспериментальных плавов. Сопоставление продуктов древних и экспериментальных плавов позволяет выйти на реконструкцию древнего медеплавильного производства.

Первоначально исследования продуктов древнего медеплавильного производства были направлены на изучении их химического состава. Последнее позволяло исследователям увязывать эти продукты с минерально-сырьевой базой. Последующие исследования показали, что, не имея представлений о технологии металлургического передела и закономерностях перераспределения химических элементов по продуктам плавки, не представляется возможным выполнение такой увязки. Опыт исследования химического состава рудного вещества, продуктов металлургического производства, требует применения тех лабораторных методов, которые позволяют получать результаты анализа с необходимой достоверностью и чувствительностью. По результатам наших исследований рентгеноспектральный анализ удовлетворяет требованиям решаемых задач. Изучение фазового состава минеральных и расплавных включений в продуктах металлургического передела выполняется по результатам исследования их химического состава на микронзондовом анализаторе. Фазовый состав минеральных и расплавных включений наряду с изучением их структурно-текстурных особенностей, позволяет судить о физико-химических условиях металлургического передела, перераспределение химических элементов в плавильном объёме, а изучение вещественного состава реликтовых включений позволяет судить о минерально-сырьевой базе рудной шихты загрузки.

Процессы гравитационной дифференциации продуктов металлургического передела при плавке меднорудного халькозинового концентрата (Картамышское рудопроявление Бахмутской котловины Донбасса) в плавильной чаше сопровождаются формированием (снизу вверх) серебряно-свинцовой плёнки, слитка меди черновой плавки, халькозина, штейновидного шлака, насыщенного окислами чёрных металлов, бурого массивного шлака и зеленоватого пористого шлака. Стратификация примесного состава отмечена также на уровне отдельных слитков меди, содержания элементов-примесей различны в нижней части слитка, средней и верхней частях. Наши наблюдения показали, что такие различия могут достигать сотен и тысяч раз. Последнее необходимо учитывать при отборе проб металла на анализ его примесного состава, а также при группировке археологического материала в отдельные совокупности, например, выделении химических типов бронз.

Изучение содержаний бронзообразующих примесей металлических изделий, обнаруженных в курганах и кладах Доно-Днепровского региона периода энеолит — поздняя бронза, показали чётко выраженную связь между функциональным назначением изделий (украшения, орудия, оружие) и содержанием легирующих примесей, определяющим прочностные характеристики металлических изделий. Так, оптимальные содержания легирующих примесей, обеспечивающее максимальные прочностные характеристики отмечены в оружии. Повышенные содержания бронзообразующих примесей в украшениях связаны с необходимостью придания металлическим изделиям цвета и блеска, имитирующих свойства изделий из серебра (бусы из бронзы, содержащей до 16 % мышьяка). Примесный состав изделий для ритуальных целей в курганах Доно-Днепровского региона характеризуется отсутствием связи с

их функциональным назначением. В то же время в других регионах (Южное Зауралье) такая связь отмечается [3].

Морфологические исследования продуктов металлургического передела целесообразны после того, как установлен характер их стратификации в плавильной ёмкости, размеры и форма последних, технология металлургического передела [4]. Применительно для плавки меднорудного концентрата в плавильных чашах важным является расчёт объёма каждого из выплавленного продукта металлургического передела (по диаметру плавильной чаши в месте формирования продукта, а также по их мощности).

По суммарному количеству продуктов металлургического передела можно судить о массе загружаемого в плавильную чашу меднорудного концентрата, а по количественному соотношению этих продуктов можно судить о вещественном составе последнего. Особенности пространственного расположения продуктов металлургического передела в плавильной чаше позволяет анализировать отпечатки слитков меди на фрагментах штейновидного шлака. Местоположение и высота валика выдавливания на поверхности подстилающего слиток меди штейновидного шлака позволяют судить о площади и мощности слитка меди черновой плавки [5]. Ориентировочный размер слитков меди черновой плавки исходя из параметров их отпечатков на поверхностях археологических штейновидных шлаков Картамышского археологического микрорайона Донбасса составил 100–150 г, что коррелирует с таковыми экспериментальных плавок, выполненных нами на этом объекте.

Таким образом, реконструкция древнего металлопроизводства должна базироваться на результатах по экспериментальному моделированию металлургических процессов, позволяющих получать сведения, необходимые для правильной интерпретации данных, полученных от изучения археологических материалов, касающихся древнего металлопроизводства. Изучение вещественных свидетельств древнего металлопроизводства без предварительного изучения технологического процесса не позволяет выполнить правильную интерпретацию полученных археологических материалов. Имеющиеся практические наработки решения частных вопросов в области изучения древнего металлопроизводства, позволяют подобрать комплекс наиболее корректных методов исследований, обеспечивающих необходимую достоверность результатов.

Список литературы

1. Григорьев, С. А. Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы / С. А. Григорьев. — Челябинск : Цицеро, 2013. — 660 с.
2. Каргалы. В 5 т. Т. 3 / Е. Н. Черных, Е. Ю. Лебедева, И. В. Журбин и др. — М. : Языки славянской культуры, 2004. — 320 с.
3. Дегтярёва, А. Д. Орудийный комплекс из цветного металла петровской культуры Южного Зауралья: технологические аспекты / А. Д. Дегтярёва, С. В. Кузьминых // Геоархеология и археологическая минералогия. — Миасс : Институт минералогии УроРАН, 2022. — С. 121–128.
4. Русанов, И. А. Реконструкция металлургического процесса выплавки меди из руды на укрепленном поселении Устье I (по материалам археологических шлаков) / И. А. Русанов, Н. Б. Виноградов // Геоархеология и археологическая минералогия. — Миасс : Институт минералогии УроРАН, 2022. — С. 129–135.
5. Шубин, Ю. П. К вопросу о методологии реконструкции металлургии эпохи поздней бронзы (по материалам Картамышского археологического микрорайона Донбасса) / Ю. П. Шубин // Геоархеология и археологическая минералогия. — Миасс : Институт минералогии УроРАН, 2022. — С. 136–140.

Коробко Т. Б.*к.т.н., доцент**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,***Георгиаду М. В.***к.т.н., инженер-технолог отдела кузнечного производства**ЧАО «Лугцентрокуз им. С. С. Монятовского», г. Луганск, ЛНР,***Георгиадис Т.***инженер**ВТУЗ Западной Македонии, г. Козани, Греция*

ПОВЫШЕНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

При изготовлении тяжело нагруженных деталей железнодорожного транспорта, предназначенного для условий пониженных и низких температур, обычно используют низкоуглеродистые стали. В случае использования среднеуглеродистых сталей, достичь высокого уровня ударной вязкости при пониженных температурах достаточно сложно.

Основные факторы, влияющие на хладостойкость сталей, связаны с химическим составом стали и её структурой. Следует отметить, что законченной теории хладноломкости или, точнее, вязко-хрупкого перехода, к настоящему времени не создано, и физический механизм этого перехода до сих пор до конца не выяснен. По существующим представлениям это связано с тем, что с понижением температуры прочность связи между кристаллитами на границе снижается медленнее, чем прочность межатомных связей внутри зерна.

Поэтому одним из путей повышения хладостойкости сталей является измельчение зерна путем использования соответствующих видов термической (ТО) или термомеханической обработки (ТМО), а также использование составов сталей, придающих им свойство наследственной мелкозернистости.

Исследования, направленные на повышение хладостойкости деталей железнодорожных вагонов в условиях пониженных и низких температур, имеют высокую степень востребованности. Именно на решение задачи по повышению хладостойкости и направлено данное исследование. Поэтому было необходимо определить возможность повышения ударной вязкости при отрицательных температурах для штамповки детали «Пятник» из стали 45, ГОСТ 1050-2013 (для значения ударной вязкости при температуре — 60 °С не менее 25 Дж/см²).

Эксперимент выполнялся на образцах, размерами 30×50×100 мм, вырезанных из штамповки «Пятник» из стали 45, нагрев осуществляли в газовой инструментальной печи. Температуру нагрева контролировали пирометром «Термоскоп-100» и по соответствующим диаграммам. Определение механических свойств производили на разрывной испытательной машине Р-10. Ударную вязкость определяли при нормальных условиях и при охлаждении образцов до –60 °С. Охлаждение образцов проводили с помощью технического спирта и углекислоты. Микроструктуру выявляли с помощью травления в 4 % растворе азотной кислоты в спирте (определяли с помощью металлографического микроскопа ММО-1500ВАТ).

Механические свойства после термообработки по стандартному для предприятия режиму и после режима (Нормализация (нагрев до 850±10 °С, общая выдержка 1,5 часа, охлаждение на спокойном воздухе). Улучшение — закалка, (нагрев до 860 °С, общая выдержка 1,5 часа, охлаждение в воде); отпуск (нагрев до 610±10 °С, общая выдержка 1,5–2 часа, охлаждение на воздухе).) приведены в таблице 1. Полный отжиг, нормализация и нормализация с регламентируемым ускоренным охлаждением и неполная закалка не оказывает значительно повышения уровня ударной вязкости. Микроструктура при этих видах термической обработки сохраняет дефекты, заложенные в деталях «Пятник» при их штамповке.

Таблица 1 — Зависимость механических свойств от режимов термической обработки образцов из стали 45

Предел прочности	Предел текучести	Относительное удлинение	Работа удара	Ударная вязкость	Твердость
σ_b	σ_t	δ	KU	KCU	HV
Н/мм ²		%	Дж	Дж/см ²	
По ГОСТ 1050-2013					
≥600	≥355	≥16			≥156
Механические свойства пятников после нормализации (при +20°C)					
655	384	20,2	73,84	91,105	174–187
Механические свойства пятников после нормализации (при –60°C)					
				7,10	9,13
Механические свойства пятников после улучшения (при –60°C)					
695	392	21,2	36,51	45,64	184–190

Видно, что двойная нормализация улучшает ударную вязкость стали 45 при –60 °С, однако ее уровень остается недостаточным. Сфероидизирующий отжиг способствует значительной гомогенизации структуры стали, однако уровень ударной вязкости не отличается от образцов после нормализации.

Нормализация в сочетании с улучшением значительно измельчает зерно стали и повышает весь уровень механических свойств. Возможно, это связано именно с наличием субструктуры, которая оказывает сильное положительное влияние на хладостойкость (понижает температуру вязко-хрупкого перехода).

Полученные результаты данной работы свидетельствуют о целесообразности повышения хладостойкости путем термической обработки, заключающейся в нормализации, закалке и высоком отпуске. После проведения термообработки на поковке «Пятник» из стали 45, ГОСТ 1050-2013 результаты работы подтвердились.

Список литературы

1. Матросов, Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. — М. : Металлургия. 1989. — 288 с.
2. Солнцев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, В. Ю. Пирайнен. — СПб. : Химиздат, 2004. — 640 с.
3. Кудряков, О. В. Повышение функциональных свойств трубной стали при комбинированной термической обработке / О. В. Кудряков, И. Г. Погорелова // Вестник ДГТУ. — 2007. — Т. 7. — № 2 (33). — С. 182–190.
4. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. — СПб. : Химиздат, 2007. — 784 с.

Коробко Т. Б.
к.т.н., доцент,
Бондаренко А. И.
студент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОСЕЙ

В настоящее время на машиностроительных предприятиях большое внимание уделяется качеству выпускаемой продукции. Надежность работы железнодорожного транспорта зависит от качества колесных пар железнодорожных вагонов, в частности осей. Большинство предприятий, выпускающих оси колесных пар для вагонов и локомотивов, проводят ультразвуковой контроль на прозвучиваемость и определение внутренних дефектов в радиальном направлении вручную или с использованием приспособлений, несколько облегчающих процесс ручного сканирования. Сам процесс контроля проводится переносным дефектоскопом. К сожалению, наблюдать за информационными сигналами, характеризующими результаты контроля, приходится визуально и самостоятельно делать оценку результатов контроля. Применение ручного неразрушающего контроля не позволяет проводить контроль всей поверхности осей с достаточно высокой скоростью. К примеру, контроль одной оси в радиальном направлении занимает 30–40 минут. Вышеперечисленные обстоятельства приводят к недоверию результатов контроля.

Целью данной работы является анализ причин недоверия результатов ультразвукового контроля. В процессе проведения контроля все параметры приходится «держать в уме» или отвлекаться от процедуры сканирования и фиксировать количество обнаруженных дефектов на бумажном носителе, и на маркирование дефектных участков на самой контролируемой оси.

Избавиться от подобных недостатков и сделать контроль в большей степени независимым от участия дефектоскописта может автоматическая установка. Она представляет собой полностью законченную систему, реализующую требования РД 32.144-2001 с изм. 1 (2004).

Установка обеспечивает контроль на прозвучиваемость, контроль на наличие внутренних дефектов как в цилиндрических частях оси с помощью прямых датчиков, так и на радиусных переходах оси с помощью наклонных датчиков. Установка контролируемой оси во вращающиеся центра происходит автоматически, автоматически проводится сканирование всех радиальных поверхностей оси, информация, снимаемая с нескольких датчиков, передается в блок обработки информации, в котором происходит оценка результатов контроля. В качестве примера можно привести работу установки фирмы «AMEST» (Чехия), изготовленную для контроля железнодорожных осей (EN 13261). Контроль выполняется за один проход датчика, радиусные переходы при этом из участков контроля исключаются (табл. 1).

Таблица 1 — Браковочные нормы при ультразвуковом контроле чистовых вагонных осей

Нормативный документ	Количество дефектов с эквивалентной площадью 7,1 мм ²	Количество дефектов с эквивалентной площадью 19,6 мм ² для РД 32.144-2000 и 28,3 мм ² для ГОСТ 31334-2007	Минимальное расстояние между двумя дефектами, мм	Величина затухания ультразвуковых колебаний, дБ
ГОСТ 31334-2007	1 на радиусном переходе	6 и более	50	–
РД 32.144-2000	6 и более или 1 на радиусном переходе	1	40	6
EN 13261:2009	1, радиусные переходы из контроля исключены	–	–	4

К сожалению, работа с зарубежными фирмами, специализирующимися на изготовлении иммерсионных дефектоскопов, затруднена необходимостью (применительно к ГОСТ) разрабатывать систему сканирования и алгоритмы обработки результатов практически «с нуля», что неизбежно отразится на стоимости установки, а большие расстояния в случае поломки делают восстановление работоспособности очень долгим и дорогостоящим делом.

Современные ручные дефектоскопы позволяют только зарегистрировать сигналы дефектных зон контролируемой продукции, но при этом не способны обеспечить полную регистрацию всех результатов контроля с получением итогового протокола контроля каждой оси независимо от влияния «человеческого фактора». Поэтому, только полная автоматизация неразрушающего контроля осей позволяет повысить его эффективность и является важным фактором повышения качества и конкурентоспособности продукции украинских предприятий.

Список литературы

1. РД 32.144-2000. Контроль неразрушающий приемочный. Колеса цельнокатаные, бандажи и оси колесных пар подвижного состава. Технические требования. — Введ. 2001-01-10. — М. : МПС России. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://static.scbist.com/scb/СТО/RD_32_144_2000.PDF.
2. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. — Введ. 1983-01-01. — М. : Издательство стандартов, 1983. — 39 с.
3. Криворучко, В. Н. Система автоматического неразрушающего контроля осей колёсных пар вагонов — оптимальное решение от отечественного производителя / В. Н. Криворучко, А. В. Джаганян, А. В. Дидык // *Неруйнівний контроль : доповіді 9-ої конф.* — 2007. — С. 37–41.
4. Неразрушающий контроль металлов и изделий / П. И. Беда, Б. И. Выборнов, Ю. А. Глазков и др. — М. : Машиностроение, 1976. — С. 285–360.

Снитко С. А.
д.т.н., доцент
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР,
Денищенко Н. П.
старший преподаватель
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРЕДЧИСТОВЫХ ОВАЛЬНЫХ РАСКАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ

Повышение качества круглых профилей, получаемых прокаткой, является актуальной задачей. Её решение рассмотрено в работах [1–11 и др.]. На практике для прокатки круглых профилей широко применяется система калибров овал-круг. При этом используются различные типы предчистовых овальных калибров, которые имеют свои преимущества и недостатки.

Рациональная калибровка валков для прокатки предчистового овала должна обеспечить получение круглого профиля заданных размеров, высокой точности и хорошего качества, а также создать условия для плавного и надежного захвата металла валками, устойчивого положения раската в круглом калибре, наименьшего и равномерного износа валков. Разработка указанной калибровки требует учитывать закономерности течения металла в круглом калибре.

На практике установлены следующие известные положения [1–4]:

- разновременность захвата овального раската и неравномерность деформации металла валками по ширине круглого калибра отрицательно сказываются на качестве наружной поверхности горячекатаного металла, в том числе повышают вероятность появления трещин и других дефектов на поверхности круглых профилей;

- обеспечение сечения профиля овального раската полностью соответствующим вертикальному сечению круглого калибра в плоскости захвата улучшает устойчивость полосы в момент захвата;

- практически полный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра уменьшает глубину наружных пороков сталеплавильного происхождения и возможность образования дефектов прокатного производства.

Поставлена задача конечно-элементного моделирования процессов прокатки предчистовых овалов различных типов в круглом калибре и на этой основе установления закономерностей напряженно-деформированного состояния металла. Также планируется выполнить сравнительный анализ основных параметров очагов деформации при прокатке в круглом калибре известных овалов различных типов (плоского овала, двухрадиусного, трехрадиусного) и двух усовершенствованных (четырёхрадиусных) предчистовых овалов.

Реализация моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов, в круглом калибре выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса DEFORM 3D. Адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к решению такого рода задач выполнена в работе [11]. Методика исследований изложена в работах [7, 9]. Исследования проведены в идентичных условиях (вытяжка при прокатке равнялась 1,217).

Калибр завода А (Днепропеталь) представляет собой двухрадиусный овал. Моделирование показало значительную разновременность захвата овального раската. При этом наибольшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наименьшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр завода Б (Донецкий металлургический завод) представляет собой плоский овал. По результатам моделирования имеет место значительная разновременность захвата овального раската. При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр завода В (Алчевский металлургический комбинат) представляет собой специальный трехрадиусный овал. Установлена некоторая разновременность захвата овального раската. При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр, показанный на рисунке 1, а представляет собой специальный четырехрадиусный овал с выпуклым дном. В этом случае обеспечивается одновременный захват овального раската (рис. 1, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации по ширине круглого калибра. Калибровка овального калибра разработана на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [6, 8].

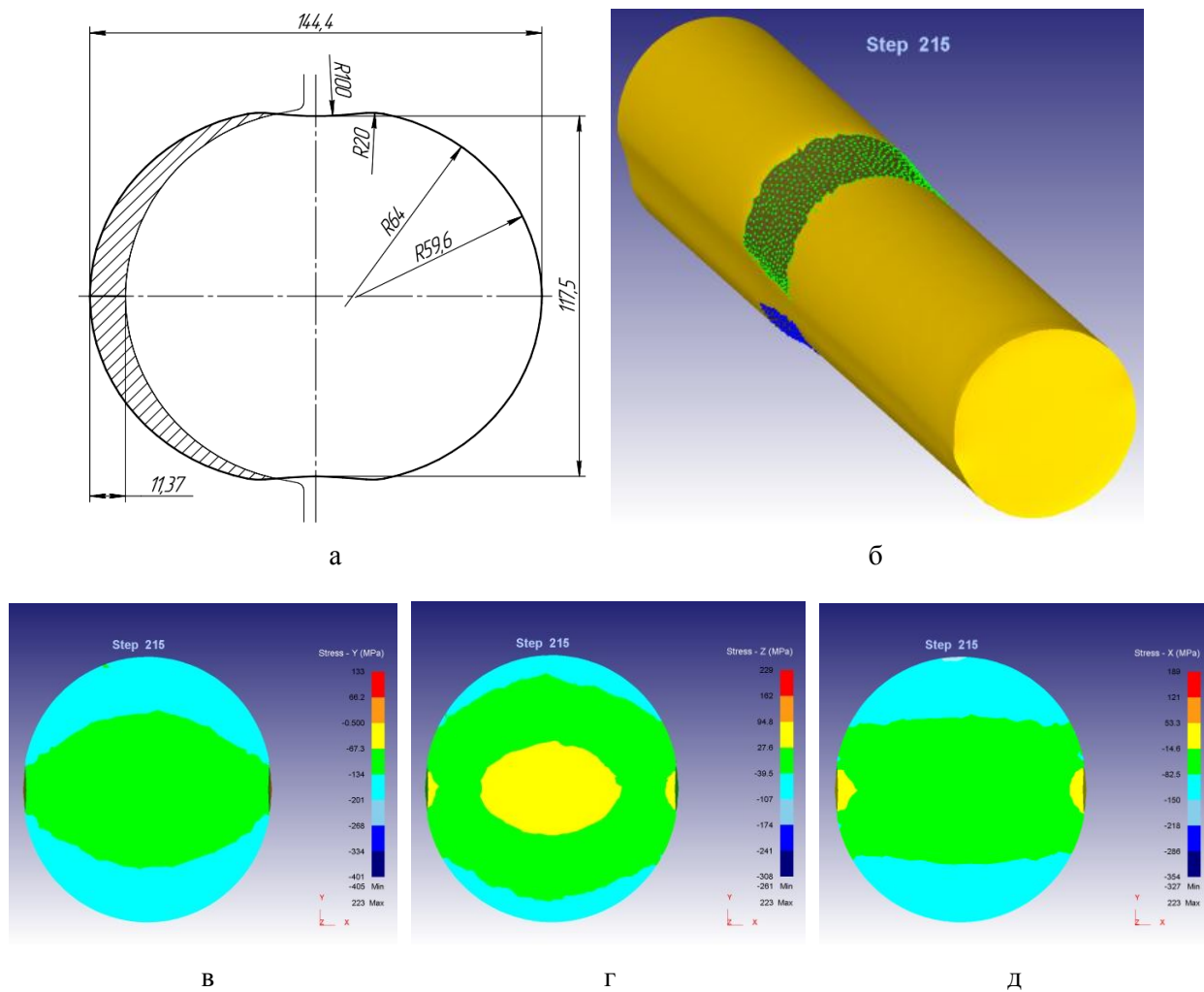


Рисунок 1 — Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки в круглом калибре четырехрадиусного овального раската, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном: а — чертеж предчистового овального калибра; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям, соответственно

Калибр, показанный на рисунке 2, а представляет собой специальный четырехрадиусный овал с вогнутым дном. В этом случае обеспечивается одновременный захват овального раската по дну и части боковых стенок круглого калибра (рис. 2, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации в указанной зоне. Калибровка овального калибра разработана на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [6, 8].

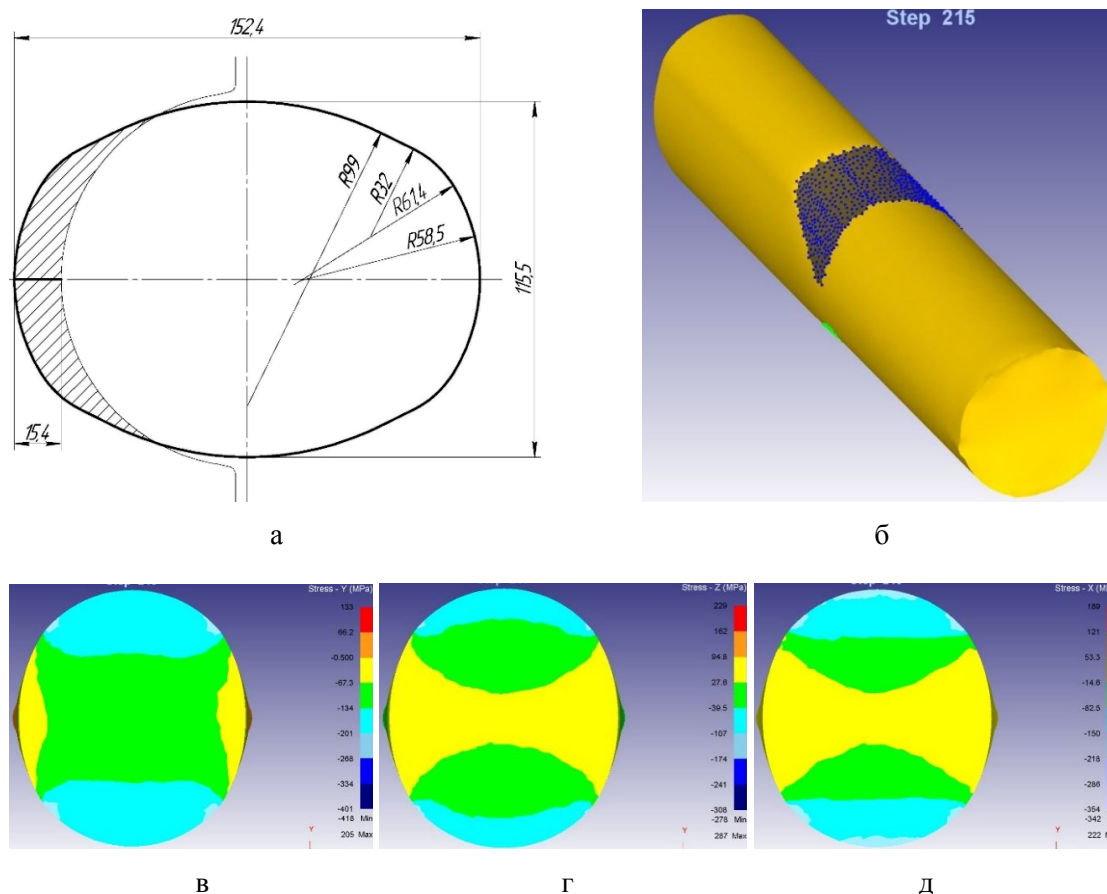


Рисунок 2 — Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки в круглом калибре четырёхрадиусного овального раската, полученного в специальном овальном калибре с вогнутым дном: а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям, соответственно

Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке овалов различных типов в круглом калибре. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной оси показал, что наибольшие сжимающие напряжения 130–200 МПа по всей боковой поверхности контакта получены при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по продольной оси (в направлении прокатки) показал, что наибольшая по протяженности зона сжимающих напряжений (40–100 МПа) по дну и боковым стенкам круглого калибра имеет место при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по поперечной оси (в направлении течения металла в уширение) показал, что наименьшая протяженность зон растягивающих напряжений (не более 50 МПа) получена при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Причем они расположены только у зазоров круглого калибра и связаны с течением металла в уширение.

Показано, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, его сечение полностью соответствует вертикальному сечению круглого калибра в плоскости захвата, что улучшает устойчивость полосы в момент захвата.

Установлено, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, обеспечивается одновременный захват металла валками практически по всей ширине круглого калибра, что снижает вероятность появления трещин.

Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов показали, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, имеет место практически полный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра. Так, при диаметре прокатанного круга в горячем состоянии 121,6 мм, контакт уже в первый момент захвата получен на ширине калибра, равной 120 мм.

Неравномерность деформации металла, которая отрицательно сказывается на качестве наружной поверхности горячекатаного металла, оцениваемая по каждой калибровке отклонением значения максимального обжатия от значения среднего приведенного обжатия по ширине калибра при прокатке, составила при использовании двухрадиусного овала — 24,2 %, плоского овала — 32,9%, трехрадиусного овала — 29,4 %, четырёхрадиусного овала (калибр с вогнутым дном) — 19,8 %, четырёхрадиусного овала (калибр с выпуклым дном) — 6,2 %.

Направление дальнейших исследований связано с исследованием износа валков при прокатке в круглом калибре предчистовых овалов различных типов.

Список литературы

1. Прокатка и калибровка : справочник. Т. 1 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под ред. Б. М. Илюковича. — Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. — 506 с.
2. Чекмарев, А. П. Калибровка прокатных валков / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. — М. : Металлургия, 1971. — 512 с.
3. Бахтинов, Б. П. Калибровка прокатных валков / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. — М. : Metallurgizdat, 1953. — 784 с.
4. Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства / В. Б. Бахтинов. — М. : Металлургия, 1983. — 486 с.
5. Hong, H. Roll pass design and simulation on continuous rolling of alloy steel round bar / H. Hong // Procedia Manufacturing : 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019). — 2019. — Vol. 37. — P. 127–131.
6. Бочков, Н. Г. Производство качественного металла на современных сортовых станах / Н. Г. Бочков. — М. : Металлургия, 1988. — 312 с.
7. Пат. 102915 Украина, МПК (2012) B21B 1/02. Способ прокатки круглых профилей / В. Б. Шум, А. В. Яковченко, В. М. Никишин, А. В. Курилов, Р. Е. Гайдук, В. В. Борискин. — № a201200925 ; заявл. 30.01.12 ; опубл. 27.08.13, Бюл. № 16.
8. Снитко, С. А. Математическая модель поверхности круглого калибра / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2020. — Т. 20. — № 4. — С. 43–48.
9. Снитко, С. А. Исследование процесса самоцентрировки овального раската специальной формы в круглом калибре на базе метода конечных элементов / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. тр. — 2021. — Т. 36. — № 3. — С. 71–82.
10. Развитие теории и технологии прокатки круглых профилей / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 25 (68). — С. 32–45.
11. Снитко, С. А. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, В. В. Пилипенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 23 (66). — С. 32–39.

Руденко Е. А.*д.т.н., профессор,***Закарлюка С. В.***к.т.н., доцент,***Гончаров В. Е.***к.т.н., доцент**Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР,***Шевелев А. И.***д.т.н.**ООО «АЯКС 2010», г. Донецк, ДНР*

«ПОДАВЛЕНИЕ» ДЕФЕКТОВ НЕПЛОСКОСТНОСТИ ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Плоскостность полос и листов является одной из важных характеристик точности геометрии листовой стали и одним из главных показателей ее технологической пригодности, стабильности производства при дальнейшей обработке в непрерывных агрегатах. Причиной образования неплоскостности является неравномерность пластических деформаций, а соответственно, и остаточных напряжений, по ширине готовой полосы. Из-за множества факторов, влияющих на неравномерную деформацию по ширине полосы и наличия различных видов дефектов ее формы [1–3], управлять плоскостностью, особенно тонких полос, крайне сложно. В связи с этим рассматриваемая проблема актуальна и требует нестандартных подходов к решению.

Известно, что участок полосы сохраняет плоскую форму от действия сжимающих напряжений, если выполняется следующее условие [4]:

$$\sigma_{сж} < \sigma_{кр}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ — сжимающие остаточные напряжения, приложенные к участку полосы; $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение для рассматриваемого участка полосы.

Из (1) следует, что устойчивость полосы к потере плоской формы тем выше, чем выше критическое напряжение $\sigma_{кр}$ участка полосы при прочих равных условиях. Из теории расчета гибких пластин [4] известна зависимость для расчета критического напряжения сжатия, при котором пластина теряет устойчивость

$$\sigma_{кр} = \kappa_1 \kappa_2 (h / b)^2, \quad (2)$$

где κ_1 — коэффициент, который зависит от отношения длины (a) к ширине (b) пластины и от условий ее закрепления; h и b — толщина и ширина пластины соответственно; $\kappa_2 = \pi^2 E / 12(1 - \gamma^2)$ — показатель, зависящий от упругих свойств пластины (модуля упругости E и коэффициента Пуассона γ).

Очевидно, что для получения плоской полосы и, следовательно, выполнения условия (1) необходимо стремиться к снижению $\sigma_{кр}$ и увеличению $\sigma_{сж}$. Из (2) следует, что увеличить $\sigma_{кр}$ (при сохранении неизменными h , E , и γ для конкретной полосы) можно путем уменьшения ширины (b) и отношения длины (a) к ширине (b), а также изменяя условия закрепления пластины.

Большинство известных способов, направленных на улучшение плоскостности листового проката, основаны на снижении $\sigma_{сж}$, при этом $\sigma_{кр}$ считают неизменным для данного

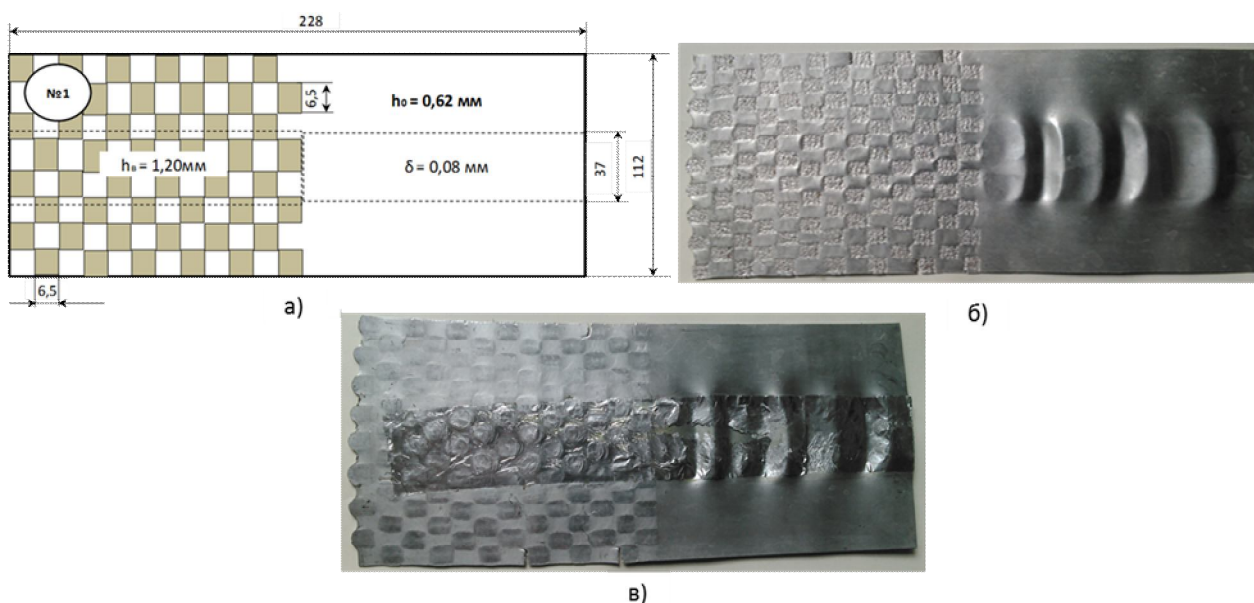
типоразмера и материала полос. К ним относят многочисленные способы прокатки, основанные на контроле плоскостности и управлении условиями деформации по ширине полосы.

В работе [5] предложена схема напряженно-деформированного состояния, повышающая $\sigma_{кр}$ за счет дробления остаточных деформаций (напряжений) путем расположения участков с большим и меньшим уровнем деформации в шахматном порядке. Однако, в представленных материалах отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие эффективность предложенного варианта повышения устойчивости полос к потере плоской формы, что требует дальнейших исследований.

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение положения о том, что дробление деформаций (остаточных напряжений) в плоскости тонких полос позволяет «подавить» различные виды неплоскостности и получить плоский прокат. Для подтверждения этого положения был выполнен эксперимент на лабораторном стане (диаметр валков 100 мм и длина бочки 170 мм).

С целью получения в полосе напряженно-деформированного состояния, повышающего устойчивость к потере плоской формы (на основе схемы в работе [5]), прокатку полос проводили вместе с наклеенной наждачной бумагой, обращенной зернистостью к прокату. Образцы из алюминиевой полосы толщиной 0,60–0,62 мм прокатывали в диапазоне вытяжек в среднем $\mu = 1,03–1,10$ без натяжения и смазки. Для сравнения способа прокатки, основанного на дроблении остаточных напряжений, с традиционным процессом (при одной и той же настройке стана), прокатывали половину одной и той же полосы без наждачной бумаги. Для получения различных видов неплоскостности перед прокаткой наклеивали на полосы алюминиевые полоски толщиной 0,04–0,08 мм, моделирующие разнотолщинность по всей длине исследуемых образцов.

На рисунке 1 приведена схема и внешний вид экспериментального образца № 1 из алюминия толщиной 0,62 мм, длиной 228 мм, шириной 112 мм после прокатки (средняя вытяжка образца $\mu = 1,10$). Часть полосы имела участок с наклеенной наждачной бумагой в виде квадратов размерами до прокатки 6,5×6,5 мм, расположенных в шахматном порядке. Образец с обратной стороны имел утолщение $\delta = 0,08$ мм шириной 37 мм посередине по всей длине полосы. Утолщение получено с помощью наклеенной алюминиевой фольги.

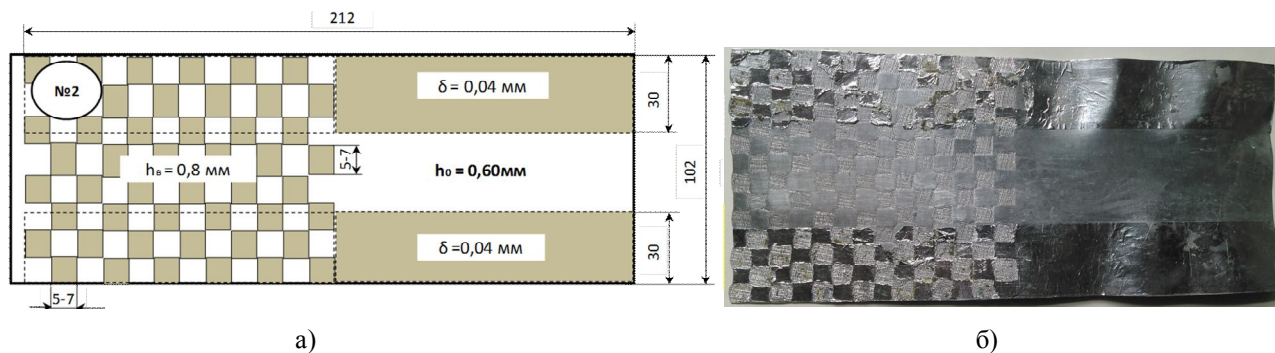


а — схема образца с шахматным расположением участков неравномерной деформации; б — внешний вид образца после прокатки (вид сверху); в — внешний вид образца после прокатки (вид снизу)

Рисунок 1 — Образец алюминиевой полосы № 1

На рисунке 2 приведена схема и внешний вид экспериментального образца № 2 из алюминия толщиной 0,60 мм, длиной 212 мм, шириной 102 мм после прокатки (средняя вытяжка образца $\mu = 1,03$). Часть полосы имела участок с наклеенной наждачной бумагой в виде квадратов размерами до прокатки 5–7,0×5–7,0 мм, расположенных в шахматном порядке. Образец имел утолщения $\delta = 0,04$ мм шириной 30 мм по краям по всей длине опытной полосы. Утолщения получили с помощью наклеенной алюминиевой фольги.

Из рисунка 2 следует, что на участке полосы, прокатанного по традиционной технологии, имелась волнистость (за счет предварительно созданных утолщений по краям). На участке полосы с шахматным расположением участков с разным уровнем деформации происходило «подавление» волнистости и полоса сохраняла плоское состояние. При этих условиях не происходило образование локальной неплоскостности и нарушение сплошности проката.



а — схема образца с шахматным расположением участков неравномерной деформации;
б — внешний вид образца после прокатки

Рисунок — 2 Образец алюминиевой полосы № 2

Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований при прокатке алюминиевых полос показано, что дробление деформаций в плоскости листа, повышает их устойчивость к потере плоской формы и позволяет «подавлять» различные виды неплоскостности.

Список литературы

1. Божков, А. И. Плоскостность тонколистового проката / А. И. Божков, В. П. Настич. — М. : СП «Интермет Инжиниринг», 1998. — 264 с.
2. Влияние параметров профиля поперечного сечения горячекатаного подката на плоскостность холоднокатаных полос / С. М. Бельский, Ю. А. Мухин, С. И. Мазур, А. И. Гончаров // Сталь. — 2013. — № 5. — С. 52–55.
3. Dixon, A. E. A physical based method to predict spread and shape during flat rolling for real-time application / A. E. Dixon, W. Y. Yuen // Steel Res. Int. — 2008. — Vol. 79. — P. 287–296.
4. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем : монография / А. С. Вольмир. — М. : Наука, 1967. — 984 с.
5. Повышение устойчивости полос к потере плоской формы / Е. А. Руденко, С. В. Закарлюка, В. Е. Гончаров, Ю. И. Юрченко // Физика и техника высоких давлений. — 2020. — Т. 30. — № 4. — С. 99–106.

Руденко Е. А.
д.т.н., профессор,
Закарлюка С. В.
к.т.н., доцент,
Гончаров В. Е.
к.т.н., доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

СПОСОБ РАЗДАЧИ ШИРИНЫ ДЛИНОМЕРНЫХ СЛЯБОВ

В современной технологии прокатки горячекатаных широких полос в качестве заготовок используют непрерывнолитые слябы с градацией по ширине 200–250 мм. Градация по ширине полос равна 50 мм и меньше. Уменьшение градации по ширине полос осуществляют, как правило, путем редуцирования слябов. Альтернативной технологией может быть раздача (увеличение) ширины исходных слябов, которая мало изучена.

Основной технологической операцией раздачи ширины на толстолистовых станах является поперечная прокатка. Так же известны способы прокатки сляба (раската) «на угол», что позволяет получать раскат большей ширины [1]. Величина уширения раската в этом случае, как известно, зависит в основном от угла задачи и вытяжки. Однако использовать эти способы в классическом виде на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСП) не представляется возможным, так как длина применяемых слябов в несколько раз превышают длину бочки валков клетей, и достигает 12 м и более.

Известен способ увеличения ширины длинных раскатов (длиннее бочки валков клетки), основанный на поперечной прокатке и реализуемый с помощью плиты и вала [2]. В этом устройстве верхний валок холостой, и перемещается на линейной подшипниковой опоре в поперечном направлении с помощью кривошипно-шатунного механизма. Полоса последовательно перемещается в продольном направлении, а валок совершает возвратно-поступательное перемещение по ширине. Вместо нижнего вала используется плоская плита. Недостатком предложенного способа, прежде всего, является сложность оборудования для его реализации и большое время раздачи ширины по всей длине раската (сляба).

В настоящей работе предлагается раздачу ширины проводить путем задачи длинного сляба (раската) в валки «на угол», заключающийся в том, что прокатку осуществляют по длине сляба (раската) с прерыванием процесса. Прерывание осуществляется при подходе боковой кромки сляба к соответствующему краю бочки вала. Следовательно, для увеличения длины непрерывно прокатанного участка сляба (раската) необходимо его задавать в валки на противоположном крае бочки вала. После остановки процесса прокатки верхний валок клетки поднимают для выведения из контакта с металлом и недокатанный сляб перемещают вдоль оси валков в обратном направлении к противоположному краю бочки вала.

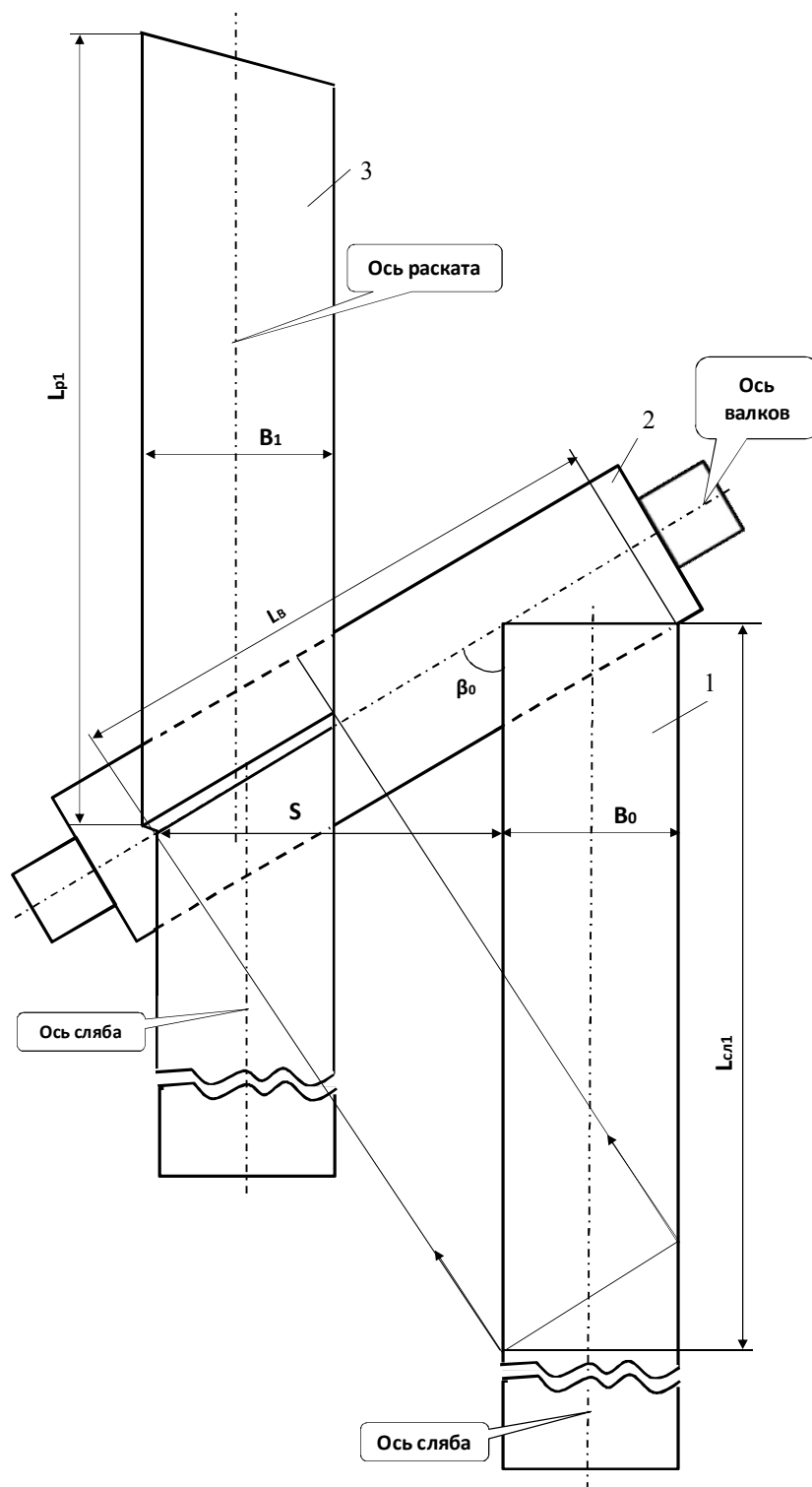
На рисунке 1 показана предлагаемая схема раздачи длинного сляба. Валки клетки расположены под углом к линии прокатки (оси рольганга), равным углу задачи сляба в валки β_0 . Задачу осуществляют на правом крае бочки вала. При прокатке левая кромка сляба на входе в валки перемещается к левому краю бочки вала на расстояние S , равное разности

$$S = L_B \times \sin \beta_0 - B_0, \quad (1)$$

где L_B — длина активной части бочки вала; B_0 — исходная ширина сляба.

Из рисунка следует, что длина сляба, прокатанная непрерывно $L_{\text{сл1}}$, определяется углом задачи β_0 , шириной сляба B_0 и длиной активной части бочки вала L_B :

$$L_{\text{сл1}} = \frac{L_B - B_0 / \sin \beta_0}{\cos \beta_0}. \quad (2)$$



1 — положение сляба при задаче в валки; 2 — прокатные валки, расположенные под углом к оси рольганга;
 3 — положение уширенного раската после первого этапа прокатки

Рисунок 1 — Предлагаемая схема раздачи длинного сляба при прокатке «на угол»

Из выражения (2) следует, что длина непрерывного участка увеличивается при приближении угла β_0 к значению 90° .

Ширину раската B_1 (на выходе из валков) при прокатке «на угол» можно определить, например, по формуле И. М. Павлова [3].

$$B_1 = \frac{\mu B_0}{\sqrt{1 + \sin^2 \beta_0 (\mu^2 - 1)}}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент вытяжки раската.

С учетом уширения раската, $\Delta B = B_1 - B_0$, преобразуем формулу (3) к виду

$$\Delta B = B_0 \left(\frac{\mu}{\sqrt{1 + \sin^2 \beta_0 (\mu^2 - 1)}} - 1 \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при увеличении угла β_0 снижается эффект раздачи ширины ΔB (при $\beta_0 = 90^\circ$, $\Delta B = 0$).

При реализации предложенного способа целесообразно прокатную клеть расположить под углом 40–60° к линии прокатки стана. При этом оси рабочих рольгангов клетки должны совпадать с линией прокатки стана, а манипуляторные линейки и продольное перемещение раската при прокатке должны быть параллельны ей.

Эффективность предложенного способа прокатки определяется числом остановок валков и величиной раздачи ширины, находящихся в противоречии. Эффективность зависит от длины бочки валка L и исходной ширины сляба B_0 .

Расчеты показывают, что при $L = 4000$ мм, $B_0 = 1500$ мм, $\beta_0 = 45^\circ$ и $\mu = 1,25$ ширина раската на выходе из клетки увеличится на 150 мм. Максимальная длина непрерывно прокатанного участка сляба составит 2656 мм. Следовательно, при длине сляба 12 м прерывать прокатку необходимо 3–4 раза. При этом цикл прокатки по времени не ограничивает производительность в чистовой группе клетей.

Для увеличения ширины и получения раската с прямоугольными концами необходимо осуществить несколько проходов с задачей раската на каждую диагональ. При этом один из рабочих рольгангов должен быть оборудован кантователем для поворота раската вокруг его продольной оси, а клеть работать в реверсивном режиме.

Список литературы

1. А. с. 1324695 СССР, МКИ В21В 1/38. Способ прокатки листов / В. М. Богатырев, А. М. Онищенко, В. П. Следнев и др. — № 4045164/31-02 ; заявл. 28.03.86 ; опубл. 23.07.87, Бюл. № 27.
2. Novel method to spread the width of strip / Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Kaneko et al. // ISIJ International. — 2022. — Vol. 42. — № 9. — P. 1000–1004.
3. Литовченко, Н. В. Станы и технология прокатки листовой стали / Н. В. Литовченко. — М. : Metallurgia, 1998. — 271 с.

Руденко Е. А.
д.т.н., профессор,
Гончаров В. Е.
к.т.н., доцент,
Закарлюка С. В.
к.т.н., доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОКАТКИ ПОЛОС В ВАЛКАХ С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Реализация асимметричной прокатки на толстолистовых станах, не оснащенных индивидуальным приводом валков, возможна за счет применения валков с конической поверхностью. Этот способ имеет следующие преимущества:

- равенство моментов на шпинделях валков;
- возможность применения при общем приводе валков через шестеренную клеть.

Материалов по этой тематике недостаточно для оценки эффективности процесса. Они касаются в основном геометрии очага деформации, условий захвата, силовых и кинематических условий прокатки, механических свойств и структуры прокатанного металла [1, 2].

Исследование энергосиловых параметров прокатки в валках с конической поверхностью выполнили на лабораторном стане 340. Моделировали широкий диапазон условий: $l/h_{cp} = 2-7$. Масштаб моделирования составил 1:5. Материал образцов — технический алюминий. Выбор материала обусловлен достаточным для сравнимости уровнем силы прокатки. Алюминий сравнительно мало наклепывается при холодной прокатке, с его помощью можно решать задачи количественной оценки параметров прокатки.

Прокатку образцов производили в валках одинакового диаметра, вращающихся с одинаковыми угловыми и окружными скоростями (симметричная прокатка), а также в валках с конической поверхностью. Исследования осуществляли в трех комплектах валков с конической поверхностью с конусностью, обеспечивающей максимальную степень рассогласования окружных скоростей на кромках прокатываемых образцов K_v , 0,94; 0,88; 0,83. Серии образцов шириной 200 мм прокатывали за ряд пропусков с толщины 4 мм до толщины 0,4 мм с относительным обжатием 10, 20, 30 %.

При прокатке регистрировали силу и момент прокатки, ток якоря двигателя, толщину карточек.

На рисунке 1 представлены зависимости силы прокатки от относительного обжатия при симметричном (линия 1) и несимметричном (линии 2–4) процессе, полученные в результате обработки экспериментальных данных. Эффективность по снижению силы прокатки достигала 36% при небольших ее значениях и небольших значениях относительного обжатия. Эффективность процесса снижается с увеличением относительного обжатия. Эффективность процесса прокатки в конических валках существенно снижается при $K_v < 0,88$.

На рисунке 2 представлены результаты исследования момента прокатки от параметра l/h_{cp} и относительного обжатия. Момент прокатки в конических валках увеличивается по сравнению с аналогичными условиями симметричной прокатки на 25–30 %. Причем с ростом степени рассогласования скорости (уменьшения K_v) интенсивность возрастания момента увеличивается. Это связано с возрастанием сил трения в очаге деформации.

На рисунке 3 приведено распределение моментов и суммарный момент при прокатке в конических валках с $K_v = 0,88$ и относительным обжатием 30 %. Как следует из рисунка, загрузка шпинделей по моменту практически одинакова.

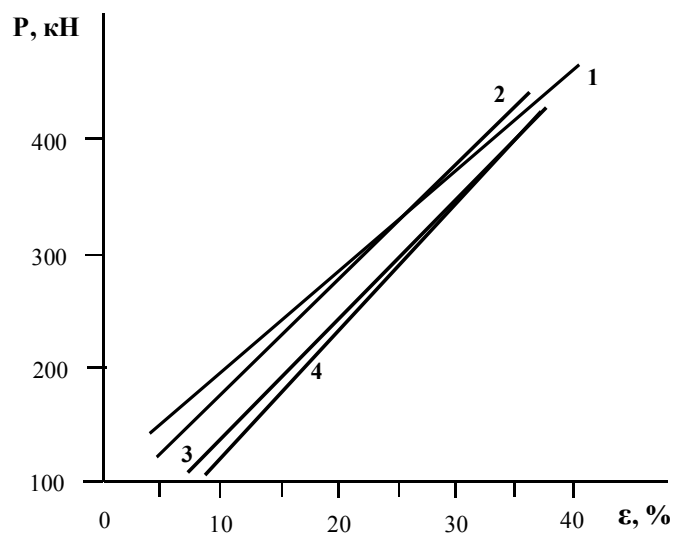


Рисунок 1 — Зависимость силы прокатки от относительного обжатия при условиях:
 1 — симметричная прокатка; 2 — $K_v = 0,94$; 3 — $K_v = 0,88$; 4 — $K_v = 0,83$

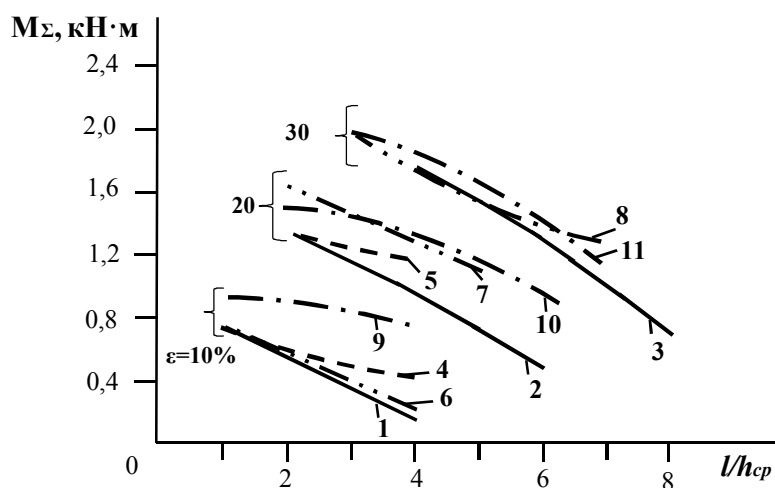


Рисунок 2 — Зависимость момента прокатки от параметра l / h_{cp} и относительного обжатия при условиях : 1–3 — симметричная прокатка; 4–5 — $K_v = 0,94$; 6–8 — $K_v = 0,88$; 9–11 — $K_v = 0,83$

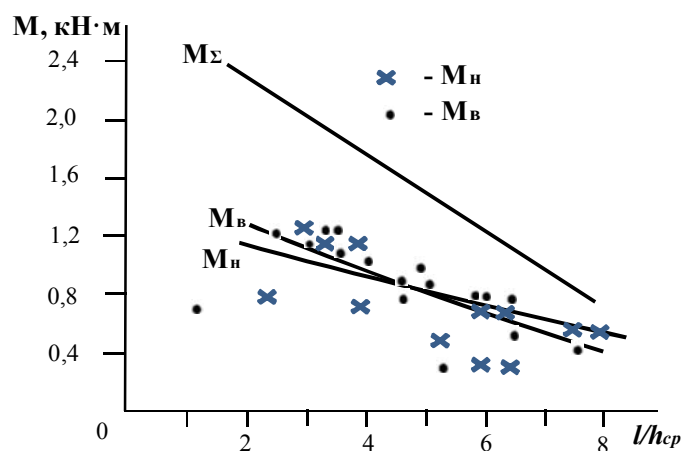


Рисунок 3 — Момент на нижнем M_n , верхнем M_b валках и суммарный момент M_Σ в валках с конической поверхностью

В качестве показателя расхода электроэнергии рассмотрели ток якоря двигателя. На рисунке 4 приведены зависимости тока якоря двигателя от l/h_{cp} и относительного обжатия. Основной тенденцией изменения тока якоря двигателя является его увеличение на 15–20 %. Этот рост объясняется увеличением сил трения в очаге деформации. При некоторых условиях прокатки в конических валках происходит уменьшение силы тока якоря двигателя. Эта закономерность проявляется при небольших относительных обжатиях. Снижение силы тока якоря двигателя при увеличении момента прокатки объясняется следующим образом. Асимметрия обусловлена двумя факторами — разницей скоростей и диаметров валков. Разница скоростей и, как следствие, рост сил трения в очаге деформации вызывает увеличение момента прокатки. Разница диаметров способствует уменьшению длины очага деформации и расхода электроэнергии на прокатку. Однако дальнейшее увеличение разницы диаметров приводит к тому, что разница скоростей начинает оказывать преобладающее влияние на расход электроэнергии. При этом расход энергии несколько повышается.

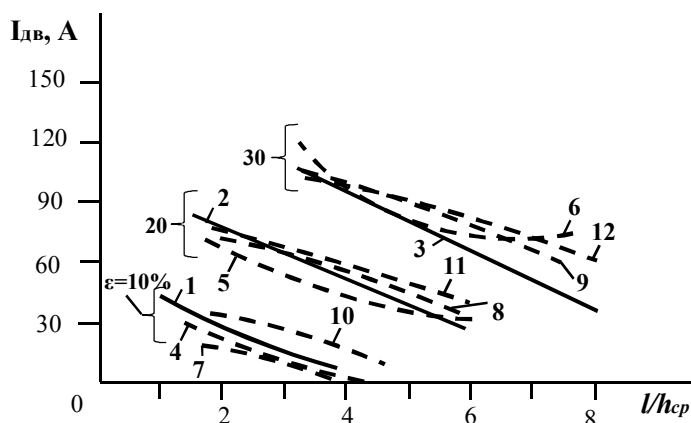


Рисунок 4 — Зависимость тока якоря двигателя от l/h_{cp} и относительного обжатия при условиях:
1–3 — симметричная прокатка; 4–6 — $K_v = 0,94$; 7–9 — $K_v = 0,88$; 10–12 — $K_v = 0,83$

Таким образом, на основании экспериментальных исследований показана эффективность процесса деформации в конических валках относительно снижения силы прокатки. Момент прокатки и расход электроэнергии при этом повышается.

Список литературы

1. Исследование асимметричной прокатки листов в валках с конической поверхностью. Сообщение 1 / Ю. В. Коновалов, А. А. Будакова, В. Е. Гончаров и др. // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1990. — № 3. — С. 49–51.
2. Исследование асимметричной прокатки листов в валках с конической поверхностью. Сообщение 2 / Ю. В. Коновалов, А. А. Будакова, В. Е. Гончаров и др. // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1990. — № 5. — С. 42–43.

Кравцова С. И.
аспирант,
Яковченко А. В.
д.т.н., профессор

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 20 НА БАЗЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОЧНЕННЫХ КОНСТАНТ ФОРМУЛ РАСЧЁТА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Известно, что проблема моделирования реологических свойств относится к наиболее важным и сложным задачам теории обработки металлов давлением. Важное значение теории [1] расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации получила применительно к конечно-элементным методам исследований напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки металлов давлением.

Вместе с тем в работах [2–4] показано, что константы, определяющие термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации [1] не обеспечивают приемлемую точность расчетов во всем заявленном диапазоне изменения состава химических элементов.

В работах [2, 3] разработаны усовершенствованные метод и специализированная компьютерная программа расчёта уточненных констант формул, определяющих термокинетические параметры в теории расчета напряжения течения как для отдельных марок сталей, так и для групп, включающих до 25 марок сталей.

Поставлена задача анализа точности моделирования кривых течения стали 20 [5] на базе метода определения уточненных констант формул расчёта термокинетических параметров, которые получены в работе [3] для группы из трёх углеродистых марок сталей: 45, 08, 55.

Результаты расчётов по стали 20 представлены в таблице 1 и на рисунках 1–4. Среднее относительное отклонение расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным на базе уточненных констант [3] (для группы из трёх марок сталей 45, 08, 55) σ_y получено меньшим, чем базе исходных $\sigma_{и}$ [1] констант.

Таблица 1 — Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным для стали 20, полученных на базе исходных $\sigma_{и}$ [1] и уточненных [3] констант σ_y для группы из трёх марок сталей 45, 08, 55

Марка стали	Химический состав стали, %		Константы				Отклонение, %	
							$\sigma_{и}$	σ_y
Сталь 20, [5]	Наименование	Сталь 20					8,3	6,5
	C (0.05 - 1.1)	0.19	n1	61.343150	m1	0.161166		
	Si (0 - 1.65)	0.04	n2	36.772599	m2	0.204126		
	Mn (0.03 - 1.55)	0.86	n3	0.266166	m3	0.040946		
	Cr (0 - 0.3)		n4	0.336268	m4	0.050152		
	Ni (0 - 0.3)							
	P (0 - 0.05)	0.022						
	S (0 - 0.05)	0.029						
	V (0 - 0.26)							
	Cu (0 - 0.28)							

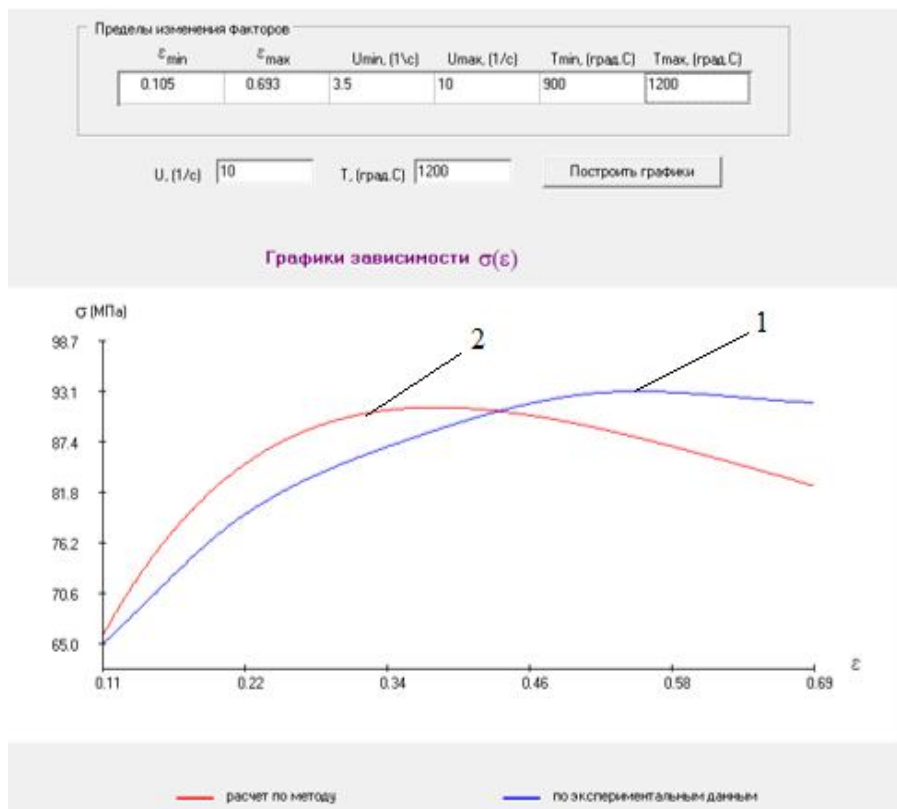


Рисунок 1 — Экспериментальная (линия 1) и расчётная (линия 2) (полученные на базе уточненных констант [3] для группы из трёх марок сталей 45, 08, 55) кривые напряжения течения стали 20 $\sigma = f(\varepsilon)$ при фиксированных значениях U, T

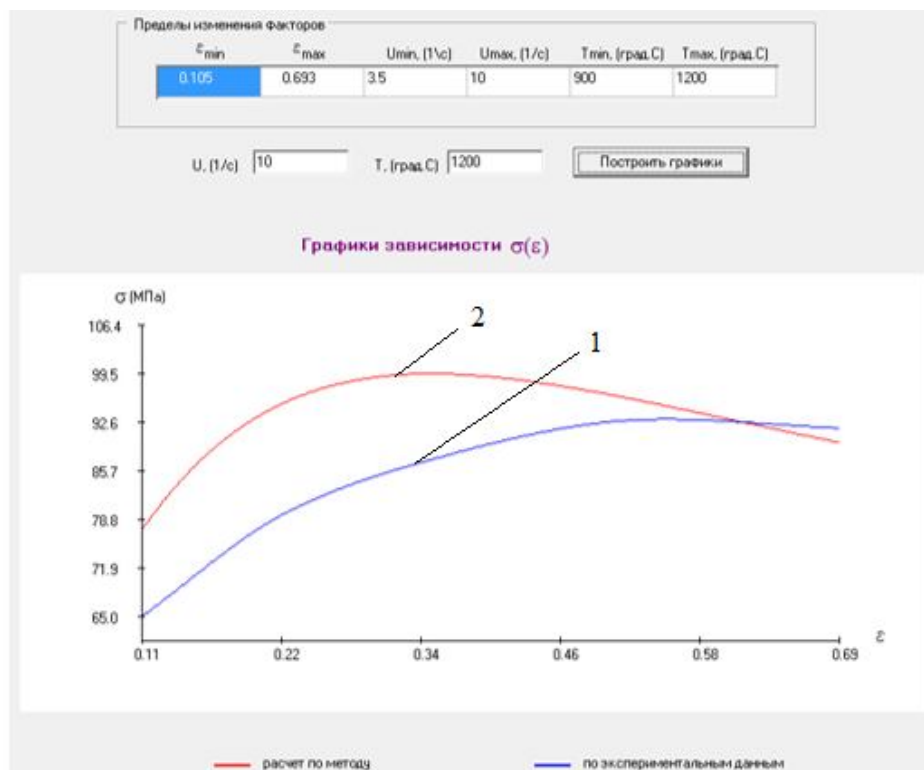


Рисунок 2 — Экспериментальная (линия 1) и расчётная (линия 2) (полученные на базе исходных констант [1]) кривые напряжения течения стали 20 $\sigma = f(\varepsilon)$ при фиксированных значениях U, T

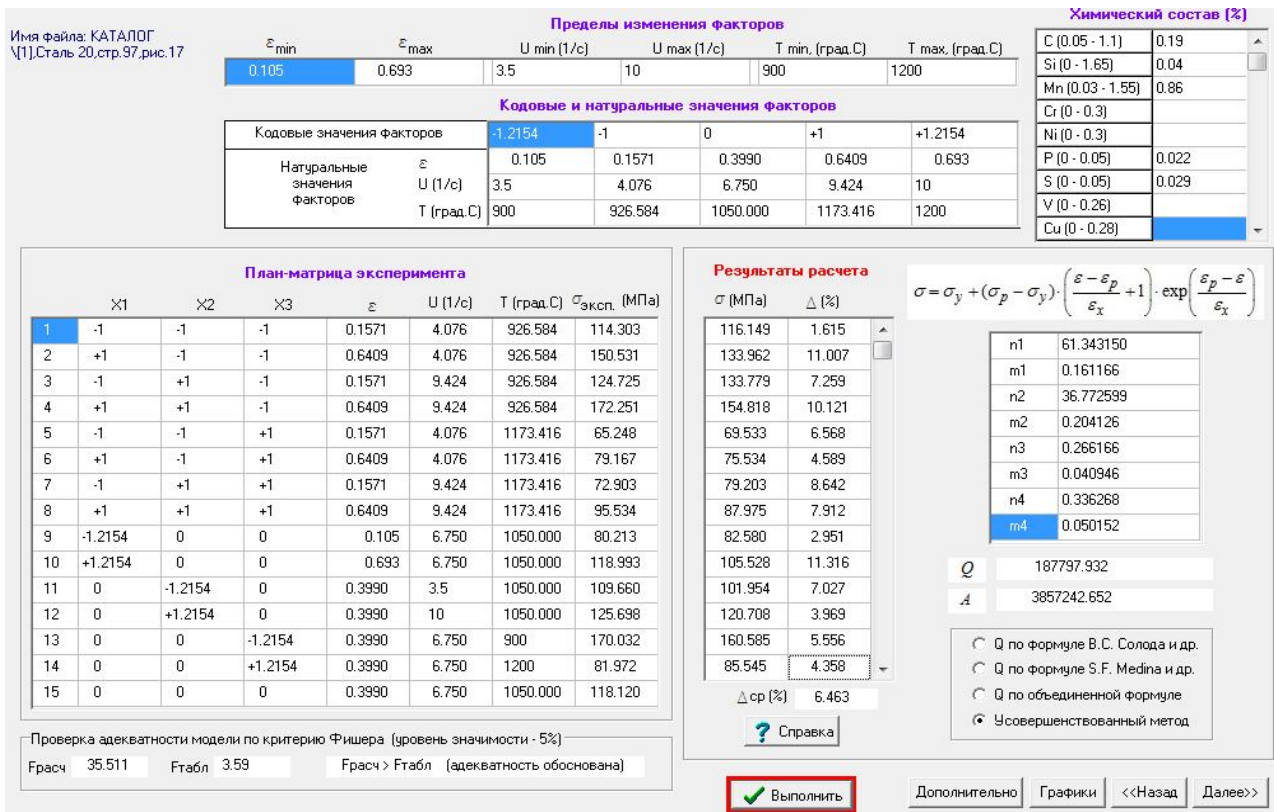


Рисунок 3 — Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных [5] по стали 20 на базе уточненных констант (для группы из трёх марок сталей 45, 08, 55)

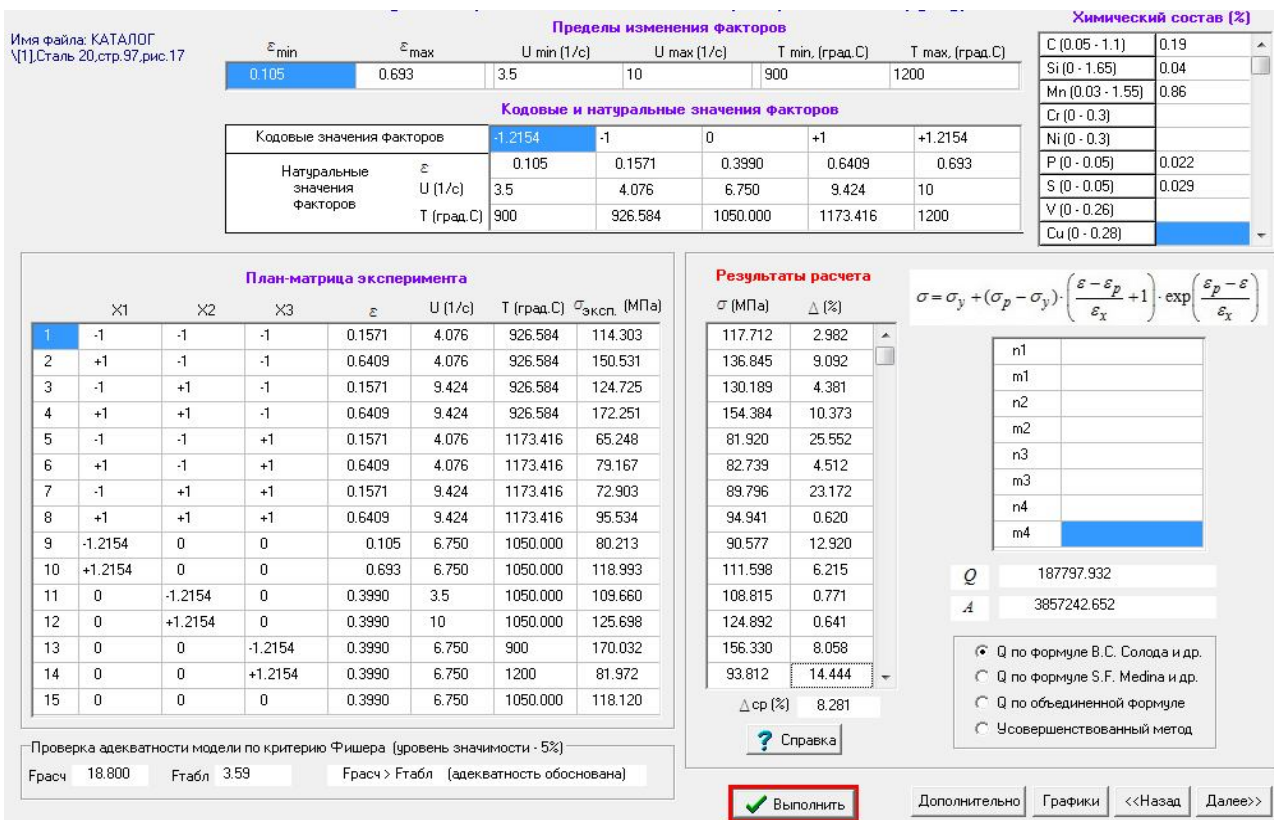


Рисунок 4 — Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных [5] по стали 20 на базе исходных констант [1]

Выводы. Уточненные константы формул, определяющих термокинетические параметры в теории расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации, которые получены для группы из трёх марок сталей: 45, 08, 55 использовали для моделирования кривых течения стали 20. При этом среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным составило 6,5 %, что меньше, соответствующего отклонения, полученного на базе исходных констант.

Список литературы

1. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Металл и литье Украины*. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.
2. Яковченко, А. В. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. — 2022. — № 26 (69). — С. 29–39.
3. Усовершенствованный метод и компьютерная программа определения уточненных констант формул расчета термокинетических параметров для групп марок сталей / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. — 2022. — № 27 (70). — С. 27–37.
4. Яковченко, А. В. Уточненные константы формул расчёта термокинетических параметров для ряда отдельных марок сталей / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: сборник научных трудов ЛГУ им. В. Даля*. — Луганск : Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. — № 2 (39). — С. 10–16.
5. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. — М. : Металлургия, 1976. — 488 с.

Денищенко П. Н.
к.т.н., доцент,
Шенин А. А.
ассистент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Черная металлургия является наиболее крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов. Прокатный передел по степени энергоемкости занимает второе место после доменного. В условиях подорожания энергоносителей проблема энергосбережения становится еще более актуальной.

В результате анализа литературы [1] выявлен ряд способов экономии энергии при производстве толстых листов. Большинство способов для своей реализации требует значительных капитальных затрат или наличия специального оборудования, что ограничивает возможности их реализации. Вопросы о влиянии скоростных режимов прокатки на энергозатраты в литературе освещены слабо, поэтому требуют отдельного рассмотрения.

Скоростные диаграммы прокатки применяемые на толстолистовых станах (рис. 1) могут быть треугольного типа (*a* и *б*) и трапециoidalного (*в* и *г*). Первые применяются при прокатке раскатов небольшой длины. По мере увеличения длины раската скорость в каждом следующем проходе увеличивается и достигает максимальной скорости двигателя. После чего возникает необходимость прокатки раската по трапециoidalной диаграмме.

Скоростная диаграмма прокатки (рис. 2) состоит: из разгона двигателей до оборотов захвата металла валками (участок 1); после захвата металла идет прокатка с ускорением валков сначала до номинальной, а затем до максимальной скорости в проходе (участок 3). После достижения максимальной скорости идет прокатка на максимальной скорости при постоянных оборотах двигателей (участок 4) или снижение оборотов главных двигателей (участок 5 или 8, 9).

Выброс металла из валков производится на пониженных оборотах, после чего следует остановка двигателей (участки 6, 7 или 10). Для снижения динамического удара в главной линии клетки и повышения надежности захват всегда производится на оборотах меньше номинальных, а выброс (для соблюдения тройного условия Тягунова) может быть, как выше так и ниже номинальных оборотов — поэтому и получились варианты составляющих скоростной диаграммы прокатки.

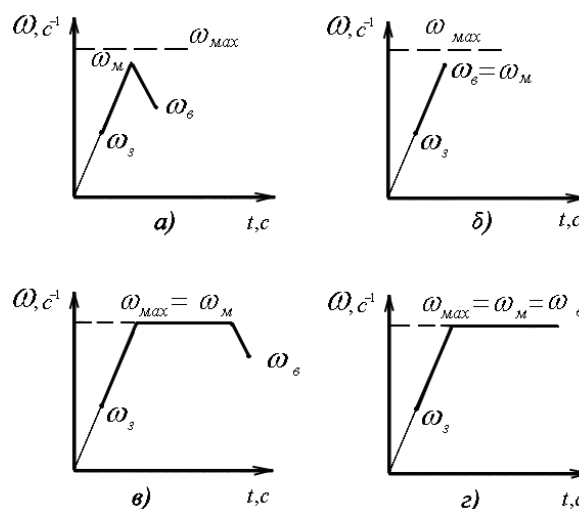


Рисунок 1 — Скоростные диаграммы прокатки на реверсивных прокатных станах

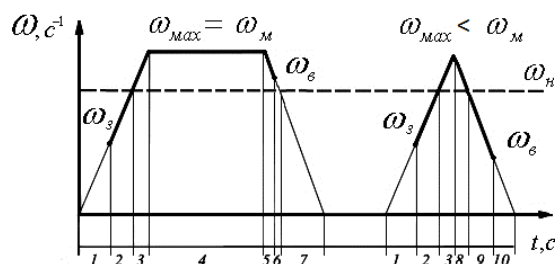


Рисунок 2 — Временные составляющие скоростных диаграмм прокатки:
 при $\omega_{\max} = \omega_n$, $\omega_B > \omega_n$ — слева; $\omega_{\max} < \omega_n$, $\omega_B < \omega_n$ — справа

Разгон двигателей до оборотов захвата выполняется без металла в валках при минимальном моменте на валу главных двигателей M_p ; после захвата металла идет прокатка с ускорением валков во время которой приходится преодолевать силы инерции главной линии стана и раската, который находится в валках — при этом момент на валу главных двигателей максимальный — M_y .

При прокатке по трапецеидальной диаграмме после достижения максимальной скорости идет прокатка на максимальной скорости при постоянных оборотах двигателей когда не нужно преодолевать силы инерции и расходовать дополнительную энергию, а только преодолевать сопротивление деформации металла и силы трения в очаге деформации и главной линии стана — поэтому момент на валу главных двигателей не максимальный M_{II} .

После достижения максимальной скорости идет снижение оборотов главных двигателей, когда силы инерции главной линии клетки помогают преодолевать сопротивление деформации металла и силы трения в очаге деформации — поэтому момент на валу главных двигателей минимальный — M_3 .

После выброса металла из валков идет дальнейшее снижение оборотов главных двигателей, когда силы инерции главной линии клетки превышают момент холостого хода — поэтому момент на валу главных двигателей отрицательный — M_0 .

Регулирование скорости двигателя от 0 до номинальной скорости ведётся при постоянном значении тока якоря путём повышения напряжения на обмотке статора. В этих условиях развиваемый двигателем момент $M = \text{const}$, а мощность двигателя пропорциональна числу оборотов. При дальнейшем увеличении оборотов от ω_n до ω_{\max} мощность двигателя остается постоянной, а момент уменьшается пропорционально увеличению числа оборотов.

Определить расходы энергии на участках скоростной диаграммы прокатки можно с учетом моментов на участках скоростной диаграммы прокатки, средней угловой скорости на участках и длительности участка [2]:

$$W_i = \frac{M_{\text{дв}} \cdot \omega_i^2}{K \cdot 3600} t_i \text{ [кВт]},$$

где $M_{\text{дв}}$ — моменты на участках скоростной диаграммы прокатки, МН·м; ω_i — средняя угловая скорость на участках скоростной диаграммы, с^{-1} ; t_i — длительность участка скоростной диаграммы прокатки, с; K — переводной коэффициент, $K = 1000$.

Как видно из приведенной зависимости затраты энергии пропорциональны времени и квадрату угловой скорости, поэтому есть возможность при уменьшении угловой скорости и увеличении времени достичь экономии энергозатрат при прокатке.

С учетом вышеизложенного предлагается уменьшение энергозатрат получить за счет снижения максимальных оборотов двигателя в каждом проходе при сохранении оборотов выброса и захвата (при выполнении тройного условия Тягунова В. А.). Максимальная скорость в каждом проходе может быть ограничена номинальной угловой скоростью двигателя. Прокатка будет производиться по трапецеидальной диаграмме, что несколько увеличит вре-

мя прокатки (по существующей технологии прокатка в черновой и чистовой клетях происходит по треугольным диаграммам). Действие максимального крутящего момента при прокатке раскатов, а следовательно, и затраты энергии на прокатку, будут иметь место на участке ускорения от захвата до максимальной угловой скорости непродолжительное время. Продолжительным будет действие момента при прокатке на постоянной номинальной скорости, где величина момента существенно меньше.

Для определения эффективности предложенных мероприятий с использованием разработанной на кафедре ОМДиМ специализированной компьютерной программы (модели) проектирования технологического процесса прокатки [3, 4] в среде Microsoft Excel на примере прокатки толстолистовой стали 16×1600×6000 мм в условиях стана 3000 проведены сравнительные расчеты существующей технологии прокатки и энергосберегающей (с пониженными скоростями прокатки). Для этого по энергосберегающей технологии максимальные обороты в проходе были ограничены номинальными оборотами.

Расчеты энергозатрат, выполненные с применением ЭВМ, показали снижение на 10 кВт/ч на тонну проката или 16,6 %. При этом цикл прокатки листа 16×1600×6000 мм увеличился на 7 с. или 18 % по сравнению с существующей технологией.

Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки в условиях ТЛС 3000 в интерпретации программного комплекса Deform [5]: для исследования влияния скоростных диаграмм прокатки (треугольной и трапецеидальной) вращение валков было задано в виде функции (рис. 3).

Получены распределения силы (рис. 4) и момента прокатки и затраченной энергии (рис. 5) во время прохода. Расчет суммарной величины затраченной энергии в проходе и за весь цикл прокатки проводили численным интегрированием методом трапеций [6]. Экономия энергии при изменении скоростного режима прокатки за один проход составила: 0,57 кВт/ч. За 14 проходов экономия составит порядка 8 кВт/ч, что согласуется с результатом, полученным по аналитическим зависимостям.

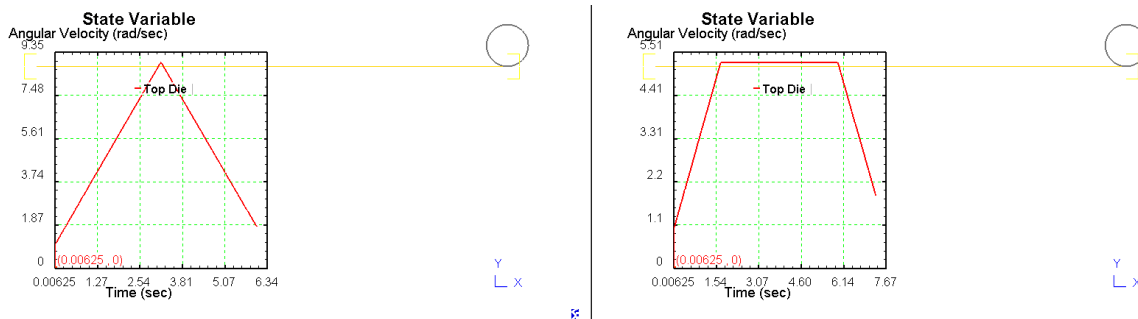


Рисунок 3 — Угловая скорость вращения вала в функции от времени (слева — существующая технология, справа — энергосберегающая)

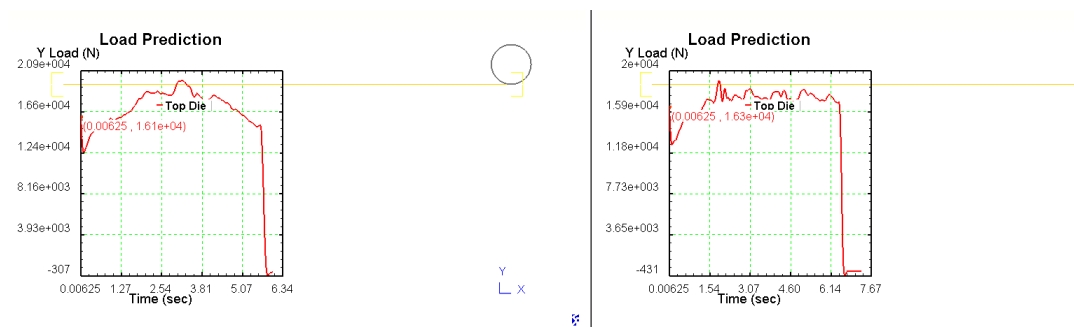


Рисунок 4 — Распределение силы прокатки (слева — существующая технология, справа — энергосберегающая)

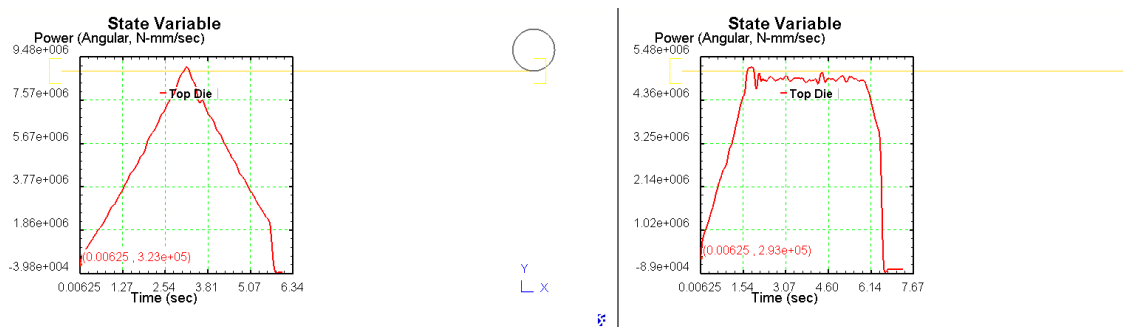


Рисунок 5 — Распределение затраченной энергии (Н·мм/с) в функции времени (слева — существующая технология, справа — энергосберегающая)

Таким образом, результаты расчета, выполненного с использованием программного комплекса Deform подтверждают возможность энергосбережения при изменении скоростного режима прокатки, а именно снижения максимальных оборотов двигателя при сохранении оборотов выброса и захвата (замены треугольной диаграммы прокатки на трапецидальную).

Список литературы

1. Скляр, В. О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учебное пособие / В. О. Скляр. — Донецк : ДонНТУ, 2014. — 224 с.
2. Зеленов, А. Б. Теория электропривода : учебное пособие / А. Б. Зеленов. — Алчевск : ДонГТУ, 2005. — Т. 2. — 513 с.
3. Денищенко, П. Н. Анализ влияния динамических характеристик главных приводов рабочих клеток толстолистого стана 3000 на энергосбережение при прокатке / П. Н. Денищенко, Н. П. Денищенко, А. А. Бевз // Научный форум: технические и физико-математические науки : сб. статей VIII международной научно-практической конференции. — М. : МЦНО, 2017. — № 7 (8). — С. 6–65.
4. Денищенко, П. Н. Программное и компьютерное обеспечение процессов ОМД : учебное пособие / П. Н. Денищенко, Н. П. Денищенко. — Алчевск : ДонГТИ, 2022. — 170 с.
5. Таупек, И. М. Общее руководство по работе с инженерным программным комплексом DEFORM : учебное пособие / И. М. Таупек. — Старый Оскол : Кириллица, 2015. — 217 с.
6. Турчак, Л. И. Основы численных методов : учебное пособие для студентов вузов / Л. И. Турчак, П. В. Плотников. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Физматлит, 2002. — 300 с.

Чичкан А. А.*к.т.н.,***Токарев А. В.***Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,***Луцкий М. Б.***к.т.н.**г. Тель-Авив, Израиль*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ С ПРОДОЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СТАНА «600» ФИЛИАЛА № 1 «АМК» ООО «ЮГМК»

В современных условиях рыночных отношений, наряду с возросшими требованиями к качеству продукции, особое внимание уделяется улучшению технико-экономических показателей и повышению эффективности производства. Перспективным направлением интенсификации процесса сортовой прокатки является использование процесса прокатки-разделения.

Основная масса прокатки с разделением относится к прокатке простых профилей (круг, квадрат, полоса, арматура). Для фасонных профилей также разработан вариант использования процесса прокатки-разделения, обеспечивающий выпуск из стана двух ниток профиля равнополочного уголка. На стане 550 завода Петровского продольное разделение раската производится делительным устройством, устанавливаемым на выходе из клетки 5. Последующая прокатка в клетях 6, 7 и 8 осуществляется в две нитки по действующей на стане калибровке. Ограничений по нагреву заготовок, температурным, скоростным и энергосиловым параметрам ожидать не следует, так как раскат из двух уголков № 7 по массе погонного метра и параметрам деформации близок к швеллеру № 16, прокатываемому на стане [1].

Чтобы исключить перепутывание раскатов после разделения и проблемную порезку двух раскатов на пилах горячей резки, разработан способ, заключающийся в прокатке сдвоенных профилей и разделении их в холодном состоянии, отличающийся тем, что с целью уменьшения усилий разделения при прокатке в плоскости разделения профилей создается продольный концентратор напряжения путем сдвига одной части профиля относительно другой (рис. 1) и последующего их возврата в исходное положение [2].

Рассмотрим возможность применения прокатки сдвоенного углового профиля в условиях стана «600» АМК [3]. Стан «600» — полунепрерывного типа, состоит из 15 рабочих двухвалковых клетей расположенных в 3 линии, передача между которыми производится цепными шлеперами, что не позволяет применить разделение сдвоенного профиля в черновых клетях. Поэтому возможно разделение либо в чистовой клетке, либо в специальном, отдельно стоящем устройстве. Для того, чтобы уйти от проблем с одновременной порезкой 2-х раскатов (невозможность подачи рычажным толкателем 2-х раскатов на порез пилами горячей резки), разделение раската лучше всего производить специальным устройством на входе в правильную машину. Предлагаемое устройство будет снабжено двумя парами роликов, в которых будет производиться знакопеременный излом полосы (рис. 2).

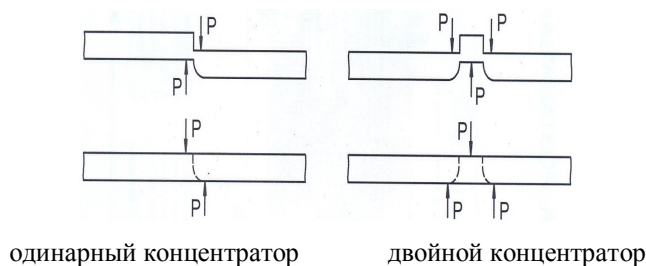
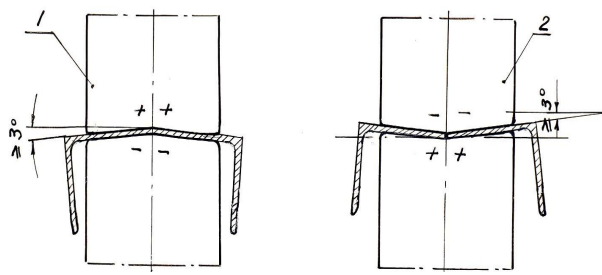


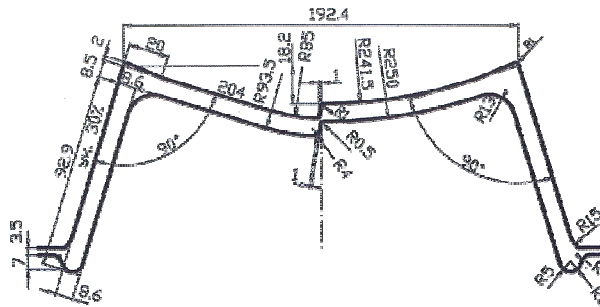
Рисунок 1 — Способы нанесения концентраторов



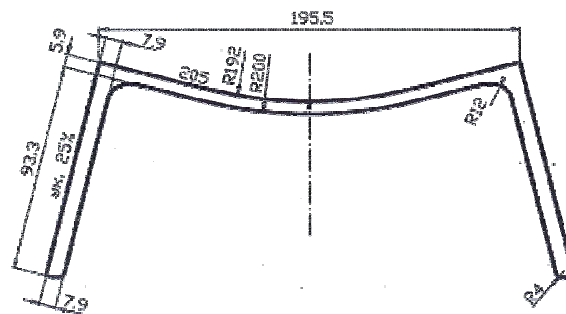
1 — первая пара роликов, 2 — вторая пара роликов

Рисунок 2 — Профилировка роликов устройства для разделения полосы

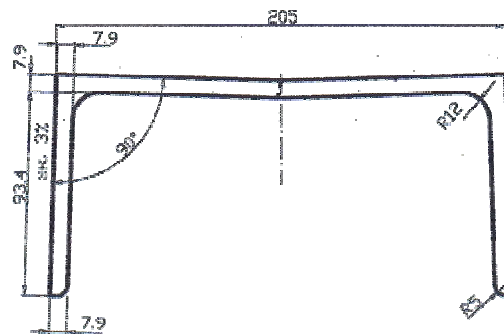
Предлагаемая схема производства будет состоять из прокатки специального профиля швеллерного типа с нанесением продольного концентратора напряжения специально откалиброванными валками клетки № 13Г. В последующей клетке (№ 16Г) производится сдвиг продольного надреза в обратном направлении, чистовая клетка (№ 17) подгибает фланцы и выравнивает стенку профиля (рис. 3).



калибр клетки № 13 с надрезом



калибр клетки № 16 с выравниванием



гибочный калибр клеть № 17

Рисунок 3 — Предлагаемая схема прокатки двоянного профиля

После прокатки, порезки на пилах горячей резки и охлаждения на холодильнике, сдвоенный профиль подается в ролики разделяющего устройства. Для удешевления конструкции возможно изготовление устройства с приводными только нижними роликами. После разделения две полосы уголка № 10 при помощи направляющих линеек одновременно будут заданы в ролики правильной машины 9×800. После правки и осмотра на инспекторском стеллаже готовые профили либо упаковываются для отгрузки, либо отправляются на отделочные участки для удаления заусенцев.

Однако при выполнении специальных продольных надрезов на раскате в клети № 13 с последующим выравниванием в клети № 16, возможно получение разрывов по линии надреза, что непременно приведет к аварийной остановке стана и возможным поломкам валков из-за их окова полосой. Для предупреждения таких ситуаций с использованием программного комплекса Deform 2d/3d была разработана модель процесса надреза-выравнивания швеллерного профиля в последних клетях стана 600, с определением критерия разрушения при заданных технологических параметрах.

Для моделирования использовались данные расчета калибровки швеллерного профиля (рис. 3) с нарезающим (клеть № 13) и выравнивающим (клеть № 16) калибрами, а также технологические параметры прокатки (скорость прокатки и температура раската по клетям). Все файлы геометрии готовились в программном комплексе Компас 3D. Затем они переносились в комплекс Deform 2d/3d (рис. 4).

Ввиду сложности формоизменения (надрез и выравнивание стенки швеллерного профиля) сетка конечных элементов задается достаточно густой — 150000 элементов со сгущением сетки в районе максимальных деформаций.

После ввода данных получили позиционирование раската относительно калибра (рис. 5).

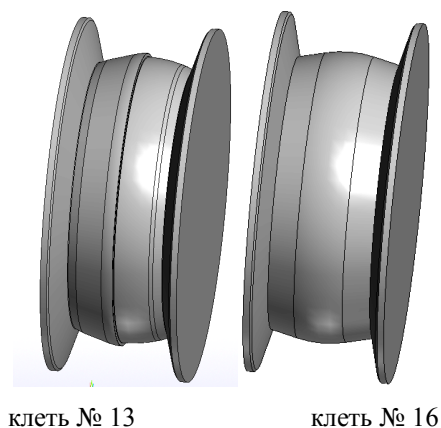


Рисунок 4 — Верхние валки с надрезом в клети № 13 и выравниванием в клети № 16

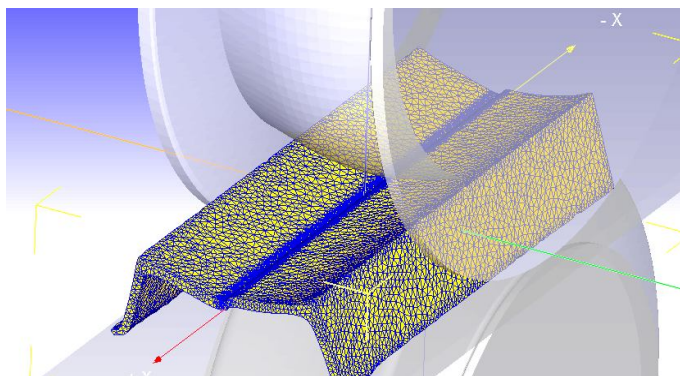


Рисунок 5 — Позиционирование раската в нарезающем калибре клети № 13

В результате запуска базы данных на моделирование получены графики усилий (рис. 6), моментов (рис. 7) и мощностей для клетей № 13 и № 16. Рассчитанные данные для прокатки сдвоенного углового профиля показали, что энергосиловые параметры не будут превышать допустимых значений, приведенных в технологической инструкции стана «600».

Также моделированием предусматривалось получение критериев продольного разрушения по сечению раската после второго (рис. 8, а), и первого (рис. 8, б) калибров.

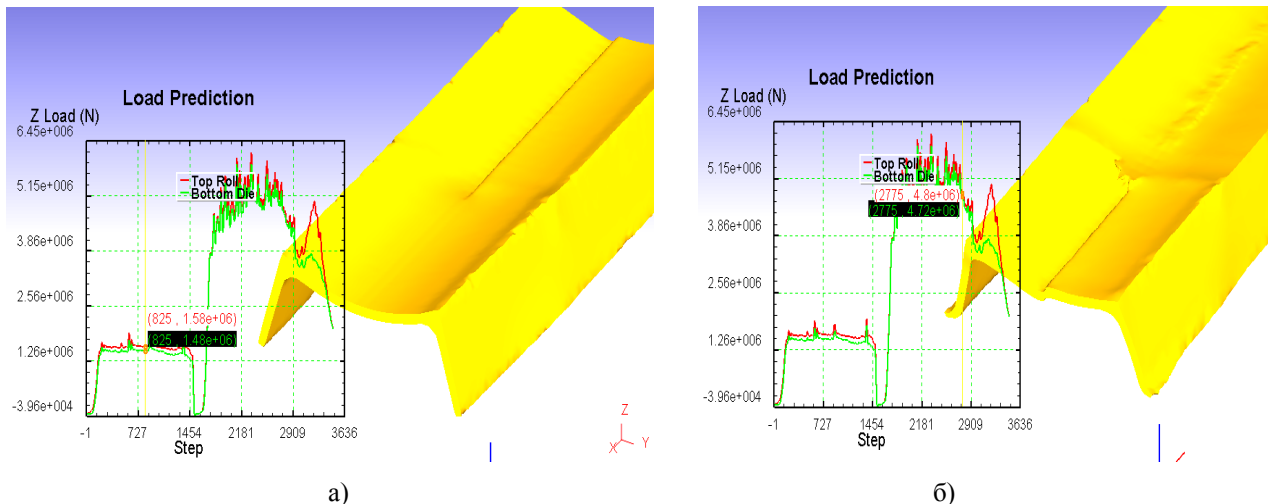


Рисунок 6 — Графики усилия на валках для клетей № 13 (а) и № 16 (б)

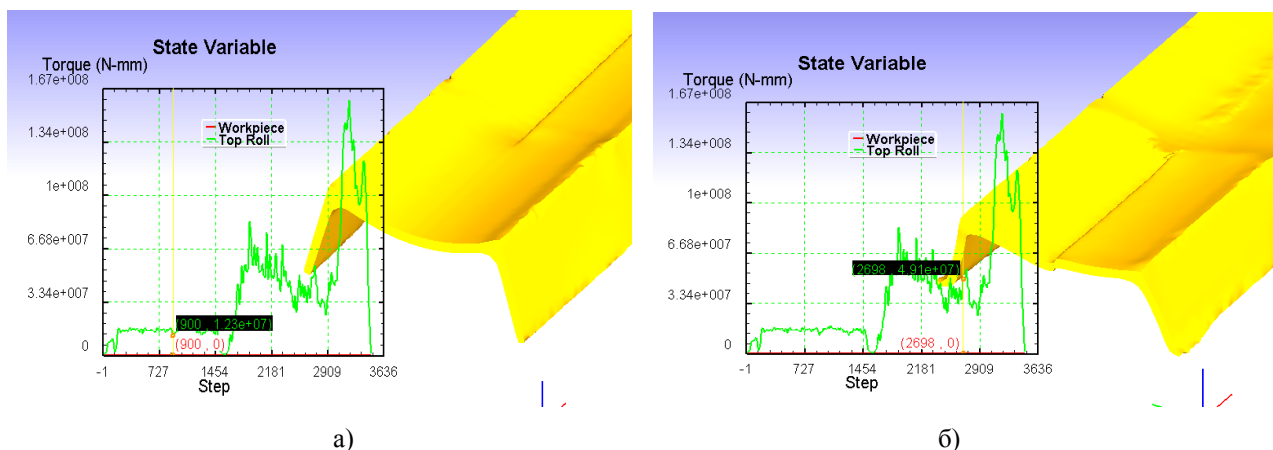


Рисунок 7 —Графики моментов на валках для клетей № 13 (а) и № 16 (б)

Анализ критерия разрушения после выхода раската из клетки № 13 показывает, что максимальное значение критерия разрушения находится около параметра 0,4. Опасная величина критерия разрушения для рядовых сталей составляет 0,6–0,7. Анализ критерия разрушения после выхода раската из клетки № 16 показывает, что максимальное значение критерия разрушения находится около параметра 2 (особенно на краях раската). Опасная величина критерия разрушения для рядовых сталей составляет 0,6–0,7.

Таким образом можно сделать вывод, что в клетки № 13, в которой выполняется продольный надрез, потери сплошности раската нет. После выхода из выравнивающего калибра клетки № 16 возможны появления разрывов на переднем и заднем концах швеллера, и концентрация очагов разрушения посередине раската (потеря сплошности), что значительно облегчает дальнейшее разделение швеллера на два уголка в холодном виде на специальном устройстве перед правильной машиной.

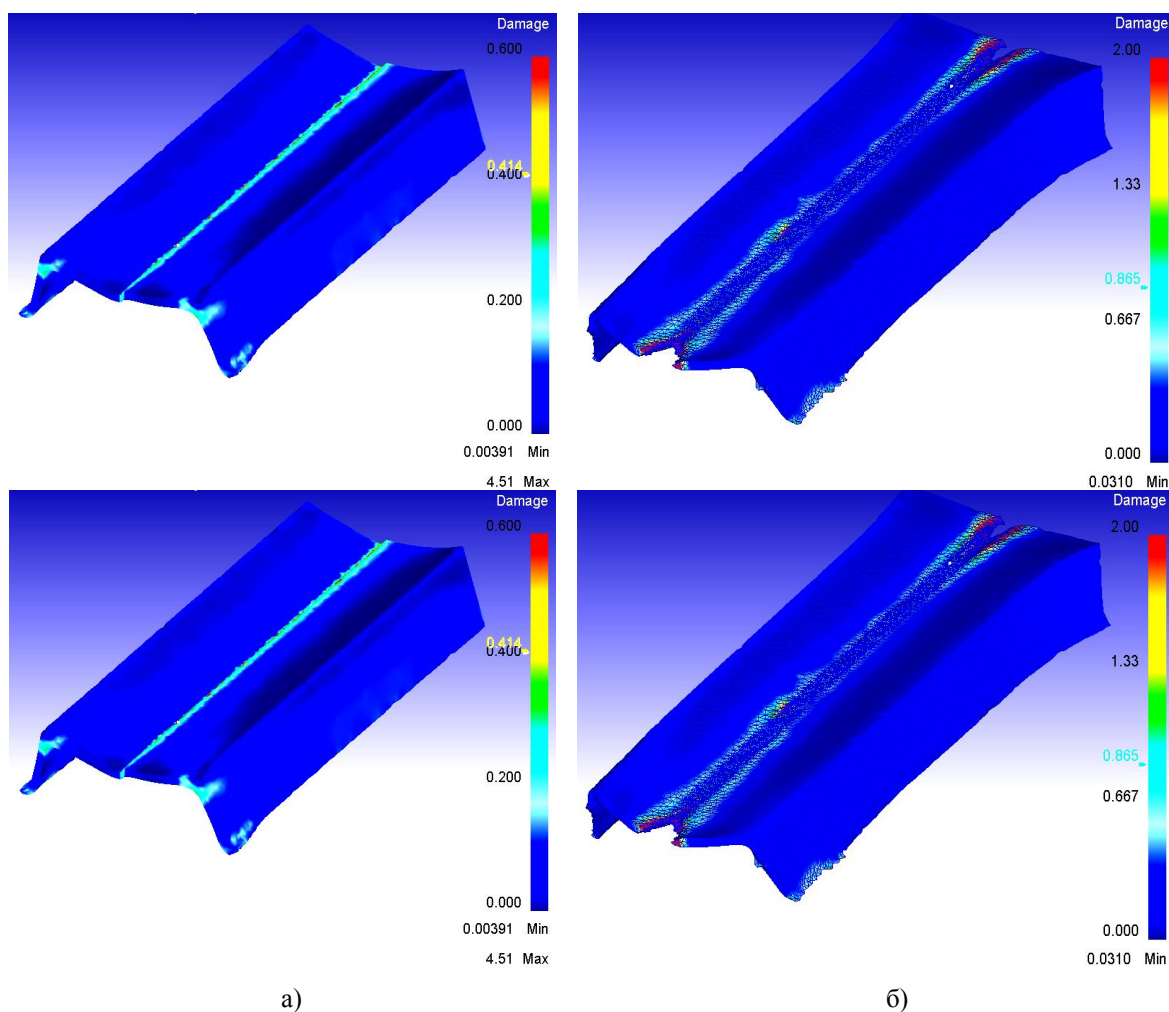


Рисунок 8 — Критерий разрушения по сечению раската: а) — для клетки № 13; б) — для клетки № 16

При изменении данных по геометрии надреза, а также любых из вводимых технологических параметров (величина обжатия, скорость прокатки, температура раската и др.) возможно получение необходимых критериев разрушения.

Эффективность использования процесса прокатки-разделения при производстве угловых профилей обеспечивается благодаря снижению себестоимости производства за счет увеличения производительности, уменьшения энергозатрат, расхода валков и др. показателей.

Список литературы

1. Следнев, В. П. Спаренная прокатка сортовых профилей / В. П. Следнев. — М. : Metallurgy, 1988. — 168 с.
2. Нефедов, А. А. Способ изготовления профильных изделий / А. А. Нефедов и др. // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки : бюллетень. — 1974. — № 10.
3. ТИ 229-ПС-036-64-2021. Производство сортовых и фасонных профилей проката на крупносортном стане «600». — Алчевск, 2021.

Рябичева Л. А.*д.т.н., профессор**Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР,***Коробко Т. Б.***к.т.н., доцент**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,***Королько В. В.***аспирант**Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР*

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ

В машиностроении имеется большое количество разнообразных деталей, к которым предъявляются высокие требования по точности изготовления и высокой твердости рабочего поверхностного слоя. Типичными и наиболее массовыми представителями данных деталей являются детали типа тел вращения: втулки, кольца, фланцы и т. д. К наиболее эффективным методам улучшения качества деталей относятся способы поверхностного пластического деформирования, в частности, дорнование.

Целью работы является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании отверстий в заготовках из порошковой меди и его влияние на структурообразование и твердость.

Компьютерное моделирование выполняли в пакете инженерного анализа Deform 10.2, в котором используется метод конечных элементов. Кривые упрочнения пористого материала рассчитываются на основе кривых упрочнения материала основы с учетом текущей пористости. На рисунке 1 показана картина распределения интенсивности напряжений в стенке полой детали с различной исходной пористостью материала при свободном дорновании.

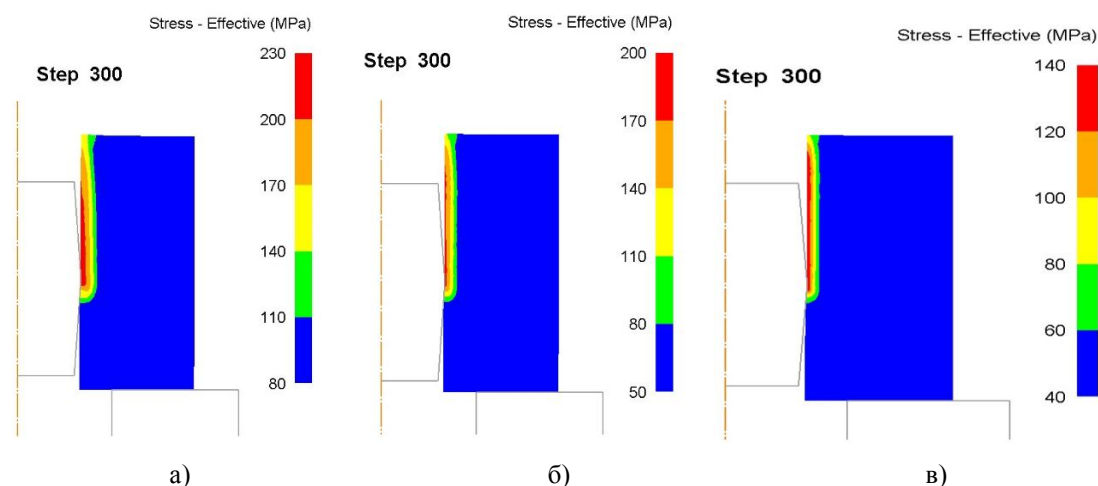


Рисунок 1 Распределение интенсивности напряжений в стенке полого цилиндра с исходной пористостью (а — 6 %; б — 15 %; в — 24 %)

Получены картины распределения интенсивности напряжений в стенке полого цилиндра с исходной пористостью 6 %, 15 % и 24 %. Как видно из рисунка 1, наибольшая интенсивность напряжений 220 МПа наблюдаются в очаге деформации при исходной пористости 6 %. С ростом пористости материала величина интенсивности напряжений уменьшается и при 24 % составляет 145 МПа. При дорновании напряжения на контактной поверхности заборного конуса дорна и детали обычно превышают величину напряжения текучести мате-

риала втулки σ_s или соизмеримы с ним. Поэтому для описания трения в таких условиях процесса использовали формулу Зибеля. Определяли интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, гидростатическое давление. Материал — медный порошок ПМС-1. Изучали микроструктуру, твердость по Бринеллю и микротвердость, по изменению которых, экспериментально можно судить о напряженном состоянии.

Для всех исследуемых случаев происходит рост гидростатического давления до некоторого увеличения очага деформации, который в данном случае трансформируется в очаг уплотнения. При этом гидростатическое сжатие обеспечивает уплотнение материала.

В результате дорнования во внешних слоях полый заготовки микроструктура металла претерпевает незначительные изменения, что связано с наличием некоторого гидростатического сжатия и дробления зерна за счет локального повышения внутренних напряжений.

Для внутреннего слоя образца после дорнования характерна вытянутость зерен в направлении перемещения дорна, обеспечивающего осевое течение металла. Деформационное упрочнение материала изучали методом измерения микротвердости.

С увеличением пористости образцов величина микротвердости уменьшается. Причиной является наличие остаточной пористости. При этом упрочнение охватывает толщину поверхностного слоя в пределах 1,6 мм для пористости 24 % и 2 мм для пористости 6 %. С повышением степени толстостенности наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя, что связано с ростом контактных давлений и гидростатического сжатия в этих слоях образцов. С повышением относительного натяга наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя и его толщина, что связано с ростом объема металла, участвующего в пластической деформации.

Таким образом, установлено влияние неравномерности напряженно-деформированного состояния на структурообразование и свойства. Микротвердость и толщина упрочненного слоя зависит от пористости и относительной толщины, от степени толстостенности и относительного натяга. Полученные данные доказывают возможность упрочнять рабочую внутреннюю поверхность порошковой заготовки путем свободного дорнования.

Список литературы

1. Проскураков, Ю. Г. Дорнование отверстий / Ю. Г. Проскураков. — М. : Машгиз, 1961. — 190 с.
2. Скворцов, В. Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра / В. Ф. Скворцов, А. Ю. Арляпов. — Томск : ТПУ. — 2005. — 92 с.
3. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. — М. : Машиностроение, 1987. — 328 с.
4. Воронцов, А. Л. Исследование процесса дорнования отверстий / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. — 2010. — № 10. — С. 3–8.
5. Алешин, А. В. Исследование характера течения металла при установке втулки в корпус с торцевым уплотнением методом дорнования / А. В. Алешин, А. М. Роговой, В. А. Хоменко // Ползуновский вестник. — 2002. — № 1. — С. 159–163.
6. Эволюция распределения плотности, накопленной деформации и топологических особенностей порошковых цилиндрических заготовок в условиях деформирующего протягивания / О. А. Розенберг, Е. А. Пашенко, А. П. Майданюк [и др.] // Сверхтвердые материалы. — 2008. — № 2. — С. 81–91.

*Рябичева Л. А.**д.т.н., профессор**Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР,**Дядичев А. В.**аналитик первой категории**Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, РФ*

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПЛОТНОСТЬ

В настоящее время в машиностроении актуальным является изготовление порошковых полых деталей с тонкой стенкой путем применения операций обработки давлением, которые обеспечивают высокое качество поверхности изделий и точность размеров. Исследования показывают влияние гидростатического давления на рост плотности при изготовлении высокоплотных изделий.

Основной целью данной работы было определение изменения относительной плотности по толщине стенки порошковых полых деталей путем компьютерного моделирования прямого выдавливания.

Для описания трения между заготовкой и деформирующим инструментом использовали закон Зибеля — $\tau_f = m\sigma_s$, где m — фактор трения; для процессов холодной деформации при наличии смазки дисульфида молибдена принято значение $m = 0,05$. Противодействие принимали 120 МПа.

Компьютерное моделирование прямого выдавливания выполняли на деталях с толщиной стенки 7; 4; 2 мм. Параметры заготовки: цилиндрический образец с размерами — $\varnothing 28,5 \times 26,3$ мм; высота полости изменялась в зависимости от толщины стенки, мм; относительная толщина стенки составила $b/h = 0,47; 0,27; 0,14$. Материал — медный порошок ПМС-1, исходная относительная плотность $\bar{\rho}_0 = 0,9$, исходная пористость 15 %.

В результате проведенных исследований были получены картины распределения относительной плотности при прямом выдавливании порошковой полых детали с толщиной стенки 7; 4; 2 мм. При выдавливании формируются два очага уплотнения: один занимает донную и кольцевую части детали и имеет относительную плотность равную 1; второй находится на торцевой части детали и имеет среднюю относительную плотность 96 %. При этом разноплотность на этих участках составляет 8 %.

Исследовано распределение гидростатического давления при прямом выдавливании с противодействием 120 МПа и разной толщиной стенки детали. Гидростатическое сжатие увеличивается с увеличением высоты полости и уменьшением стенки. Но деталь с тонкой стенкой можно получить несмотря на высокое гидростатическое давление.

Моделирование показало влияние гидростатического давления на уплотнение полых порошковой детали. Чем меньше толщина стенки, тем больше гидростатическое сжатие по всей высоте стенки. При этом уменьшается высота участка с неравномерной плотностью. Это уменьшение составляет 0,68 %. Такие исследования показывают возможность получать порошковые полые детали с тонкой стенкой.

Для оценки равноплотности образцы разрезали на три части: донную, кольцевую и торцевую (рис. 1).

Анализ относительной плотности показал, что при выдавливании без противодействия при различной глубине полости она мало отличается в донной части. В кольцевой части относительная плотность при $b/h = 0,47$ отличается приблизительно на 3 %, а в торцевой части — на 8,9 %. Такие данные свидетельствуют о значительной неравноплотности по объему образца при прямом выдавливании без противодействия. При выдавливании с противо-

давлением 120 МПа и том же соотношении размеров сравнение относительной плотности донной и торцевой частей показывает, что они отличаются на 2,6 %, что свидетельствует о наличии неравноплотности (табл. 1).

Распределение плотности при прямом выдавливании полых детали с толщиной стенки 7 мм показано в таблице 1.



Рисунок 1 Образцы для анализа равноплотности: а — донная, б — кольцевая, в — торцевая части

Таблица 1 — Распределение плотности в объеме порошковой полых детали

Толщина стенки детали, мм	Среднестатистическая плотность, г/см ³		
	донной части	угловой части	по толщине стенки
7	8,84	8,87	8,94
4	8,89	8,90	8,94
2	8,94	8,94	8,94

При проектировании технологического процесса изготовления порошковых полых деталей с тонкой стенкой рекомендуется назначать припуск по торцевой части детали, величина которого соизмерима с припуском по ГОСТ, с последующим его удалением.

Список литературы

1. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. — М. : Металлургия, 1972. — 528 с.
2. Рябичева, Л. А. Применение теории пластичности пористых тел к анализу связи пористости с осевой деформацией при свободной осадке / Л. А. Рябичева, О. П. Гапонова // Вісн. Східноукр. Націон. ун-ту. — 2008. — № 8 (126). — Ч.2. — С. 21–27.
3. Скороход, В. В. Актуальные проблемы континуальной теории и структурного моделирования процессов деформации порошков и пористых тел / В. В. Скороход // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. — К. : Наук. думка, 1985. — С. 6–11.
4. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий / Ю. Проскуряков. — М. : Машгиз, 1961. — 190 с.
5. Грин, Р. Дж. Теория пластичности пористых тел / Р. Дж. Грин // Механика. — 1973. — № 4. — С. 109–120.
6. Aboaf, M. Modelisation numerique de la deformationa chaud de poudres metalliques / M. Aboaf, J.T. Chenot // Journal of theoretical and applied mechanics. — 1986. — № 5. — P. 121–140.
7. Рябичева, Л. А. Экспериментальное исследование противодавления при выдавливании полых деталей из порошковой пористой заготовки / Л. А. Рябичева, Т. Б. Коробко, А. В. Дядичев // Сб. науч. трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 68. — С. 21–25.

Космина А. В.
аспирант,
Митичкина Н. Г.
к.т.н., доцент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГОФРОВ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ

Полые цилиндрические изделия с дном и без дна, получаемые обычно формоизменяющими операциями листовой штамповки, такими как вытяжка, формовка, отбортовка отверстий и др., применяются в различных отраслях народного хозяйства. В некоторых случаях стенкам цилиндра необходимо придать определенную форму, например полую резьбу или повторяющийся профиль круглой или другой конфигурации. К таким деталям можно отнести, например, сильфоны, цоколи и патроны электрических ламп и др. [1]. Они могут быть изготовлены с помощью локальной деформации, например накатки [2] или с помощью штампов с использованием эластичной среды в разъемных матрицах [3], а при большой длине изделия — посредством последовательного формообразования.

Процесс накатки профиля требует специального оборудования, а в условиях мобильности производства и дискретно-нестабильных программ предприятию необходимо снижение простоев уже имеющегося прессового оборудования. Поэтому использование штампов для изготовления профилированных изделий из цилиндрических заготовок позволит использовать прессы простого действия, которые не задействованы или частично задействованы сейчас в связи с экономическим положением на предприятиях.

Получение профилей, гофр, полых резьб с помощью формовки эластичной средой, как правило, происходит в разъемных матрицах. При большой длине заготовки деформируется только часть трубчатой заготовки путем перемещения свободного участка трубчатой заготовки на один шаг и тангенциального растяжения участка кольца трубы. Осевое перемещение свободного участка трубы способствует наименьшему утонению стенки на вершине гофра [4].

После оформления одного гофра матрицы размыкают, заготовку перемещают на один шаг и цикл повторяется. Для того чтобы исключить утяжку и искажение уже оформленного гофра, обеспечить заданный шаг расположения гофров, предварительно оформленный гофр вторично деформируют, осуществляя его калибровку и фиксацию шага [4].

С уменьшением радиуса на вершине гофра и диаметра заготовки необходимое для деформирования давление эластичного инструмента будет возрастать. Поэтому для уменьшения давления можно проводить гофрирование с максимальным радиусом у вершины и затем принудительно сближать гофры на специальной калибровочной оправке в осевом направлении до получения заданного радиуса вершины гофра [5].

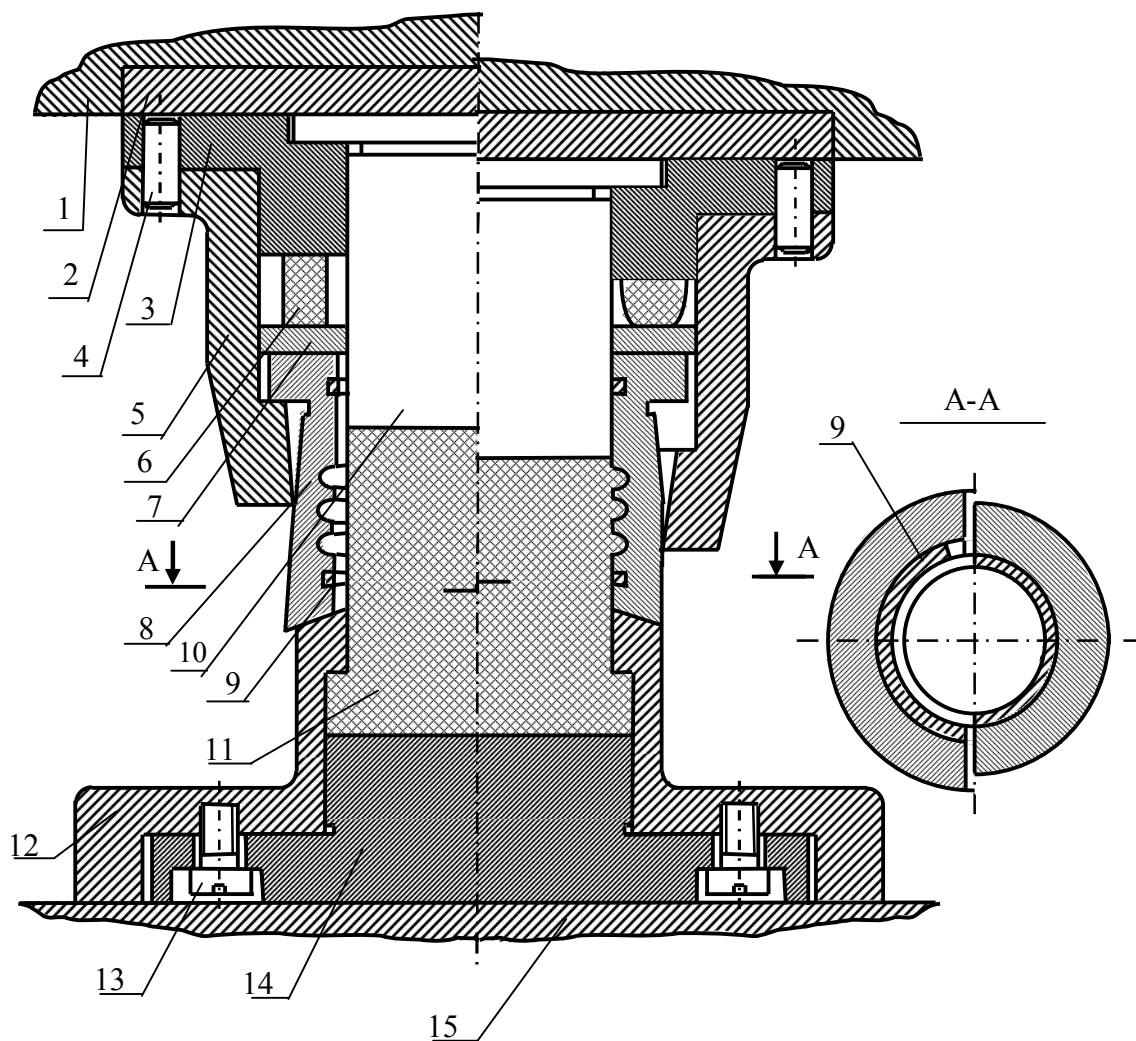
Для изготовления сильфонов крупных размеров в машиностроении применяются специальные гидравлические установки [6].

Как уже упоминалось, после получения каждого гофра матрицы необходимо размыкать, что повышает трудоемкость процесса. Использование секционных разжимных матриц решит эту задачу, по аналогии с разжимными пуансонами, представленными в работе [7]. Предложено использование штампа, представленного на рисунке 1, позволяющего исключить разбор штампа после формовки профиля на цилиндрической заготовке. В левой части рисунка показано положение инструмента перед смыканием полуматриц вокруг заготовки, а в правой части — в конце процесса. Рассмотрим конструкцию и принцип работы такого штампа на примере нанесения резьбы Эдисона при изготовлении цоколя.

Штамп работает следующим образом. Предварительно вытянутый полуфабрикат, с отбортованным в его центральной части отверстием, одевают на эластичный пуансон таким

образом, чтобы вытянутой частью он упирался в пуансонодержатель 12. При совершении рабочего хода вниз, состоящая из двух половин матрица 8 одевается на вытянутую горловину и прижимает последнюю к пуансонодержателю 12. Матрицедержатель 5 обжимает полуматрицы 8 вокруг сформированной горловины. При этом они воздействуют на металлическую шайбу 7, которая упруго деформирует выполненный из резины буфер 6 и перемещается навстречу движению пуансона 10. В то же время происходит сжатие пуансона 11, выполненного из полиуретана. При дальнейшем ходе штампа вниз полуматрицы 8 запираются матрицедержателем 5, а под действием пуансона 10, эластичный пуансон 11 начинает упруго сжиматься и, тем самым, выдавливать металл в канавки для навивки резьбы Эдисона, расположенные с внутренней стороны полуматриц 8.

После окончания штамповки штамп раскрывается и полуматрицы 8 возвращаются в исходное положение. Их раскрытию способствуют распружинивающие кольца 9, которые установлены с внутренней стороны сверху и снизу полуматриц 8. В результате раскрытия полуматриц цоколь легко снимается с пуансонодержателя.



- 1 — верхняя плита штампа; 2 — подкладная плита; 3 — пуансонодержатель; 4 — штифт;
 5 — матрицедержатель; 6 — буфер; 7 — шайба; 8 — полуматрица; 9 — распружинивающие кольца;
 10 — пуансон; 11 — эластичный пуансон; 12 — пуансонодержатель;
 13 — винт; 14 — вставка; 15 — нижняя плита

Рисунок 1 — Схема штампа для формирования резьбы Эдисона

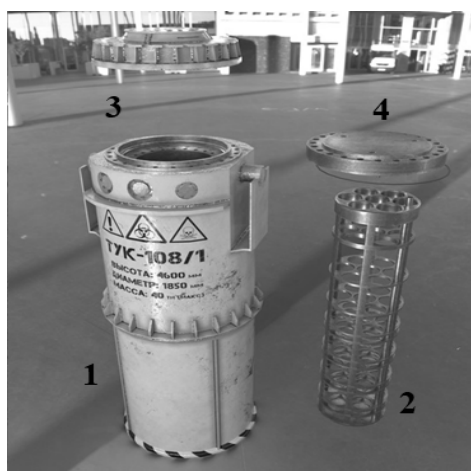
Таким образом, предложена схематическая конструкция штампа для получения гофр на цилиндрической заготовке ограниченной длины эластичным пуансоном в секционной, самораскрывающейся матрице, позволяющая снизить трудоемкость изготовления такого типа изделий. Однако количество одновременно получаемых гофр ограничено растяжением деформируемой заготовки.

Список литературы

1. Добровольский, И. Г. Современная технология изготовления сильфонных заготовок // *Металлургия*. — Минск, 1990. — № 24. — С. 106–109.
2. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. — Л. : Машиностроение, 1980. — 432 с.
3. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. — 6-е изд., перераб. и доп. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. — 520 с.
4. Смирнов-Аляев, Г. А. Холодная штамповка в приборостроении : учеб. для вузов / Г. А. Смирнов-Аляев, Д. А. Вайнтрауб. — М. : Машгиз, 1963. — 435 с.
5. Попов, Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки : учеб. для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. — М. : МГТУ, 2003. — 480 с.
6. Исаченков, Е. И. Штамповка резиной и жидкостью / Е. И. Исаченков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1967. — 367 с.
7. Аверкиев, Ю. А. Технология холодной штамповки : учебник для вузов / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. — М. : Машиностроение, 1989. — 304 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В настоящее время актуальна проблема утилизации ядерного топлива, отслужившего свой срок, надводных кораблей и ледоколов с атомной энергетической установкой. Проблему составляет выгрузка, транспортировка к месту хранения и хранение активной зоны ядерных реакторов. Для решения этой проблемы разработаны металлобетонные контейнеры транспортно-упаковочного комплекта ТУК–108/1, МБК (рис. 1).



1 — силовой стакан; 2 — дистанционирующая решетка; 3 — внешняя крышка; 4 — внутренняя крышка

Рисунок 1 — Транспортно-упаковочный контейнер для отработанного ядерного топлива, ТУК-108/1

Металлобетонный контейнер транспортно-упаковочного комплекта ТУК МБК предназначен для длительного хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) атомных ледоколов и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками. Он состоит из корпуса, дистанционирующей решетки, внутренней и наружной крышек. Наиболее ответственным узлом ТУК МБК является внутренняя крышка, представляющая собой поковку из стали 09Г2СА–А ООО ОМЗ «Спецсталь» ТУ 05764417-064-97 с наплавкой аустенитной стали 08Х19Н10Г2Б.

Наибольшую трудность представляет наплавка перехода от основного слоя 09Г2СА–А к облицовочному 08Х19Н10Г2Б, так как разбавление этого слоя металлом основного (низколегированного) слоя резко снижает его коррозионные и механические свойства. Поэтому наплавку облицовочного слоя производят через подслой 07Х25Н13, имеющий повышенную аустенитность, применяя наплавочные проволоки и электроды с повышенным содержанием никеля и хрома, компенсирующим разбавление наплавленного металла основным металлом. Данная технология имеет ряд недостатков.

В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка ресурсосберегающей технологии наплавки и новых сварочных материалов, облицовочного слоя внутренней крышки транспортно-упаковочного контейнера (ТУК) для хранения отработанного ядерного топлива.

Используя принцип ресурсосбережения, экономного использования такого дорогостоящего и стратегически важного элемента как никель, разработана новая технология наплавки переходного, облицовочного слоя внутренней крышки ТУК МБК с регулируемым

термическим циклом. Технология основана на введении в жидкий металл сварочной ванны внутренних стоков тепла в виде дополнительной холодной охлаждающей присадки (макрохолодильников) ДХП.

Регулирование теплового цикла ручной дуговой наплавки, переходного и облицовочного слоя, сталей 09Г2СА–А+ЗИО–8+ЭА–898/21Б (09Г2СА–А+Э–10Х25Н13Г2+Св–08Х19Н10Г2Б) осуществлялось применением специальных трубчатых электродов с макрохолодильником идентичного химического состава. Способ реализуется следующим образом. В процессе наплавки корпус трубка и флюс плавится, температура дугового промежутка пережигает перемычку макрохолодильника, макрохолодильник попадает в наплавочную ванну расплавляется, тем самым поглощает паразитное тепло наплавки. Доля макрохолодильника в электроде составляет 90–100 % от массы металла трубки электрода ($DХП_{макр} = 90 - 100\%$).

Скорость принудительного, сопутствующего охлаждения при этом процессе составила 60–65 °С/с в интервале 500–900 °С ($W_{охл} 500-900 = 60-65$ °С/с).

Применение способа ручной дуговой наплавки, с дополнительной холодной присадкой (макрохолодильником) позволяет на 48 %, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с $F_{ш} = 16$ мм² до $F_{ш} = 30$ мм²), тем самым на 25 % уменьшить количество наложения наплавочных валиков без увеличения погонной энергии сварки. Использование макрохолодильников в наплавочных материалах РДН позволило исключить использование более дорогих электродов ЗИО–8 (Э–10Х25Н13Г2) при сварке переходного слоя с заменой их на электроды ЭА–898/21Б (Св–08Х19Н10Г2Б), обеспечивая оптимальную аустенитно-ферритную структуру наплавочных валиков. Содержание в структуре магнитной фазы составило — 5 %.

На образование дугового наплавочного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая его часть расходуется на перегрев наплавочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями, что приводит к ухудшению свойств наплавочного слоя. Решая эту проблему, была разработана и исследована оптимальная технология наплавки переходного и облицовочного слоя внутренней крышки ТУК МБК, состоящей из сталей 09Г2СА–А+08Х19Н10Г2Б, с вводом в жидкий металл наплавочной ванны дополнительной холодной присадки ДХП (макрохолодильников), позволяющая рационально использовать всю теплоту сварочной дуги, получать качественные наплавочные соединения.

Использование дуговой наплавки ДХП позволяет, увеличить площадь поперечного сечения наплавочного валика тем самым уменьшить количество проходов и тепловое воздействие на сталь при формировании разнородного соединения, без увеличения погонной энергии сварки.

Список литературы

1. Патон, Б. Е. Многослойная сталь в сварных конструкциях / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. К. Цыгуленко. — К. : Техника, 1984. — 284 с.
2. Закс, И. А. Сварка разнородных сталей / И. А. Закс. — Л. : Машиностроение, 1973. — 208 с.
3. Гальцов, И. А. Сварка плакированной стали : монография / И. А. Гальцов, А. В. Каленская. — Тамбов : Минобрнауки России, САФУ им. М. В. Ломоносова, 2021. — 164 с.
4. Гальцов, И. А. Применение ИСЕ–технологии при ремонтной наплавке крановых колес / И. А. Гальцов, А. Н. Воробьев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. — Луганск : Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. — № 1 (38). — С. 42–48.

Горецкий Ю. В.
старший преподаватель
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,
Осипенко А. А.
заместитель начальника ТЛЦ № 2 по технологии
Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ С ПОВЕРХНОСТИ ГОТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОРРОЗИИ В УСЛОВИЯХ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА «3000» ФИЛИАЛА № 1 «АМК» ООО «ЮГМК»

Одним из направлений, обеспечивающим выпуск качественной прокатной продукции, является эффективное удаление окалины с поверхности заготовок и готового проката при прокатке и после этапа деформирования. При обработке металлов давлением окалина, образующаяся на поверхности горячего металла, создает довольно серьезные проблемы. Окалина по своим физическим свойствам отличается от основного металла, и поэтому она затрудняет дальнейшую обработку изделия, а также снижает его качество и устойчивость при использовании готовой продукции [1]. Таким образом, борьба с окалиной является одним из направлений снижения брака, повышения качества прокатной продукции.

Анализ состояния поверхности листов (стали типа 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2 и др.) прокатанных на стане «3000» АМК, показывает, что поверхность проката характеризуется наличием растрескавшейся окалины и присутствием очагов явной коррозии. Проявляется дефект или после хранения на складе (в течение нескольких суток) или уже у потребителя после его транспортировки. Проведенные исследования показали, что данный дефект является продуктом электрохимической коррозии [2].

Металлографическими исследованиями выявлено, что на вид и состояние окалины формируемой на стане «3000» влияние оказывает режим охлаждения. Окалина на поверхности листа охлаждаемого на воздухе плотная, хорошо соединена с живым металлом. Применяемая же на стане «3000» технология контролируемой прокатки с использованием системы ускоренного контролируемого охлаждения металла (УКО) после последнего прохода, оказывает значительное влияние на формирование воздушной окалины. Резкое охлаждение металла после последнего прохода водой приводит к значительным объемным изменениям не только металла, но и окалины. Сплошность окалины нарушается, она становится рыхлой, легко разрушается на локальных участках поверхности раската (рис. 1).

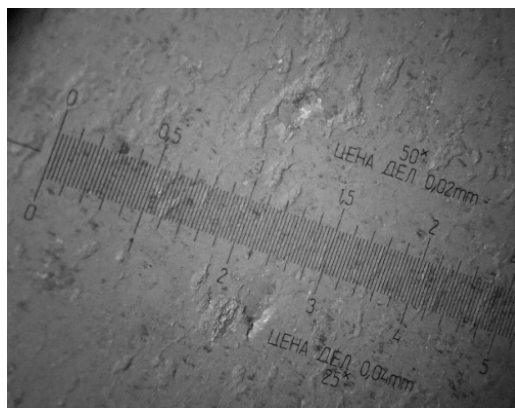


Рисунок 1 — Растрескивание и вздутие окалины на поверхности листа прокатанного с использованием установки УКО

Важным направлением развития технологии, обеспечивающим выпуск качественной прокатной продукции, является эффективное удаление окалины с поверхности заготовок и готового проката при прокатке и после деформации.

Для стана «3000» АМК можно предложить следующие мероприятия по удалению окалины с поверхности прокатанного металла. После проведения окончательной обработки металла в линии стана, т. е. после выхода из чистовой клетки или для некоторых марок сталей после установки ускоренного охлаждения (УКО) он передается в термоотделение.

В термоотделении имеется четыре роликовые термические печи, предназначенные для нагрева листовой стали под нормализацию, закалку и отпуск. Металл в проходной печи подвергается термообработке без защитной атмосферы; топливом служит природно-доменная смесь, температура в печи составляет 600–1150 °С, скорость перемещения листа через печь 0,1–1,0 м/с в зависимости от толщины листа, может применяться режим покачивания, время пребывания листов в печи 16–100 мин.

Для разрыхления окалины в процессе термообработки предлагается способ обрызгивания листовой стали перед нормализацией водным раствором поваренной соли.

При температуре в печи 950 °С поваренная соль находится в расплавленном состоянии (температура плавления 800 °С), но не разлагается. Водный раствор соли необходим для образования равномерной мелкодисперсной пленки соли на поверхности листов после испарения воды в печи; концентрация раствора NaCl определяет толщину расплавленной пленки соли. Исследования показали, что концентрация водного раствора соли в пределах 18–20 % является достаточной для эффективного разрыхления окалины, образующейся в процессе нормализации на поверхности листов [3].

При нагреве в печи происходит окисление поверхностного слоя металла. Особенно интенсивно этот процесс идет при температуре более 570 °С, когда образуется закись железа и начинается диффузионный процесс проникания атомов кислорода в поверхность чистого железа и атомов железа во внешние слои окалины. Пленка расплавленной соли на поверхности листов оказывает сильное воздействие на характер этого процесса.

Наличие расплава соли на поверхности листов изменяет отношение высших окислов и закиси железа ($(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4)/\text{FeO}$) в среднем с 1,5 до 3,2. Химических превращений в окалине при применении водного раствора NaCl не происходит [3].

Качественное изменение состава окалины приводит к объемным изменениям в слое окалины, что вызывает появление внутренних напряжений [1; 3]. По выходе из печи листы быстро охлаждаются на воздухе. Вследствие различного объемного сокращения металла и окалины, а также дополнительного воздействия возникших внутренних напряжений, происходит растрескивание окалины и ее отслоение на всей поверхности листов.

На рисунке 2 приведена предлагаемая схема установки для удаления воздушной окалины с поверхности готового листа.

После чистовой клетки или агрегата контролируемого охлаждения листов (УКО), раскаты передаются в термоотделение. Непосредственно перед печью нормализации смонтирована установка для двустороннего обрызгивания листов водным раствором технической поваренной соли концентрацией 18 %. Удельный расход соли составляет 2 кг/т листового проката.

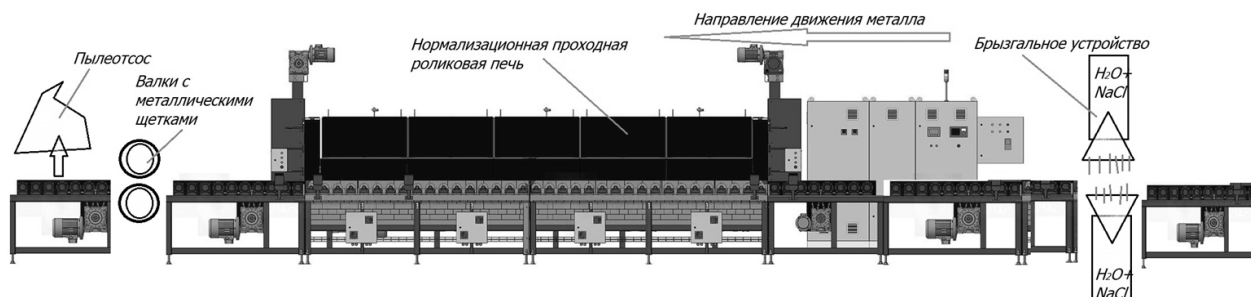


Рисунок 2 — Участок термоотделения (проходная печь) с устройством удаления воздушной окалины

После обрызгивания раската солевым раствором и прохождения им нормализационной печи, раскат попадает в следующую часть установки, которая представляет собой станину в которой размещены два вала с щеточными элементами. Между валами перемещается раскат. Верхний вал с щетками имеет возможность регулирования по высоте, тем самым происходит его позиционирование в зависимости от обрабатываемой толщины листа. В качестве щеток могут использоваться распушенные металлические канаты. Качество удаления окалины определяется плотностью расположения на поверхности вала щеточных элементов. Удаляемая с поверхности листа окалина, имеющая рыхлое строение, будет представлять мелкодисперсную пыль, которая удаляется из зоны обработки с помощью мощных пылеотсосов. В приемных бункерах происходит ее увлажнение и дальнейшее удаление для последующей переработки. Удаленная с поверхности готового листа рыхлая окалина, таким образом, перестанет быть источником последующих интенсивных коррозионных процессов.

Полное удаление окалины позволит получить высокое качество поверхности листа и в последующем избежать интенсивного проявления коррозионных процессов на этапе хранения продукции и при передаче потребителю.

Список литературы

1. Северденко, В. П. Окалина при горячей обработке металлов давлением / В. П. Северденко, Е. М. Макушок, А. Н. Равин. — М. : Металлургия, 1997. — 208 с.
2. Горецкий, Ю. В. Исследование причин повышенной коррозии поверхности готового листового проката для труб класса прочности K56 в условиях толстолистового стана «3000» филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» / Ю. В. Горецкий, П. Н. Денищенко, А. А. Осипенко // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сб. тезисов докл. V междунар. науч.-тех. конф. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». — 2020. — С. 145–149.
3. Карагодин, Н. Н. Удаление печной окалины с поверхности нормализованной листовой стали / Н. Н. Карагодин, М. И. Игонькин, Г. Г. Кустобаев // Сталь. — 1974. — № 12 — С. 1106–1108.

Коваленко О. А.
к.т.н., доцент,
Горецкий Ю. В.
старший преподаватель,
Сибилева В. С.
магистрант

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТИТНОЙ ФАЗЫ НА ЗАРОЖДЕНИЕ ЗЕРЕН АУСТЕНИТА В ПЛАСТИНЧАТОМ ПЕРЛИТЕ СТАЛИ

Одним из определяющих факторов, оказывающих влияние на структуру стали и комплекс механических свойств, является процесс формирования начального зерна аустенита при ее термообработке.

Существует несколько точек зрения на процесс образования аустенитных зерен при нагреве выше точки A_{c1} . Автором работы [1] представлены две противоположные гипотезы формирования зародышей аустенита. Диффузионная гипотеза указывает на то, что зародыш аустенита образуется сразу же в равновесном состоянии. При этом зародыш аустенита образуется из фрагмента феррита, предварительно обогатившегося углеродом до равновесного состава (0,8 % C), далее следует перестройка кристаллической решетки. Вторая гипотеза основывается на обратном процессе. Первоначально происходит бездиффузионная перестройка кристаллической решетки феррита в аустенит и, только после этого, идет насыщение аустенита углеродом за счет растворения цементита.

Обе эти гипотезы не учитывают активную роль цементитной фазы, которая при обезуглероживании превращается в аустенит. Автор работ [2–4], проведя металлографические и высокотемпературные рентгеновские исследования показал, что цементит может превращаться в аустенит при температурах существенно более низких, чем точка A_{c1} . Область цементита, отдающая атомы углерода в феррит, будет представлять формирующийся слой аустенита, являющейся своеобразной подложкой, на которой легко образуется зерно аустенита.

Практический интерес представляет исследование начальных стадий аустенитизации пластинчатого перлита. Достоверные данные о местах предпочтительного образования зародышей аустенитной фазы позволят выбрать такую исходную структуру стали, которая обеспечит получение мелкого зерна стали.

В качестве исследуемой стали рассматривался сплав заэвтектоидный, содержащий 1,0 % углерода. Исходные образцы подвергнуты отжигу на пластинчатый перлит; структура: перлит и цементит вторичный в виде оболочки. Исследуемые образцы медленно нагревали в электропечи до температуры 730 °C (A_{c1}) и по достижении данной температуры, через каждые последующие 30 секунд, производили закалку в подсоленной воде. Термообработанные образцы шлифовали и методом электрополировки готовили микрошлифы. Химическое травление шлифов производили 5 % раствором азотной кислоты в спирте. Металлографический анализ микрошлифов производили на металлографическом микроскопе МИМ-8м при увеличении 1440 раз.

На рисунке 1 приведены фотографии микроструктуры закаленных образцов с исходной структурой пластинчатого перлита. Самая короткая выдержка при закалочной температуре — 30 с (рис. 1, а) уже выявила начальные стадии образования аустенитных зерен. Эти зерна (после закалки — мартенсит) находятся на стыке перлитных колоний или у границ зерна, где располагается сетка вторичного цементита.

С увеличением продолжительности выдержки (рис. 1, б) аустенитные зерна разрастаются и фронтально движутся поперек перлитных колоний, оставляя за собой нерастворившиеся участки ферритной фазы (рис. 1, б).

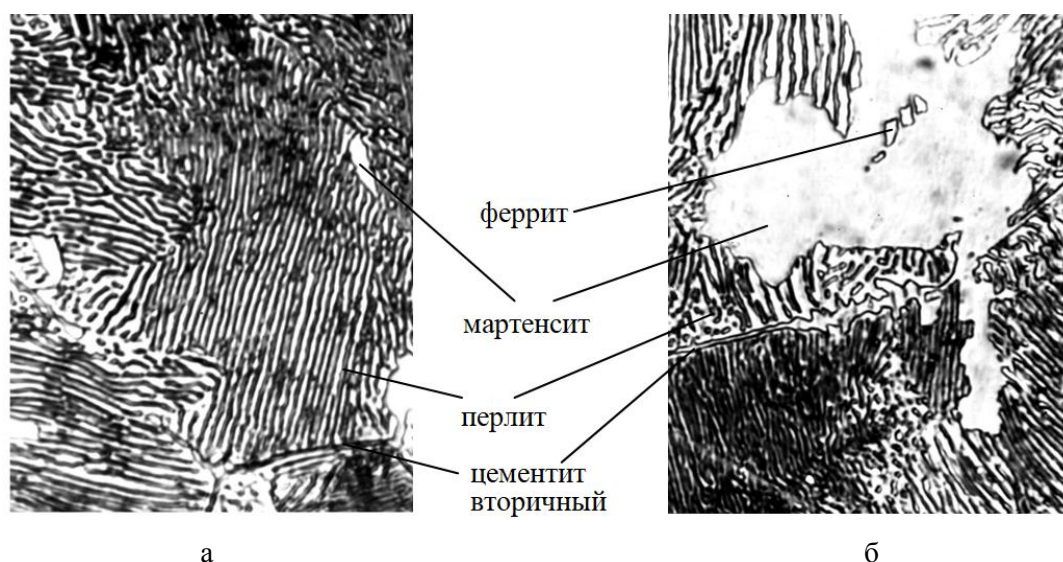


Рисунок 1 — Микроструктура закаленных образцов заэвтектоидной стали с выдержкой при аустенизации: 30 с (а); 1,5 мин (б). Исходное состояние перед закалкой — пластинчатый перлит. Светлые участки при нагреве — аустенит, после закалки — мартенсит; 1440^x

Анализ большого числа различных участков микрошлифа показал, что в перлитной структуре зарождение аустенитной фазы преимущественно идет у границ зерен, особенно, если на границе находится цементитная фаза.

Так же наблюдается срастание кристаллов аустенита, проросших от границы (где имелся цементит вторичный) вглубь зерен перлита (рис. 1, б)

Результаты проведенного металлографического исследования подтверждают активную роль цементитной фазы в начальных стадиях зарождения аустенита в перлитной структуре стали. Следовательно, критическая точка A_{c1} будет обозначать начало аустенизации с цементитной фазы стали и только после этого произойдет процесс перестройки ферритной составляющей структуры.

Список литературы

1. Дьяченко, С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко. — М. : Металлургия, 1982. — 128 с.
2. Ершов, В. М. Высокотемпературное рентгеновское исследование процесса аустенизации железоуглеродистых сплавов / В. М. Ершов // Физика металлов и металловедение. — 1982. — Т. 54. — Вып. 6. — С. 1147.
3. Ершов, В. М. Высокотемпературное рентгеновское исследование превращения цементита в аустенит / В. М. Ершов // Физика металлов и металловедение. — 1983. — Т. 55. — Вып. 3. — С. 605.
4. Бунин, К. П. О превращении цементита в аустенит / К. П. Бунин, В. М. Ершов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1976. — № 5. — С. 50.

*Полякова Д.
студентка 4-го курса,
Каунова С. А.
преподаватель*

Железногорский горно-металлургический колледж, г. Железногорск, РФ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОЦЕССА ORIEN

Ресурсо- и энергосбережение в настоящее время является наиболее важным направлением развития сталелитейного производства. Решая задачи этого направления, можно значительно снизить себестоимость продукции. При этом наиболее важным является сокращение времени плавки и, как следствие, расхода электроэнергии. Существующая (классическая) технология производства стали на свежей шихте для отливок ответственного назначения включает в себя, как правило, окислительный период плавки, при котором выжигается 0,2–0,5 % С.

Предприятия черной металлургии потребляют большое количество топлива, тепловой и электрической энергии. В целом в России они потребляют около 90 % коксующегося угля, 50 % электроэнергии и 25 % природного газа от всего объема производимых и добываемых в стране.

Структура потребления энергии на металлургическом предприятии ориентирована в основном на использование топлива, которое широко используется на всех стадиях металлургического производства.

В среднем долевое участие в общем топливно-энергетическом балансе отдельных ресурсов составляет: кокс — 44 %, природный газ — 25 %, электроэнергия — 4 %, тепловая энергия — 4 %, мазут — 1 % от общего потребления в отрасли.

В то же время на предприятиях, выплавляющих сталь в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), в том числе с неполным циклом производства, например, мини-металлургических заводах, структура топливно-энергетического баланса базируется в основном на использовании электроэнергии. Однако на таких предприятиях также используется и энергия природного топлива, преимущественно природного газа, который используется в газокислородных горелках как для подогрева металлолома перед загрузкой в печь, так и непосредственно в самой печи для форсирования процесса плавки.

Затраты энергии на производство продукции определяются энергоемкостью, которая является одним из важнейших показателей производства, поскольку определяет его эффективность и напрямую влияет на себестоимость продукции.

Значительный потенциал энергосбережения на металлургических предприятиях заключается в снижении потерь, которые вызваны эксплуатацией основного оборудования, за счет замены устаревшего оборудования на более энергоэкономичное, а также внедрения энергосберегающих технологий.

Одним из новых способов получения железа прямого восстановления в жидком виде является процесс, разработанный в России и получивший название ORIEN. Процесс носит совмещенный характер и предназначен для одновременного получения первичного металлического сырья и выработки электрической энергии из образующегося газа — в основном из монооксида углерода. В качестве исходного сырья используют железо- и углеродосодержащие материалы техногенного и природного происхождения как в дисперсном, так и окускованном состоянии. Процесс ORIEN разработан фирмой ГК «Ферро-Технолоджи» (г. Тула). По сравнению с традиционным электросталеплавильным процессом, помимо различий в виде исходных материалов, новый процесс ORIEN отличается особой энергетика, обусловленная подачей по ходу плавки брикетов синтикома в центральную зону печи, примыкающую к электродам. Благодаря этому достигается совмещение технологической зоны восстановления железа и получения СО и зоны выделения тепла. Соответственно этому нагрев, плавление, и восстановление в композите происходит в режиме прямого дугового нагрева. Это сочетается с огромными температурами, превышающими многократно температуру плавления железа, и

значительной концентрацией энергии. Совокупность этих факторов предопределяет более высокую эффективность восстановления по сравнению с восстановлением при косвенном характере нагрева. В частности, при плавке в ДСП с подачей металлизированных окатышей (ПАО «ОМК») процессы восстановления не происходят. Помимо увеличения скорости восстановления, дуговой нагрев вызывает исключительно высокий перегрев железа прямого восстановления над линией ликвидус, обеспечивая тем самым получение расплава металла со структурой, отвечающей равновесному состоянию.

По ходу плавки в ванну вдувается газообразный кислород, который окисляет избыточный углерод металла с выделением непосредственно внутри ванны тепловой энергии в количестве примерно 2,9 кВт/ч на 1 кг углерода. Это тепло практически полностью усваивается жидкой ванной и расходуется на расплавление части брикетов синтикома, оставшихся нерасплавленными, восстановление железа и подогрев металла. Углерод в данном случае помимо роли восстановителя выполняет и роль дополнительного энергоносителя и источника тепла. Подача извести, флюсов и других материалов, в том числе дополнительного количества науглероживателя по ходу плавки не представляет трудностей и осуществляется аналогично действующей технологии. На рисунке 1 представлена схема металлургического процесса ORIEN в варианте работы на предварительно окискованных материалах брикетах синтикома, базирующихся на системе Fe-O-C.

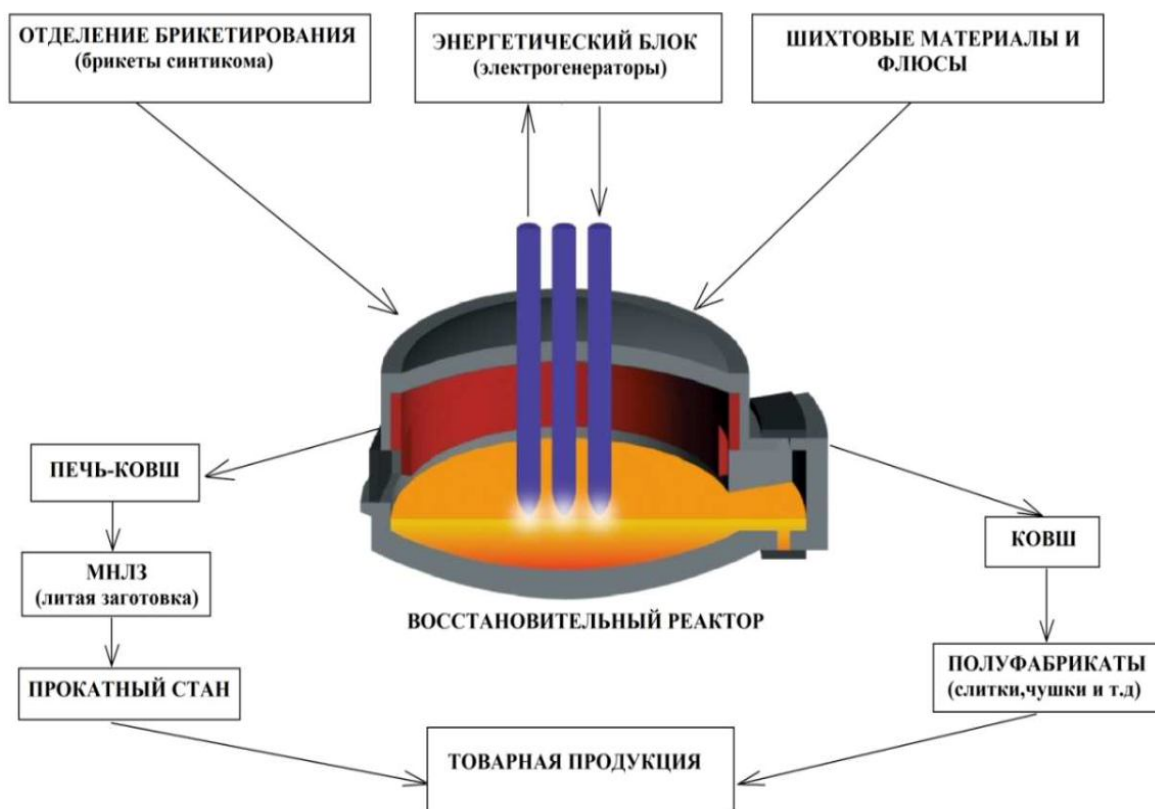


Рисунок 1 — Схема металлургического процесса ORIEN

Преимуществом процесса ORIEN является исключительно высокая скорость взаимодействия углерода с жидкими окислами железа, носящая эндотермический характер. Процесс восстановления при этом вместо твердофазного состояния приобретает жидкофазный характер. Скорость последнего на порядок превышает аналогичную величину при твердофазном восстановлении (доменная печь, шахтная печь). Другим преимуществом варианта работы на брикетах синтикома является разделение зоны восстановления и зоны окисления (горения) углерода на две отдельные независимые области. Первая из них относится к месту расположения электродов в печи, а вторая — к металлической ванне, куда стекает железоуг-

леродистый расплав, образующийся в зоне горения электродов. Этот расплав выполняет по отношению к ванне роль жидкого науглероживателя, создавая в ванне запас углерода, используемого в качестве дополнительного теплоносителя. Одной из особенностей процесса ORIEN является постоянное наличие в зоне горения дуг твердых брикетов синтикома. Эти материалы, выполняют роль своеобразных «холодильников». Они снижают локальные температуры, увеличивают перепад температур между дугами и шихтой, сокращают потери тепла с отходящими газами, снижают пылевыведение из печи. Такой режим работы дуг является более оптимальным по сравнению с существующей практикой.

Процесс ORIEN отличает более высокий выход годного, меньшее пылевыведение, более высокую степень испарения примесей цветных элементов в зоне дуг, возврат электроэнергии и экономический эффект. Весьма важными показателями качества металла процесса ORIEN являются повышение чистоты металла и его первородность по сравнению с существующим процессом при использовании металлолома в шихте.

Список литературы

1. Основные концептуальные положения энергосбережения на предприятиях черной металлургии / А. А. Злобин, В. Н. Курятов, А. П. Мальцев, Г. А. Романов // Общество и экономика. — 2003. — № 4. — С.29–35.
2. Воскобойников, В. Г. Общая металлургия : учебник для вузов / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. — 6-изд., перераб. и доп. — М. : Академкнига, 2005. — 768 с.
3. Пути снижения расхода энергетических ресурсов в литейном производстве // ИТЦМ «Металлург». — М., 2001.
4. Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии / В. Б. Демилович, Б. М. Никитин, В. Н. Иванов, В. И. Червинский // Индукционный нагрев. — 2008. — № 2. — С. 24–29.
5. Концепция энергометаллургического комплекса ORIEN / Г. А. Дорофеев, П. Р. Янтовский, Я. М. Степанов, В. А. Синельников // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды IV всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). — Новокузнецк, 2016. — Ч. 1. — С. 13–17.
6. Электрометаллургический процесс нового поколения ORIEN / Г. А. Дорофеев [и др.] // Сборник трудов XIII международного конгресса сталеплавильщиков. — Москва — Полевское, 2014. — С. 395–398.

Куберский С. В.
к.т.н., профессор,
Кучернюк А. И.
аспирант,
Проценко М. Ю.
к.т.н., доцент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ПОИСК ЭФФЕКТИВНЫХ ПУТЕЙ РЕЦИКЛИНГА ПЫЛИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Процессы черной металлургии характеризуются формированием большого количества отходов. Одним из отходов, образующихся в процессе выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), является пыль, относящаяся к четвертому классу опасности и представляющая собой мелкодисперсный порошок, имеющий большой разброс в размерах частиц, поскольку содержит как возгоны цветных металлов и их оксидов, так и крупные частицы, вынесенные потоком газа из печи. В состав пыли могут входить железо, цинк, кадмий, свинец, хлор, кобальт, марганец, никель, щелочные и щелочноземельные металлы.

В литературе отмечено, что пыль электросталеплавильного производства на 90 % состоит из оксидов, остальные 10 % представлены ферритами, сульфатами, сульфидами, хлоридами [1]. Цинк в пыли ЭДП представлен преимущественно в форме оксида (~50 %) и франклинита или феррита (~45 %) с изоморфно замещающими металлами $(Zn_x, Me_y)Fe_2O_4$, где Me — это Mn, Co, Ni, Cr, Ca, остальное — хлорид и сульфат [2].

В среднем на 1 т стали, выплаваемой в ДСП переменного тока, образуется около 25–30 кг пыли, и накопившиеся к настоящему времени мировые ее запасы составляют порядка 5,6 млрд т. В Российской Федерации ежегодно образуется около 1 млн т пыли, которая при складировании не только наносит вред окружающей среде, но и приводит к ежегодным потерям около 800 тыс. т железа, 500 тыс. т цинка и 150 тыс. т свинца [3].

Рециклинг пыли ЭДП будет способствовать не только улучшению экологической обстановки, но и существенному ресурсосбережению и может частично покрывать потребности предприятий черной и цветной металлургии в традиционном технологическом сырье.

Поэтому утилизация и переработка этого техногенного сырья является достаточно актуальной научно-технической задачей.

Так как основными компонентами пыли ДСП являются оксиды различных элементов, практически все способы ее утилизации предполагают реализацию процессов восстановления с целью извлечения ценных элементов и их дальнейшего использования в металлургических технологиях.

В настоящее время для переработки данного вида сырья используют гидро- и пирометаллургические методы, имеющие как преимущества, так и определенные недостатки [4], что сдерживает их повсеместное использование и заставляет вести поиск новых наиболее эффективных технологий.

Цель данной работы предусматривала разработку новых подходов к переработке электросталеплавильной пыли для создания комплексной гидро-пирометаллургической технологии ее эффективного рециклинга с получением передельного чугуна, оксида цинка, катодного и чушкового цинка.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

– уменьшение негативного воздействия электросталеплавильной пыли на окружающую среду путем ее переработки и утилизации;

– использование ценных для металлургии компонентов электросталеплавильной пыли в составе шихты при выплавке стали с целью сокращения финансовых затрат, увеличения производительности ДСП, экономии металлического лома и сыпучих добавок;

- получение новых видов товарной продукции в виде оксида цинка, катодного и чушкового цинка;
- подготовка базы для освоения технологии по извлечению свинца, меди, вольфрама, кадмия, молибдена и других металлов из сталеплавильной пыли.

На первом этапе экспериментальных лабораторных исследований для реализации пирометаллургического процесса образующуюся при выплавке стали в ДСП пыль (табл. 1) смешивали с прокатной окалиной, сталеплавильным шлаком, углеродсодержащим материалом и известью.

Подготовленную смесь для лучшего усреднения выдерживали в течение 24 ч и подвергали нагреву в лабораторной печи до температуры 1200 °С с последующей выдержкой при этой температуре в течение 2 ч. В результате такого пирометаллургического процесса происходит разрыв феррита цинка и переход его в оксид. Оксид цинка претерпевает процесс возгона, его пары улавливаются, конденсируются и переходят в пыль, химический состав которой представлен в таблице 2.

Далее температуру в печи поднимали до 1450–1500 °С, при которой реализовывался процесс жидкофазного восстановления для получения жидкого передельного чугуна и шлака, химический состав которых представлен в таблицах 3 и 4 соответственно.

В результате реализованного процесса было получено 16 % цинксодержащей пыли, 56 % передельного чугуна и 15 % шлака. Потери с корольками составили 2 %, а с газами и неучтенные потери — 11 %.

На втором этапе исследований реализовывали гидromеталлургические процессы рециклинга компонентов сталеплавильной пыли.

В специально подобранном растворе растворяли цинксодержащую пыль (табл. 2), нагревали полученную смесь до температуры 70–80 °С и выдерживали при этой температуре 2–3 ч, постоянно перемешивая.

После выдержки раствор подвергали фильтрации с помощью водного вакуумного фильтра. Состав полученного осадка (кека) представлен в таблице 5.

Отфильтрованный раствор подвергали цементации с добавлением цинксодержащего порошка, выдерживали 3–4 ч при постоянном перемешивании и фильтровали с помощью водного вакуумного фильтра. В результате проведенных операций получали кек 2-й фильтрации (табл. 6).

Таблица 1 — Химический состав электросталеплавильной пыли

Компонент	Fe _{общ}	CaO	MgO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	ZnO	Прочие
Содержание, %	26,11	10,07	1,26	4,25	3,57	1,28	27,63	25,83

Таблица 2 — Химический состав цинксодержащей пыли

Компонент	Fe _{общ} (феррит цинка)	Pb	W	Cu	Mn	Cd	ZnO
Содержание, %	5,76	14,68	9,06	0,40	0,11	0,29	69,70

Таблица 3 — Химический состав чугуна

Элемент	Fe	C	S	P	Mn	Si	Прочие
Содержание, %	92,90	4,20	0,02	0,20	0,50	0,60	1,58

Таблица 4 — Химический состав шлака

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	CaO	MgO	MnO	Оксиды Fe
Содержание, %	42,42	7,30	0,2	41,22	6,22	1,06	1,58

Таблица 5 — Химический состав кека

Компонент	ZnO	Pb	Fe	Прочие
Содержание, %	17,3	58,46	21,40	2,84

Таблица 6 — Химический состав кека 2-й фильтрации

Компонент	ZnO	Pb	Fe	Mn	Cu	Прочие
Содержание, %	30,42	9,73	53,18	3,30	0,38	2,99

Полученный кек (табл. 5 и 6) используется для извлечения свинца, меди, никеля, вольфрама, молибдена, кадмия, а также может быть переработан по предложенной технологии для более глубокого извлечения цинка.

Кроме того, полученный после фильтрации раствор подвергали электроэкстракции, в процессе которой на электроде (катоде) осаждался катодный цинк. После электроэкстракции раствор электролита использовали для выщелачивания пыли.

Осажденный катодный цинк, имеющий состав, представленный в таблице 7, расплавляли в индукционной печи и разливали в изложницу, получая чушковый цинк.

Таблица 7 — Химический состав конечного продукта

Элемент	Zn	Pb	Fe (феррит цинка)	Mn	Cu	Прочие
Содержание, %	99,04	0,17	0,35	0,028	0,25	0,162

В результате проведенных исследований с использованием комплексной гидро-пирометаллургической технологии переработки сталеплавильной пыли, получаемой в ДСП, были получены ценные для металлургической отрасли продукты: передельный чугун, оксид цинка, катодный и чистый цинк, а также отходы, представляющие собой шлак и газы, образовавшиеся в процессе жидкофазного восстановления.

В ходе последующих исследований необходимо оценить эффективность предложенной комплексной технологии с точки зрения финансовых и энергетических затрат, а также длительности ее отдельных этапов, что позволит определить целесообразность ее широкомасштабного внедрения в промышленное производство.

Также необходимо провести дополнительные лабораторные эксперименты по извлечению свинца, меди, никеля, вольфрама, кадмия, молибдена, а также более глубокому извлечению цинка из пыли и продуктов, полученных в ходе реализации настоящих исследований.

Список литературы

1. Стовпченко, А. П. Теоретические и экспериментальные исследования состава и восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей / А. П. Стовпченко, Л. В. Камкина, Ю. С. Пройдак // *Электromеталлургия*. — 2009. — № 8. — С. 29–36.
2. Mchado, J. G. Characterization study of electric arc furnace dust phases / J. G. Mchado // *Materials Research*. — 2006. — № 1. — P. 30–36.
3. Леонтьев, Л. И. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды / Л. И. Леонтьев, В. Г. Дюбанов // *Экология и промышленность*. — 2011. — № 4. — С. 32–35.
4. Патрушов, А. Е. Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства / А. Е. Патрушов, Н. В. Немчинова, В. Е. Черных, А. А. Тютрин // *Вестник ИрГТУ*. — Т. 22. — № 4. — 2018. — С. 183–190.

РАЗДУВКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПОЛЕЗНЫМ ОБЪЁМОМ 3000 м³ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НЕЗАПЛАНИРОВАННОГО ПРОСТОЯ БЕЗ ВЫДУВКИ И СПУСКА НИЖЕЛЕТОЧНОГО ЧУГУНА

ДП № 1 полезным объемом 3000 м³ была остановлена в связи с отсутствием поступления шихтовых материалов на предприятие без опускания уровня засыпи и без выпуска нижелетнего чугуна с загрузкой добавочного кокса и шихт с пониженной рудной нагрузкой из расчета длительности простоя не более 14 суток.

Фактическая длительность простоя составила 342,5 суток, что противоречит требованиям Типовой технологической инструкции по длительной внеплановой остановке и консервации доменных печей [1]. За время простоя печи весь закруженный перед остановкой кокс в холостых и рабочих подачах полностью выгорел при этом уровень засыпи опустился на 18 м от технологического ноля, в результате чего в рабочем пространстве печи остался спекшийся железосодержащий конгломерат с золой кокса.

При проведении подготовительных работ было выполнено выжигание спекшейся шихты, чугуна и конгломерата в районе оси двух воздушных фурм над чугунной леткой № 1 и удаление продуктов из печи вручную с заполнением освободившегося объема свежим коксом. После чего весь объем печи был загружен коксом.

После выполнения подготовительных работ, включая организацию контроля состояния напряжения брони низа печи ДП № 1, задули на две воздушные фурмы над чугунной леткой № 1.

Основной задачей на первоначальном этапе раздувки являлось недопущение образования трещин в броне низа печи в результате термического расширения нижелетнего чугуна и кладки. Таким образом, темп раздувки определялся результатами постоянного контроля напряжения брони низа печи. В результате ДП № 1 была раздута без нарушения целостности брони и выведена на заданный режим работы.

Вывод: в результате выбора оптимального темпа раздувки после простоя в течение 342,5 суток без выдувки и спуска нижелетнего чугуна доменной печи полезным объемом 3000 м³ удалось избежать образования трещин в броне низа печи и вывести печь на заданный режим работы.

Список литературы

1. Типовая технологическая инструкция по длительной внеплановой остановке и консервации доменных печей (дополнение к типовой технологической инструкции по доменному производству) / Сост. В. С. Харахулах. — Днепропетровск : Минпром. — 1993. — 7 с.

*Анохина Е. А.
преподаватель,
Ланина Н. А.
преподаватель*

Железногорский горно-металлургический колледж, г. Железногорск, РФ

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Создание ресурсосберегающих технологий в сочетании с охраной окружающей среды при переработке минерального сырья является одной из наиболее актуальных задач нашего времени. Эффективным способом сокращения отходов является их переработка с расширением номенклатуры товарной продукции горнодобывающих предприятий, для чего создаются новые технологии. Приоритетное значение приобретает переработка руд на основе современных методов обогащения, гидрометаллургии, вовлечения в переработку минеральных ресурсов техногенного происхождения.

По оценке экспертов, в структуре минерально-сырьевой базы России основную долю — 71 % занимают топливно-энергетические ресурсы, представленные газом, углем, нефтью, 15 % — нерудное сырье, 13 % — черные и цветные металлы и 1 % приходится на алмазы и драгметаллы.

Большая часть добываемого минерального сырья поступает на обогащение. Существующие технологии добычи и первичной переработки полезных ископаемых позволяют использовать лишь около 5–8% извлекаемой из недр минеральной массы.

Из накопленных на территории России отходов значительная доля приходится на горнодобывающие отрасли промышленности. Развитие горно-металлургической промышленности привело к образованию отвалов вскрышных пород, хвостов обогатительных фабрик, металлургических шлаков и других отходов производства в количествах, которые позволяют классифицировать эти новообразования как техногенные месторождения. Ресурсную ценность техногенных месторождений нельзя оценивать как первичную категорию, содержащую в них полезные компоненты, поскольку выделение ценных компонентов затруднено. Техногенное сырье — это сырье переизмельченное, окисленное и труднообогатимое. Показатели обогащения такого сырья невысокие даже при значительных затратах на технологию. Рассматривать вопрос о целесообразности переработки техногенного сырья необходимо комплексно, учитывая его экологическую опасность, а также выгоды от рекультивации земель и восстановления среды обитания человека и животного мира.

Регион КМА обладает огромным природным потенциалом, являясь поставщиком высококачественного металлургического сырья. Географическое положение КМА в центре России, огромные запасы железных руд, открытая карьерная разработка на одном из крупнейших ГОКов — Михайловском — создают обоснованные предпосылки для дальнейшего совершенствования технологии добычи и переработки железных кварцитов.

Месторождение представлено богатыми рудами, окисленными и неокисленными кварцитами, из которых только последние подвергаются обогащению. Окисленные кварциты представлены четырьмя минералогическими разновидностями, отличающимися различной степенью окисления и содержанием магнетитового железа 4–16 %. Неокисленные кварциты представлены семью минералогическими разновидностями, из которых только три пригодны для магнетитового обогащения, тремя технологическими сортами, от соотношения которых в шихте зависит выход и качество конечного концентрата и извлечения железа. Характерной особенностью железистых кварцитов месторождения является тонкая вкрапленность магнетита и гематита. Содержание зерен магнетита крупностью 30 мкм достигает 45 % общего содержания. Это предопределяет необходимость тонкого измельчения исходной руды — до крупности 44 мкм. И даже в этих условиях сохраняется значительное количество сростков магнетита с пустой породой.

Окисленные кварциты обрабатываются Михайловским ГОКом, начиная с 1972 года, как скальная вскрыша и складированы в специальных отвалах.

По технологическим свойствам окисленные кварциты, как металлургическое сырье, при используемой на Михайловском ГОКе промышленной схеме магнитного обогащения являются весьма низкорентабельными рудами из-за низкого (менее 20 %) выхода концентрата, и до 1984 года запасы их относились к забалансовым.

Попутно добываемые при эксплуатации окисленные кварциты (годовая добыча 10–12 млн т) по решению вышестоящих организаций частично используются МГОКом, начиная с 1972 года для производства щебня крупностью 0–10, 10–40, +40 мм и отсева, используемых преимущественно в автодорожном строительстве.

При получении 1 т металла, содержащегося в продуктах обогащения, образуется 30–100 т хвостов, на их удаление и хранение затрачивается в среднем 5–8 % стоимости производимой продукции. В последующее производство вовлекаются в настоящее время не более 20 % извлекаемых из недр нерудных горных пород и около 10 % отходов обогащения.

Объем ежегодно складировуемых отходов по всем горнодобывающим отраслям достигает нескольких миллиардов кубических метров.

В связи с наращиванием объемов производства и комплексным освоением недр требуется разработка нетрадиционных, перспективных, экологически щадящих и безотходных технологий для снижения техногенной нагрузки на регион.

Одной из важнейших проблем горно-обогатительных предприятий является размещение хвостов обогатительных фабрик. Возможность извлечения гематита из хвостов с применением эффективного обогатительного оборудования и комбинированных технологий создает перспективу использования этого продукта в качестве дополнительного компонента для окомкования или твердофазного восстановления металла из сырья с низким содержанием железа.

Флотация была и остается наиболее эффективной технологией обогащения, с развитием которой связаны основные перспективы вовлечения в переработку техногенного минерального сырья. Современные колонные флотационные машины большого объема обеспечивают получение в промышленных количествах большинства необходимых для развития цивилизации минеральных веществ и соединений.

Основным недостатком традиционных процессов флотации до последнего времени остается возможность разделения минеральных частиц крупностью менее 10 мкм. Лишь с появлением атомно-силовой микроскопии и осознанием роли гидрофобных взаимодействий при флотации наметились перспективы развития флотации как нанотехнологии, позволяющей эффективно разделить частицы субмикронных размеров. Следует отметить, что теоретические основы флотации как нанотехнологии создавались в России.

Наиболее приемлемыми в промышленных технологиях обогащения немагнитного железорудного сырья являются гравитационные методы благодаря их экологическим преимуществам. Эти методы успешнее используются в комбинированных схемах обогащения, так как самостоятельное использование гравитационных аппаратов ограничивается определенной крупностью извлекаемого материала: с уменьшением размера частиц усиливается гидродинамическое воздействие среды, которое препятствует разделению материала, а в более крупных классах извлекаемый материал зачастую находится в сростках с пустой породой.

Поиск эффективных способов разделения тонких частиц в гравитационных аппаратах привел к созданию сепараторов центробежного типа, позволяющих улавливать частицы размером 30–50 мкм. За счет действия центробежных сил в аппаратах данного типа частицы материала получают ускорение, значительно превышающее ускорение свободного падения, что способствует эффективному разделению материала тонких классов. Разрыхление и перемешивание концентрационного слоя струями воды (так называемый сжиженный слой) создают дополнительные возможности для разделения материала.

Существуют несколько типов центробежных сепараторов, которые различаются конструктивными и технологическими характеристиками: «Грант» (Россия), Orokon (США), Knelcon (Канада).

Центробежные сепараторы Falcon, в первую очередь модель «С», имеют ряд преимуществ:

- высокую производительность;
- непрерывную разгрузку;
- привод с изменяющейся частотой вращения.

Установки модели «С» применяются при переработке различных рудных и рассыпных материалов с высоким или низким выходом концентратов. Концентраты удерживаются на гладкой поверхности ротора за верхним порогом, слой наиболее тяжелых частиц постоянно выводится с регулируемой скоростью самотеком через серию воронок, клапанов и выпускных насадок. Не требуется прекращать подачу питания, нет необходимости в дополнительной воде. Тяжелая фракция эффективно обесшламливается и частично обезвоживается.

Идея извлечения гематита из общих хвостов не нова. Применение для этой цели отсадочных машин на Оленегорском ГОКе показало, что извлечение гематита из тонких классов (менее 100 мкм) достигает всего 7–10 %, а конкурирующая фирма с использованием орбитальных шлюзов не нашла применения из-за неприемлемых технико-экономических показателей.

На Михайловском ГОКе проводились исследования по извлечению гематита из общих хвостов гравитационными методами, в частности с применением винтовых сепараторов, короткокonusных гидроциклонов и концентрационных столов, что не дало обнадеживающих результатов из-за значительного количества перечистных операций и малого выхода товарного продукта. Поэтому возможность проведения исследований на гравитационном центробежном концентраторе Falcon вызвала особый интерес. Обогащению подвергались хвосты текущего производства. Для этой цели выбран центробежный концентратор Falcon, разработанный специально для выполнения лабораторных исследований малых проб.

Испытания, проведенные на исходном питании (лежалых хвостах) без последующей обработки показали возможность получения достаточно высоких качественных показателей обогащения. Но несмотря на прирост общего объема концентрата, в суммарном концентрате произойдет снижение массовой доли железа, что экономически крайне невыгодно. По этой причине все испытания были направлены на поиск оптимальной схемы извлечения гематита из общих хвостов.

Беляев В. В.
начальник отдела огнеупоров,
Лисица И. Р.
ведущий инженер-технолог
Енакиевский металлургический завод, г. Енакиево, ДНР

ХОЛОДНЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ РЕМОНТ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРОВ

Повышение стойкости футеровки конвертеров кроме улучшения металлургических факторов ее эксплуатации включает и применение новых способов ремонта изношенных участков футеровки. Для восстановления изношенной футеровки применяют горячий (по ходу кампании) и холодный (во время остановки конвертера) методы ремонта. Наибольшее распространение получили горячие методы ремонта, т. к. позволяют выполнить ремонт достаточно быстро без остановки агрегатов — подварка изношенных локальных мест с применением подварочных брикетов или саморастекающихся масс. Также широкое распространение в последнее время получил способ нанесения защитного гарнисажа на футеровку конвертера путем раздувки шлака азотом высокого давления.

Однако отмечены случаи, когда при механическом повреждении футеровки из-за удаления шлакометаллического настыля на горловине конвертера происходит разупрочнение строительной прочности кладки и, как следствие, выпадение её фрагментов. Так произошло в период эксплуатации конвертера № 2 на «Енакиевском металлургическом заводе», где в результате удаления настыля с горловины произошло обрушение части кладки верхнего конуса и горловины со стороны сливной и завалочной сторон (рис. 1).

Учитывая, что обрушение произошло при стойкости футеровки конвертера 1733 плавов от начала его эксплуатации при гарантийной стойкости 2500 плавов, было принято решение произвести холодный ремонт футеровки.

Для восстановления выпавшего фрагмента кладки техническими специалистами завода было предложено использовать технологию подварки конвертера с применением приготовленного заранее элемента в виде армированных проволокой и заключенных в металлическую раму формованных огнеупорных периклазоуглеродистых изделий, представляющих собой вид решетки (рис. 2).



Рисунок 1 — Выпадение кладки

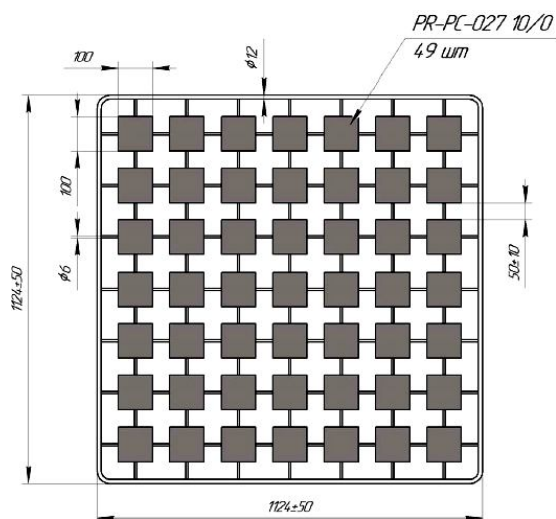


Рисунок 2 — Вид подварки в виде решетки.

В результате был реализован следующий способ восстановления отсутствующих фрагментов футеровки. В зоне восстановления футеровки выполнена полная очистка брони конвертера от шлака и настывлей. Кроме этого, были удалены минимальные остаточные толщины изношенных участков футеровки, с целью исключения значительного перепада высоты футеровки после ее восстановления. На броню конвертера произведена наварка крепежных анкеров диаметром 12 мм, по заранее разработанной схеме. Для восстановления изношенного участка футеровки применялись подварочные брикеты размером $300 \times 150 \times 90$ мм. Для подготовки решетки, представленной на рисунке 2, в каждом брикете выполнено два сквозных отверстия. В данные отверстия вставлялась арматура диаметром 12 мм, и далее данная арматура приваривалась к крепежным анкерам на броне конвертера. Установка брикетов производилась таким образом, что толщина восстановленной кладки в виде брикетов составляла 150 мм (схема установки брикетов представлена на рисунке 3). Зазоры между броней и брикетами, и зазоры между самими брикетами заполнены увлажненной набивной массой, которая ранее применялась для заполнения стыка днища с конусной частью футеровки конвертера.

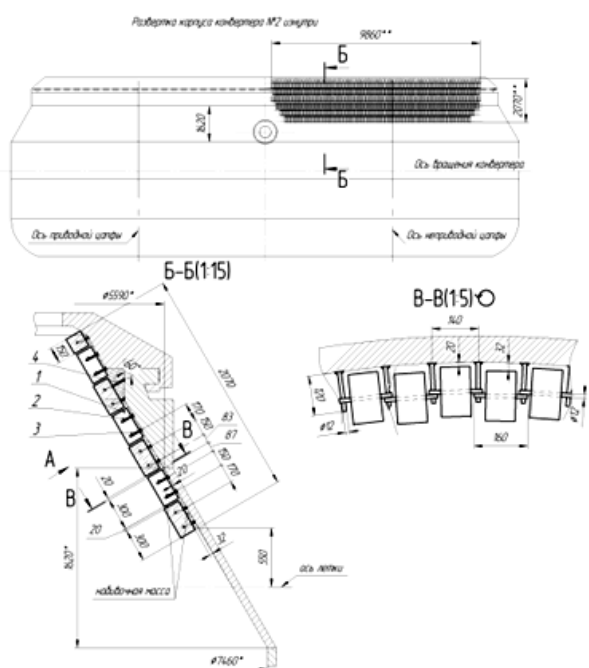


Рисунок 3 — Схема проведения холодного ремонта футеровки

Работы по восстановлению футеровки были выполнены собственными силами (рис. 4). Продолжительность ремонта составила 7 суток.

Состояние футеровки конвертера после проведения холодного ремонта конвертера и разогрева удовлетворительное (рис. 5).

После окончания холодного ремонта футеровки конвертера перед вводом его в эксплуатации был выполнен разогрев футеровки в течение 4 час до температуры 1100 °С. С первых плавов после взятия конвертера в работу уделялось особое внимание нанесению защитного гарнисажа на футеровку конвертера, в т. ч. на отремонтированный участок, посредством раздувки конечного шлака азотом. Частота раздувки конечного шлака азотом составляла н. м. 95 % плавов. Кроме этого с целью повышения стойкости футеровки поддерживалась основность конечного конвертерного шлака на уровне н. м. 2,8 единиц и содержание MgO в шлаке н. м. 4,0 %.



Рисунок 4 — Работы по восстановлению кладки футеровки



Рисунок 5 — Состояние отремонтированной футеровки после разогрева

Реализация нестандартного метода холодного ремонта выпавшей части футеровки позволила завершить кампанию конвертера не только с достижением гарантийной стойкости 2500 плавов, но и значительно превысить ее — фактическая стойкость футеровки конвертера составила 3044 плавки.

Любименко В. С.
ведущий инженер-технолог,
Левченко А. Ю.
инженер-технолог I категории
Енакиевский металлургический завод, г. Енакиево, ДНР

ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБЛЕННЫХ Б/У ОГНЕУПОРОВ ПРИ РАЗДУВКЕ КОНЕЧНОГО КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА АЗОТОМ И ВО ВРЕМЯ ПРОДУВКИ ПЛАВКИ

Работоспособность огнеупорной футеровки конвертера — стойкость рабочего слоя — наряду с качеством огнеупорных изделий и выполнения кладки, в значительной степени определяется условиями ее эксплуатации и выполнению необходимых мероприятий по нанесению шлакового гарнисажа. К основным мероприятиям по нанесению шлакового защитного гарнисажа на рабочий слой футеровки можно отнести:

1. Применение высокоосновных магнезиальных флюсов в процессе продувки плавки за счет формирования гомогенного низкоокисленного шлака.
2. Горячие ремонты футеровки — подварка и торкретирование конвертера в межплавочный период.
3. Нанесение шлакового гарнисажа в процессе раздувки конечного шлака путем продувки его азотом.

Все вышеперечисленные способы имеют, как свои положительные, так и отрицательные стороны. Так при использовании высокоосновных магнезиальных флюсов отмечается удорожание себестоимости продукции, по причине высокой стоимости данного материала, по сравнению с доломитизированной известью или доломитом. При проведении горячих ремонтов, а именно торкретирование необходимо применение дополнительного дорогостоящего специализированного оборудования и материалов, что также негативно сказывается на себестоимости готовой продукции. При проведении подварки футеровки, ремонтные воздействия оказывают только на локальные участки футеровки, такие как околоречное пространство, сторона завалки. При проведении подварки применяются б/у огнеупоры образованные в ходе вывода из эксплуатации сталеразливочных ковшей и конвертеров.

Одной из эффективных ресурсосберегающих технологий является технология нанесения шлакового гарнисажа в процессе раздувки конечного шлака путем продувки его азотом. Именно этот способ не требует дополнительного оборудования, не способствует снижению производительности конвертера и не увеличивает его межплавочные простои за счет принятия дополнительных мер.

В связи со значительным образованием лома огнеупорных изделий имеющего в своем составе высокое содержание MgO на уровне 85 %, была предложена и разработана технология использования дробленых до фракции 10–50 мм б/у огнеупоров, при раздувке конечного шлака азотом.

Подготовка лома огнеупоров производилась путем их выборки в процессе вывода сталеразливочных ковшей и конвертеров из эксплуатации. После чего данный материал поступал на склад ферросплавов УСХ для проведения дробления до фракции 10–50 мм. После дробления переработанный материал транспортировался на склад известняка ИОЦ в свободную секцию, предотвращая смешивание с другими материалами, откуда подавался в конвертерный цех в расходные бункера тракта подачи сыпучих материалов конвертеров.

Присадка б/у огнеупоров фракцией 10–50 мм в процессе раздувки конечного шлака азотом производилась на жидкоподвижный конечный конвертерный шлак. Расход материала составлял 0,3–0,5 т. При использовании б/у огнеупоров в процессе раздувки конечного шлака, отмечено нанесение равномерного и устойчивого шлакового гарнисажа в конвертере, который сохранялся на протяжении трех последующих плавов.

По итогам отработки технологии отмечено увеличение содержания MgO в конвертерных шлаках на последующих плавках в среднем на 0,7 %, с 4,5 % до 5,2 %.

Так же производилась присадка б/у огнеупоров в ходе продувки конвертерной плавки. Присадка материала производилась в первой трети продувки конвертерной плавки в количестве до 1,0 т. Целью данной технологии являлось снижение агрессивного воздействия шлака на футеровку конвертера и повышение содержания MgO в шлаке на повалке конвертера. При визуальном осмотре рабочего слоя футеровки конвертеров отмечено образование устойчивого защитного гарнисажа на изношенных участках футеровки конвертера («приводная» / «холодная» цапфа конвертера). Однако было отмечено увеличение случаев получения на повалке конвертера «густых» шлаков, приводящих к проведению дополнительной технологической операции по раздувке шлака кислородом.

Применение технологии использования боя огнеупоров в условиях работы конвертерного цеха Филиала № 2 «ЕМЗ» позволило продлить срок службы футеровки конвертера более чем на 100 плавов, при гарантированной стойкости 2500 плавов.

ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

УДК 531.31.15+669

Левченко Э. П.

к.т.н., доцент,

Зинченко А. М.

к.э.н., доцент,

Левченко О. А.

к.т.н., доцент,

Мальков С. Л.

инженер

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЕМ КАЧЕСТВА ГОТОВОГО АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ДРОБИЛКАХ

В современных условиях эффективная работа доменной печи при выплавке чугуна должны учитывать множество самых разных факторов, одним из которых является рациональная крупность и устойчивость фракционного состава готового агломерата. Широко применяемые в металлургии для дробления окиркованного железорудного сырья одновалковые дробилки хорошо зарекомендовали себя с точки зрения работоспособности, долговечности, надежности и ремонтпригодности, что обеспечивает их приоритетное распространение. Однако их существующие конструкции, серийно выпускаемые машиностроительными предприятиями, пока еще не позволяют устойчиво добиться снижения размеров готового продукта преимущественной крупности, требуемой для наилучшей работы доменных печей [1].

На протяжении ряда лет авторским коллективом ведутся постоянные поиски путей рационального усовершенствования таких машин, что проявилось в самых различных направлениях анализа их конструкций и совершенствования. Выявлено, что снижение крупности готового продукта путем уменьшения зазора между колосниками приводит к редкому повышению износа зубьев звездочек и требует более частого проведения планово-предупредительных ремонтов, что крайне нежелательно в условиях непрерывного металлургического производства. Желаемая крупность готового агломерата должна находиться в диапазоне 10–50 мм, причем предпочтительным является стабильный фракционный состав (одинаковая крупность кусков).

Основной упор делается на требовании предприятий о недопущении сколь либо значимого усложнения имеющихся типовых конструкций, поэтому все внимание направлено на создание наиболее выгодных условий разрушения материала в рабочей камере, что невозможно без изменения преимущественного способа разрушения агломерата [2]. Поэтому, как правило, существующие условия среза (продавливания аглоспека через колосниковую решетку) заменяются на менее энергоемкие условия, в частности излом, удар, растяжение или их комбинации.

На рисунке 1 приведены основные наиболее перспективные технические решения разрушения аглоспека в одновалковых зубчатых дробилках, принципиальная новизна и эффективность которых подтверждена различными патентами в количестве более десяти, полученных за последние 10–15 лет, в том числе в Российской Федерации.

Из анализа вариантов технической реализации следует, что наибольшей перспективностью может обладать установка колосников с перепадом высот (обеспечивает излом), многоступенчатое фракционирование с непрерывной классификацией готового продукта (гарантирует образование кусков заведомо требуемой крупности при их непрерывном выведении из рабочего пространства машины), а также шевронное исполнение зубьев звездочек на роторе (способствует снижению крупности готового продукта).

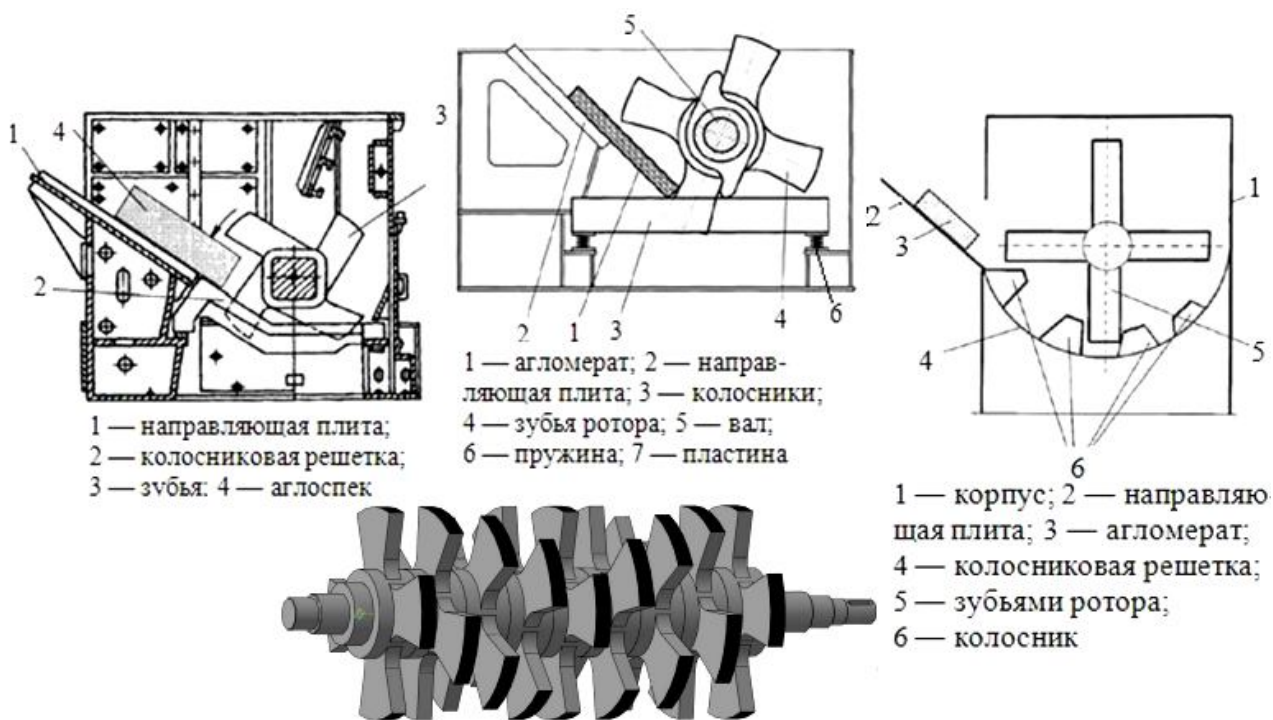


Рисунок 1 — Перспективные технические решения разрушения аглоспека в одновалковых зубчатых дробилках

Предложенные усовершенствования можно использовать как по отдельности, так и в комбинации друг с другом, что позволит эффективно управлять качеством готового продукта в соответствии с его необходимой крупностью.

Список литературы

1. Левченко, Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-тилетней изобретательской деятельности) : монография / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — 353 с.
2. Пат. 196194 Российская Федерация, МПК7 В 03 С 1/14. Ротор одновалковой зубчатой дробилки / Д. А. Власенко, А. П. Жильцов, Э. П. Левченко, В. В. Мороз, А. С. Мягков ; заявитель и патентообладатель Липецк. гос. техн. ун-т. — № 2019137708 ; заявл. 21.11.19 ; опубл. 19.02.20, Бюл. № 5. — 6 с. : ил.
3. Власенко, Д. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров одновалковой дробилки железорудного агломерата с шевронным расположением зубьев звёздочек ротора / Д. А. Власенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — № 19 (62). — С. 69–79.

*Петров П. А.**к.т.н., доцент,**Изюмов Ю. В.**к.т.н., доцент,**Петров М. П.**студент 4-го курса**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВЫХ ПИЛ ГОРЯЧЕЙ РЕЗКИ СОРТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Создание сложных технических систем на современном этапе развития машиностроительной и металлургической отрасли, невозможно без совместного использования широкого набора различных программных систем параметрического моделирования (конструирования) и инженерного анализа. Основными инструментами современного компьютерного моделирования являются: программные системы геометрического моделирования и автоматизации конструкторских работ и программные системы инженерного моделирования, анализа и оптимизации.

В приводах металлургических машин широко используются рычажные механизмы (РМ), обеспечивающие высокое быстродействие и точность движения рабочих органов. Так, например, привод механизма подачи диска на рез четырехзвенной дисковой пилы реализован на основе шарнирного четырехзвенника, с исполнением в виде двухкоромыслового механизма с возвратно-вращательным движением обоих звеньев. Шарнирные четырехзвенники часто используют для воспроизведения определённых траекторий движения. Форма траектории шатуна (шатунная кривая) зависит от размеров звеньев механизма и координат центра диска. Путём их подбора можно получить шатунную кривую, которая будет незначительно отличаться от заданной траектории. Существуют варианты с движением диска пилы по дуге окружности, по прямой и по траектории, благоприятствующей меньшему износу зубьев диска пилы [1–2].

Применение специализированных машиностроительных САПР позволяет выполнять анализ движения РМ. К подобным продуктам следует отнести [3]: Roberts Animator от Heron Technologies, APM WinSlider разработки НТЦ «Автоматизированное проектирование машин» — МГТУ им. Н.Э. Баумана; Linkages, OSMEC, Workbench от ESDU International. Известны исследования кинематического и динамического анализа механизмов с применением компонентов T-Flex компании «Топ Системы». Имеется опыт использования интегрированной в MathLab графической среды имитационного моделирования Simulink и модулей SimMechanics и SoftLink для синтеза и анализа РМ и исследования динамики сложных механизмов.

Проектирование и синтез многозвенных приводных РМ для реализации сложных законов движения является весьма трудоёмкой задачей. Существующие системы автоматического проектирования (САПР) машиностроительного профиля ориентированы в первую очередь на автоматизацию разработки чертежной документации и на проектирование типовых деталей и узлов машин. Механическое оборудование металлургического производства зачастую характеризуется уникальностью и сложностью конструкции к которой предъявляют ряд дополнительных требований надёжности и соблюдения специальных эксплуатационных показателей. К подобному оборудованию относят, устанавливаемые на участке резки горячего металла сортопрокатного цеха, дисковые пилы. Поэтому, исследование сложных технических объектов, требующее дополнительного регулирования конструктивных и технологических параметров моделируемой машины, следует осуществлять путем совмещения возможностей «коробочных» версий продуктов САПР с разнообразными по виду интерфейса и способу программной реализации индивидуальными разработками. Например, для совершенствования процесса резки сортовых профилей, отличающихся значительным разнообразием форм и типоразмеров, авторами на основе языка программирования Basic, была разработана математическая модель дисковой пилы [4]. Результаты моделирования дают

представление о кинематических параметрах разделительного процесса (траектория, скорость узлов механизма подачи пилы); устанавливают взаимосвязь между текущей длиной пропила в заготовке и силами, действующими в очаге реза; позволяют производить сопоставительный анализ работы резки простых сортовых и фасонных профилей в зависимости от расположения профиля на стеллаже, параметров разрезаемой заготовки и технологических характеристик процесса.

В этой связи, для расширения представлений о проектировании высокоскоростных пил горячей резки сложнопрофильного металлопроката необходимо учитывать динамические нагрузки РМ и инерционность ускоряемых масс узла диска пилы. В некоторых случаях массивные элементы конструкции играют положительную роль, выступая в качестве маховика — обладающего запасом кинетической энергии, что актуально для так называемого «динамического» реза (в случае применения роторных пил, характеризующихся высокими скоростями подачи, собственно процесс резания длится десятые доли секунды и маховики в приводе диска отдают кинетическую энергию, накопленную на холостом ходу). Зачастую от излишней инерционности следует избавляться. В этой связи задача рационального подбора размеров узла диска приобретает определенную актуальность.

На первом этапе в среде трехмерного моделирования Siemens NX была выполнена параметрическая модель узла диска пилы (рис. 1). За основу взята конструкция передвижной пилы горячей резки >1800 мм участка резки полунепрерывного крупносортового стана 600. Это позволило получить данные о массе (1062 кг) и моменте инерции ($J_{\phi} = 129,73 \text{ кгм}^2$) узла диска пилы.

В дальнейшем, на основе методики [1, 5] определения мощности двигателя, учитывающей использование энергии маховых масс механизма для выполнения некоторой доли работы резания, получена зависимость требуемого момента инерции J_T узла вала диска (вал, диск, план-шайба и крепежные элементы план-шайбы) от силовых, конструктивных и технологических параметров разделительной установки:

$$J_T = F_t R \frac{t_p (t_u - t_p - 0,1 t_{xx})}{t_u \cdot \omega \cdot S} \left(1 - \frac{S}{2}\right),$$

где F_t — окружная сила резки; R — радиус режущей периферии диска пилы; t_u, t_p, t_{xx} — соответственно, продолжительность цикла от реза до реза, время резания, время от окончания реза до начала следующего; ω — угловая скорость вала диска; S — критическое скольжение электродвигателя (обусловленное номинальным скольжением и коэффициентом перегрузки электродвигателя [5]).

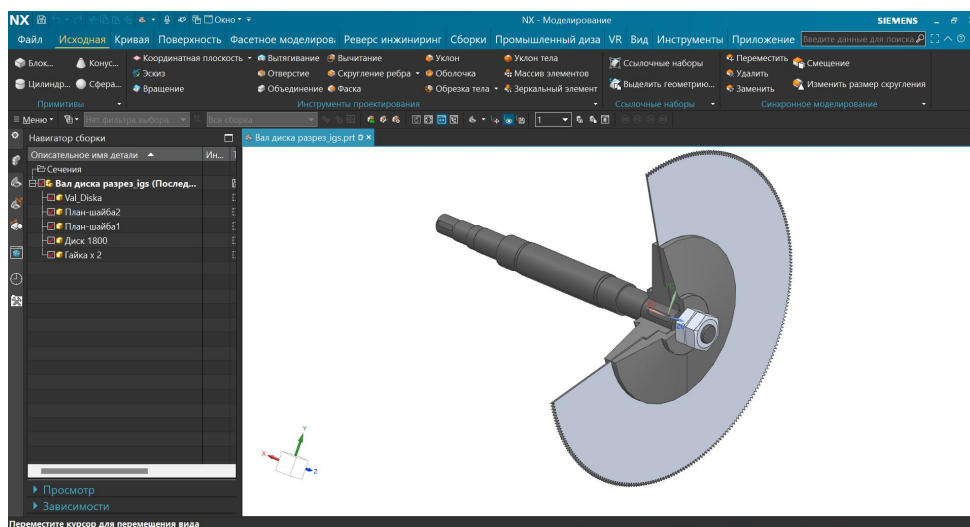


Рисунок 1 — 3-D модель узла диска пилы горячей резки проката

Для нормального функционирования необходимо чтобы фактический момент инерции был больше требуемого. На рисунке 2 представлены графики изменения момента инерции в зависимости от времени резания t_p и номинального скольжения электродвигателя $S_H = 5\text{--}20\%$.

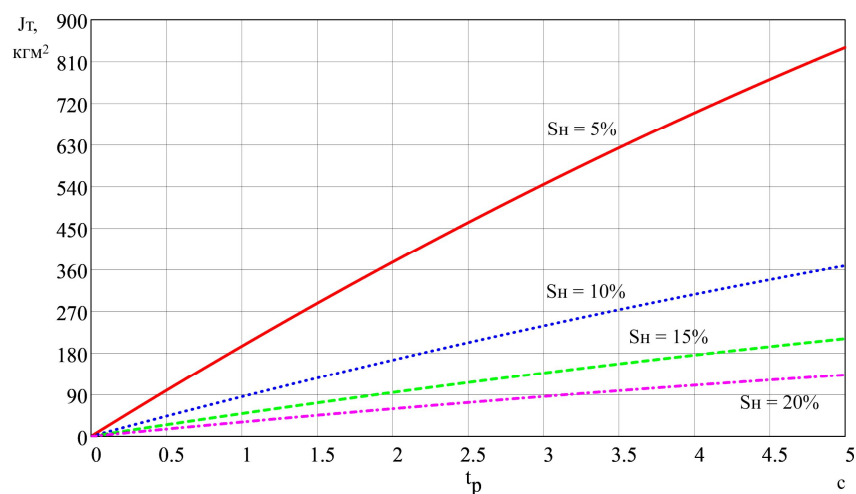


Рисунок 2 — Зависимость момента инерции вала диска от времени резания и номинального скольжения электродвигателя

Полученная зависимость позволяет учитывать силовые, конструктивные и технологические параметры разделительной установки в расчете энергетического баланса механизма резания и производить сопоставительный анализ требуемого J_T и фактического J_Φ момента инерции узла вращения диска пилы.

Список литературы

- Ищенко, А. А. Пилы горячей резки проката. Конструкции и расчет : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза ; ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». — Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2012. — 251 с.
- Пат. 97849 UA, МПК В23D 45/00. Чотириланкова дискова пила для поперечного різання сортового металопрокату / П. О. Петров, П. В. Боровік, М. Е. Селезнев ; заявник Донбаський державний технічний університет. — № u201410643 ; заявл. 29.09.14 ; опубл. 10.04.15., Бюл. № 7.
- Кикин, А. Б. Разработка методов и средств для структурно-кинематического проектирования рычажных механизмов машин легкой промышленности : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А. Б. Кикин ; СПбГУТД. — Санкт-Петербург, 2006. — 362 с.
- Шпаков, В. А. Математическая модель дисковой пилы горячей резки / В. А. Шпаков, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДГМИ. — Алчевск : ДГМИ, 2003. — № 17. — С. 292–298.
- Крылов, Н. И. Исследование энергетического баланса электропривода пил горячей резки / Н. И. Крылов, Н. И. Голубенко, А. К. Лекай // Автоматизация и электропривод металлургических машин и агрегатов: сборник трудов ВИИМЕТМАШ. — 1977. — № 47. — С. 56–69.

Петров П. А.
к.т.н., доцент,
Петров М. П.
студент 4-го курса,
Медведев В. С.
студент 4-го курса

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ТРЕХМЕРНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Создание новых конкурентоспособных изделий машиностроительной и металлургической техники требует постоянного совершенствования процесса проектирования с целью сокращения цикла разработки, повышения качества, надежности и снижения материалоемкости конструкции. Упростить процесс конструирования, не снизив при этом уровень решения поставленной технической задачи, возможно за счёт совместного использования широкого набора различных программных систем геометрического моделирования и автоматизации конструкторских работ CAD (Computer-Aided Design), а также модулей инженерного анализа CAE (Computer-Aided Engineering), задействованных в разработке компьютерных моделей проектируемых объектов. Ранее, на этапе развития подобных систем, камнем преткновения являлась производительность электронных вычислительных машин и «недружелюбный» интерфейс операционных систем — на современном этапе Windows стала более стабильной и начала поддерживать многозадачность, а мощность персональных компьютеров вполне достаточна для начала широкого освоения программ параметрического моделирования, что открывает новые возможности исследования, анализа и оптимизации конструкции целиком. При этом, важным этапом является выбор платформы для разработки компьютерной модели [1].

Условно программное обеспечение в области систем автоматизированного проектирования (САПР) для машиностроения разделено на три класса [2]: тяжелый, средний и легкий (табл. 1). Усиление конкуренции стимулировало совершенствование продуктов: благодаря удобному графическому интерфейсу значительно упростилось их использование, появились новые механизмы твердотельного моделирования, так называемые геометрические (математические) ядра — ACIS и Parasolid, которые сейчас используются во многих ведущих САПР, значительно расширяя их функциональные возможности. В результате перемен, связанных со слияниями и поглощениями, тяжелых систем осталось всего три: Unigraphics NX компании UGS (после 2007 года просто NX компании Siemens PLM Software), CATIA французской фирмы Dassault Systemes и Pro/Engineer от PTC. Эти компании — лидеры в области САПР, на их продукты приходится львиная доля объема рынка в денежном выражении.

Несмотря на то, что грани между классами постепенно стираются, системы по-прежнему различаются и по цене, и по функциональным возможностям, выбор платформы для моделирования должен быть обоснован. Многое зависит от преследуемых целей — это решение учебных задач или обширные коммерческие проекты для реализации которых необходимо построение сквозных процессов разработки.

В свою очередь, поэтапное освоение программного продукта в области САПР невозможно без предварительного изучения базовых предметов профессионального цикла подготовки инженера — теоретической основы. В этой связи интересен опыт Белгородского государственного технологического университет им В.Г. Шухова на базе, которого для студентов ДонГТИ были организованы курсы повышения квалификации на тему «Цифровой инжиниринг в технике и технологии: Цифровое проектирование изделий металлургической промышленности».

Таблица 1 — Состав рынка программных продуктов САПР

Класс САПР	Продукт	Компания
Тяжелый	Unigraphics NX (NX)	UGS PLM Solutions (EDS)
	CATIA	Dassault Systemes/IBM
	Pro/Engineer	Parametric Technology Corp. (PTC)
Средний	Зарубежные системы	
	SolidEdge	Siemens PLM Software
	SolidWorks	Dassault Systemes
	Inventor и Mechanical Desktop	Autodesk
	Cimatron	Cimatron
	think3	Think3 S.p.A.
	CadKey	CadKey
	PowerSolutions	Delcam
	Отечественные продукты	
	КОМПАС (CAD/CAM/CAE/PDM)	«Аскон»
	T-Flex (CAD/CAM/CAE/PDM)	«Топ Системы»
	APM WinMachine	НТЦ «АПИМ»
	КРЕДО (CAE)	НИЦ «АСК»
Легкий	AutoCAD	Autodesk
	SurfCAM 2D	Surfware
	DataCAD	DataCAD
	IntelliCAD	CADopia
	TurboCAD	IMSI

Курсы направлены на ознакомление с возможностями современной системы трехмерного параметрического моделирования Simens NX [3, 4]. На первом этапе обучающиеся познакомились с базовыми элементами программы и научились создавать простейшие модели, постепенно переходя к более сложным объектам и проектированию сборочных единиц.

На рисунке 1 представлено изображение шпиндельного соединения привода рабочей клетки металлургического прокатного стана в рабочей среде программы NX.

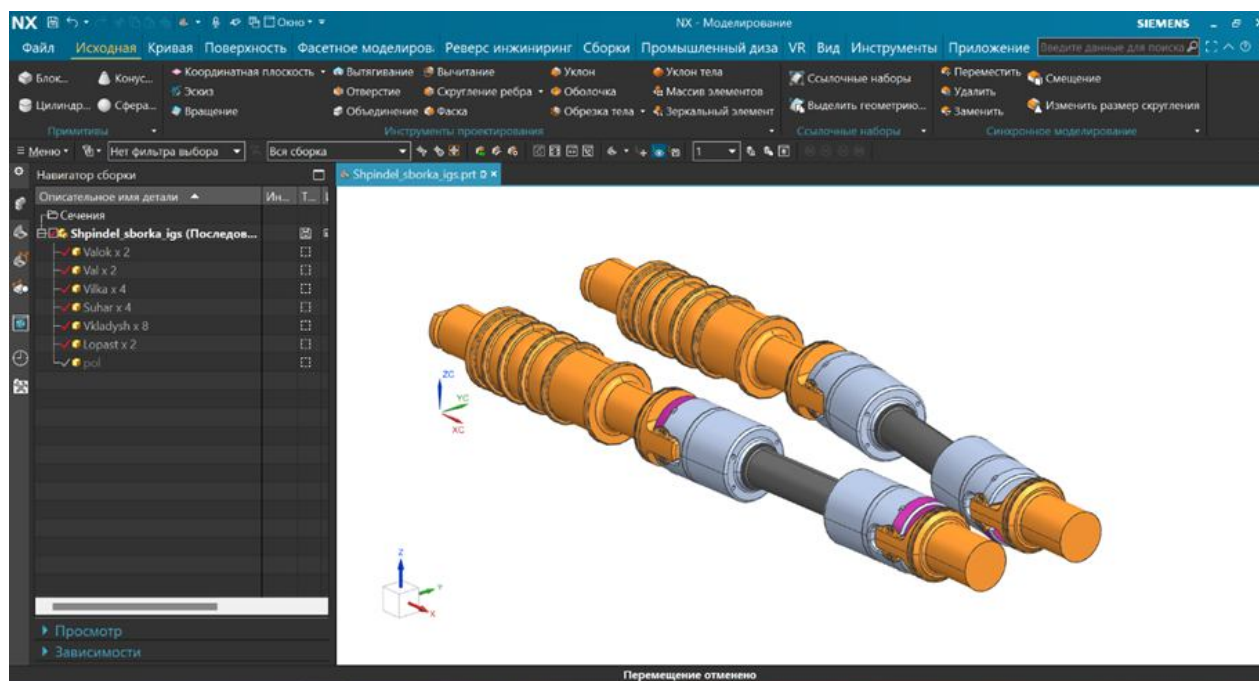


Рисунок 1 — Параметрическая модель шпиндельного соединения прокатного стана

Умение создавать подобные модели (рис. 1) является важным навыком инженера механика, так как позволяет устранить ошибки на этапе проектирования сложных конструктивных элементов детали, исключить «нестыковки» при компоновке узла (сборочной единицы), получить геометрические и массовые характеристики модели необходимые для решения задач инженерного анализа (подтверждения эксплуатационных характеристик, проверки работоспособности и надежности объекта исследования) и разработки технологического процесса производства изделия в рамках систем САМ (Computer-aided manufacturing), включающих подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ.

Некоторые проектировщики, в том числе и среди студентов, имеют опыт работы с программами среднего класса, такими как: SolidEdge, SolidWorks, AutoCAD, Inventor и Mechanical Desktop. Положительным моментом следует считать, что интерфейс современных программ 3-D моделирования в какой-то мере унифицирован, это позволяет разработчику легко адаптироваться к новой среде САПР — рабочего инструмента проектировщика. Однако, современные реалии требуют пересмотра отношения к импортным программным продуктам.

В настоящий момент доля рынка у отечественных компаний (Аскон, «Топ Системы», НТЦ «АИМ» и пр.) невелика. Их успешные разработки (КОМПАС, T-Flex, WinMachine) положительно зарекомендовали себя уже давно, не только благодаря адаптации программного обеспечения для наших языковых регионов и направленности на оформление документации в соответствии ЕСКД и ЕСТД, а благодаря разработке комплексного программного продукта, включающего все существующие CAD/CAE/CAM/PDM (Product Data Management) системы.

Следует отметить, что отечественные разработки в области САПР имеют большой потенциал развития — свидетельством этому является продвижение уникального геометрического ядра и параметрических технологий, например, как сделала компания Аскон, инвестируя еще на ранних этапах в создание собственного ядра — КОМПАС-3D kernel.

Таким образом, овладев практическими навыками в области наиболее распространенных систем трехмерного параметрического моделирования, современные инженеры могут легко адаптировать приобретенные компетенции к решению технических задач на базе новых, перспективных, в том числе и отечественных, программных продуктов, а с учетом государственной программы поддержки ИТ отрасли следует ожидать дальнейшего развития подобных систем и успешного закрытия вопросов импортозамещения в области САПР, что приобретает актуальное значение для таких важных отраслей народного хозяйства как металлургия и машиностроение.

Список литературы

1. Пересыпкин, К. В. Автоматизированное проектирование и моделирование конструкций ракетно-космической техники в среде MSC.Patran/MSC.Nastran : учеб. пособ. / К. В. Пересыпкин, В. П. Пересыпкин, Е. А. Иванова. — Самара : Изд-во СГАУ, 2007. — 189 с. : ил., табл.
2. Кикин, А. Б. Разработка методов и средств для структурно-кинематического проектирования рычажных механизмов машин легкой промышленности : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А. Б. Кикин ; СПбУТД. — Санкт-Петербург, 2006. — 362 с.
3. Рязанов, А. И. Параметрическое твердотельное CAD моделирование в Siemens NX. Методы, способы + Примеры : учеб. пособ. / А. И. Рязанов, Е. С. Горячкин, В. С. Мелентьев. — Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. — 162 с.
4. Klette, G. NX 7.5 — kurz und bündig: Grundlagen für Einsteiger / G. Klette. — Überarbeitete und aktualisierte Auflage. — Vieweg+Teubner Verlag, 2011. — 136 p.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ В РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ СЛЯБОВЫХ МНЛЗ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Для промышленной разливки стали на слябовую непрерывнолитую заготовку необходимо наличие ряда инновационных вспомогательных машин, обеспечивающих ее первосортное качество. К таким механизмам следует отнести следующие: система механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшового затвора, ковшевой шиберный затвор, катапульта для открытия выпускного канала металлургического ковша с донным шиберным затвором, манипуляторы для замены защитной трубы и погружного стакана, система быстрой смены погружных стаканов в условиях разливки стали сверхдлинными сериями, механические и пневматическая системы ввода шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ.

При этом необходимо обеспечить:

- системные подходы в практике рационального поисково-функционального преемственного конструирования и разработки инновационного оборудования металлургического профиля;
- постоянное совершенствование систем благодаря заложенным для этого резервным возможностям и коллективному мышлению разработчиков с высоким уровнем развитого творческого воображения;
- постоянное совершенствование методики рационального конструирования машин;
- ликвидацию безграмотности, а также часто допускаемых при конструировании ошибок с учетом основ разработки, бионики, теории решения изобретательских задач, антропометрии, приемов и методов технического творчества и т. п.;
- высокий уровень инженерной педагогики, современных методов образовательного научного процесса, новых интерактивных подходов к развитию творческого генетически обусловленного потенциала будущих инженеров;
- синергетический характер интеграции составляющих элементов в мехатронном агрегате, что проявляется в совместном их действии, направленном на достижение общей цели — получение качественной непрерывнолитой заготовки, обладающей лучшими свойствами, за счет того, что новые механизмы не просто дополняют друг друга, а объединяются таким образом, что образованная система (МНЛЗ со вспомогательным оборудованием) обладает качественно новыми свойствами;
- развитие методов расчета усовершенствованного вспомогательного оборудования слябовой МНЛЗ;
- высокий уровень унификации, стандартизации оборудования с выделением главных моментов при конструировании;
- всесторонний охват методических приемов процесса конструирования и процесса творческого мышления человека при этом;
- всестороннее исследование творческой деятельности главного инженера проекта с учетом положений науки о принятии решений (теории полезности);
- использование для решения конструкторских задач различных физических эффектов и свойств материала, нетрадиционных конструкторских решений, учет «мелочей».

Вывод. Таким образом, проведенные исследования дают базу для дальнейшего изучения и развития теории (научных основ) синергетического эффекта при разработке оборудования для непрерывной разливки стали с целью увеличения показателей технологического процесса.

Сидоров В. А.
д.т.н., профессор,
Пичахи А. В.
аспирант

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

ВЫБОР ТОЧЕК ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕДУКТОРОВ

Состояние такой сложной технической системы как современный непрерывный прокатный стан, имеющий производительность около 1,0 млн т в год, скорость прокатки 20–100 м/с, широкий сортамент выпускаемой продукции, во многом зависит от состояния подшипников качения. Снижению параметров безотказности подшипников качения способствуют: их большое число — до 10-ти на каждый комбинированный редуктор, при количестве прокатных клетей 18–30; использование однотипного масла для смазывания подшипников работающих в различных скоростных диапазонах; неопределённость нагрузки высокие контактные напряжения требующие использования деталей с высокой твёрдостью, что ограничивает восприятие ударных нагрузок; сложность организации процесса смазки; большое число деталей и др. В этих условиях эффективное обеспечение безотказной работы непрерывного прокатного стана, в числе общего перечня задач, возможно на основании информации о техническом состоянии подшипников качения.

Возможности вибрационного контроля, расширенные развитием электронных и компьютерных технологий, в 90-х годах прошлого века позволяют реализовать целый ряд методов диагностирования состояния подшипников [1–5]:

- по среднеквадратичному значению виброскорости — позволяет выявлять дефекты подшипников на последних стадиях их развития;
- по спектру вибросигнала — применяется наиболее часто — позволяет выявлять и идентифицировать дефекты рядом расположенных узлов;
- по значению пик-фактора — соотношению пикового и среднеквадратичного сигнала виброускорения на высокой частоте, модификации: HFD (High Frequency Detection — метод обнаружения высокочастотного сигнала), SPM (Shock Pulse Measurement — метод измерения ударных импульсов), SE (Spike Energy — метод измерения энергии импульса);
- по спектру огибающей сигнала — позволяет выявлять дефекты подшипников на самых ранних стадиях, анализируя гармонические проявления высокочастотной области вибрационного спектра.

Возможности современных средств измерения вибрации позволяют реализовать анализ временной формы вибрационного сигнала, контроль амплитуды/фазы, анализ круглограмм при периодическом и контроле в составе стационарных систем [6–10]. При этом, достоверность получаемой информации, во многом определяется выбором места и режима измерения. И если эта задача успешно решена для механического оборудования, работающего в режиме длительного нагружения [11, 12], то при выборе точек измерения состояния подшипников качения в составе комбинированных редукторов необходимо учитывать индивидуальные особенности расположения и изменения зоны контакта при захвате слитка.

В соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ ИСО 10816-3-99 измерение среднеквадратичного значения виброскорости проводится в трёх взаимно перпендикулярных направлениях (вертикальном — В, поперечном или горизонтальном — П и осевом — О). С учётом расположения подшипниковых узлов в жёстком корпусе комбинированного редуктора количество датчиков может соответствовать двум точкам — входной и выходной вал. Это

может быть достаточным для постоянного контроля в составе стационарной системы при условии выделения режимов рабочего и холостого хода.

Известным фактом является наибольшая информативность переходных процессов [8], в данном случае — захват слитка прокатными валками и выход слитка из клетки. При этом увеличивается крутящий момент и возникающие силы в зубчатом зацеплении перемещают верхний валок шестерённой клетки в поле зазора с ударом. Холостой ход содержит информацию о состоянии подшипников нижнего валка, но зона контроля при местном нагружении недоступна. В данном случае целесообразно использование встроенных, а не навесных датчиков, что снизит степень затухания вибрационного сигнала при прохождении через металлоконструкции корпусных деталей, повысит информативность высокочастотных методов диагностирования подшипников качения и станет шагом для перехода к мехатронным системам.

Временные реализации вибрационного сигнала, зафиксированные без усреднения, с периодом 100 мкс и менее, позволяют фиксировать изменения во время переходных процессов (рис. 1). Предполагая захват или выход слитка тестовым воздействием, эффективно используются преимущества тестового диагностирования. Интерес представляет механизм возникновения биений, реализация которого приведена на втором варианте в режиме рабочего хода.

Аналогичные процессы — изменение положения зоны контакта, выборка зазоров и перемещение валов будут наблюдаться при захвате слитка и по остальным подшипникам редуктора. Установка датчиков стационарной системы в данном случае будет явно избыточной, а использование многоканальных переносных систем позволит за короткое время периодически получать данные о состоянии элементов в фиксированный период времени одновременно.

Наиболее податливым элементом в комбинированном редукторе являются стягивающие шпильки, их торцевые поверхности в наибольшей степени удовлетворяют требованиям установки одноканальных датчиков стационарных систем, фиксируя информацию об изменении упруго-демпфирующих свойств, включая ослабление резьбовых соединений.

Прохождение вибрационного сигнала по элементам шестерённой клетки приводит к его ослаблению, затуханию высокочастотных составляющих. Датчик должен устанавливаться как можно ближе к подшипниковому узлу.

Система стационарного контроля должна быть ориентирована на защиту от наиболее вероятного отказа, в этом случае количество датчиков определяет характер возможного повреждения. А периодический контроль превращается в исследование отражений технического состояния элементов редуктора в вибрационном сигнале. Если в системе стационарного контроля преобладают диагностические задачи устанавливаются однокоординатные датчики, если задачи контроля — трёх координатные. В любом случае необходимо выполнить требования по установке датчиков (на шпильках, на выносных или промежуточных элементах), защитить соединительные кабели, разъёмы и предусмотреть быстрое снятие датчиков при проведении ремонтных работ.

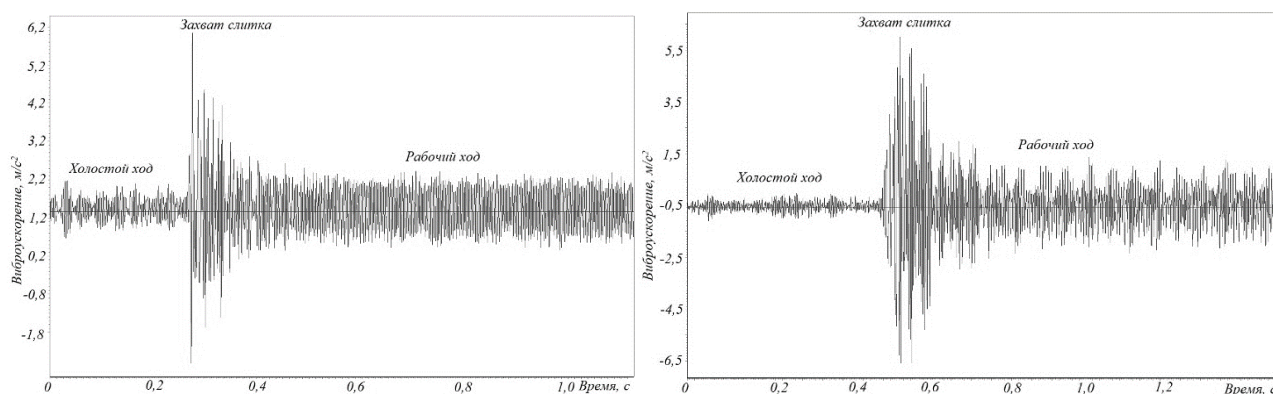


Рисунок 1 — Варианты изменения виброускорения при прокатке

При проведении измерений параметров вибрации в трех взаимно перпендикулярных направлениях верхнего комбинированного редуктора прокатной клетки № 18 непрерывного сортового стана «390» проведено в контрольных точках, расположение которых показано на рисунке 2. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита, что снижает верхний частотный диапазон контроля до 5 кГц.

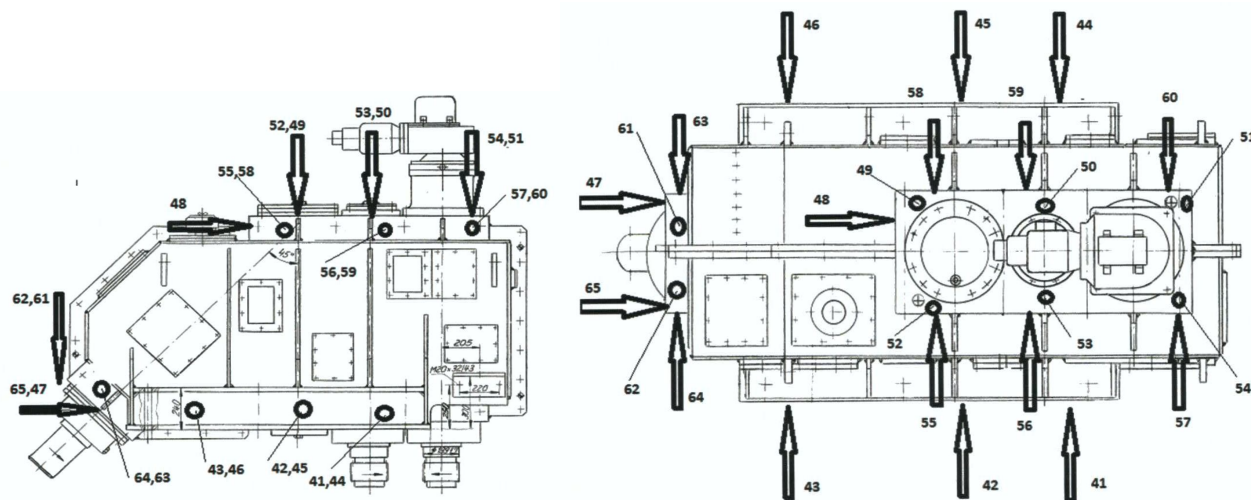


Рисунок 2 — Расположение контрольных точек при измерении вибрации верхнего комбинированного редуктора прокатной клетки № 18

Большое количество данных, полученных после измерений, потребовало порядка 5-ти дней для их обработки. Измерения по каждой точке содержали 3200–6400 линий в спектре виброскорости, дополнительно фиксировались значения общего уровня, спектры виброускорения и временные реализации. При этом не учитывалось взаимное влияние элементов. В практике работы заводской службы технического диагностирования должен отслеживаться оптимальный объем информации. Поэтому, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- выбору контрольных точек должен предшествовать этап моделирования направлений приложения сил на холостом ходу и под нагрузкой;
- при моделировании необходимо рассмотреть одновременно модели крутильных и поперечных колебаний, затухание сигнала и учесть их результаты при выборе контролируемых параметров;
- следует выполнить оценку рисков возникновения повреждений как по клетям прокатного стана с учётом скорости прокатки и обжатий, так и по элементам комбинированного редуктора;
- основой для выбора режимов измерений должны стать результаты моделирования процессов развития повреждений подшипников качения;
- процесс измерения вибрации должен включать: режим постоянного контроля экстремальных событий; периодический контроль наиболее информативных точек контроля, полное периодическое обследование при помощи многоканальных виброизмерительных систем.

Список литературы

1. Вибродиагностика : монография / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский, Е. С. Голуб и др. ; под ред. Г. Ш. Розенберга. — СПб. : ПЭИПК, 2003. — 284 с.
2. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации : учеб. пособ. / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. — СПб. : ГМТУ, 2012. — 159 с.
3. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. — М. : Машиностроение, 1996. — 276 с.

4. Руссов, В. А. Спектральная вибродиагностика / В. А. Руссов. — Пермь : Вибро-Центр, 1996. — 176 с.
5. Неразрушающий контроль : справочник. В 8 т. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. ; под общ. ред. В. В. Клюева. — 2-е изд., дораб. — М. : Машиностроение, 2006. — 829 с.
6. Гайгемюллер, Г. Диагностика агрегатов в прокатных цехах / Г. Гайгемюллер, У. Клаппорт, У. Лейтриц // Черные металлы. — 1996. — № 12. — С. 48–50.
7. Мекел, Дж. Применение компьютеризированных систем наблюдения и диагностики на прокатных станах / Дж. Мекел, В. Геропп, А. Аш // Черные металлы. — 1999. — № 12. — С. 53–60.
8. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680 : монография / В. В. Веренев, В. И. Большаков, А. Ю. Путноки и др. — Днепропетровск : ИМА-пресс, 2011. — 184 с.
9. Система вибродиагностики для оборудования прокатного производства / А. В. Баглай, В. В. Воробьев, А. Н. Гузеев, М. М. Кипин // Черные металлы. — 2020. — № 2. — С. 62–69.
10. Виброконтроль состояния подшипников привода прокатных станов / С. И. Платов, С. М. Коробейников, Д. В. Терентьев, А. В. Ярославцев // Сталь. — 2014. — № 4. — С. 73–75.
11. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. — М. : Машиностроение, 2000. — 344 с.
12. ГОСТ Р ИСО 10816-3-99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15 000 мин⁻¹. — Введ. 1999–12–22. — М. : Издательство стандартов, 2000. — 11 с.

Левченко Э. П.
к.т.н., доцент,
Вишневский Д. А.
д.т.н., доцент,
Левченко О. А.
к.т.н., доцент,
Изюмов Ю. В.
к.т.н., доцент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ОСОБЕННОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДИСКОВЫХ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Дисковые дробильно-измельчительные машины традиционно служат для получения готового продукта малой крупности и, по сравнению с другими классами машин, обладают более низкой производительностью. Однощелевые дисковые мельницы конструктивно проще, чем многощелевые, но имеют недостаточную производительность. Однако дисковые многощелевые дробильно-измельчительные машины в связи со сложностью конструкции имеют низкую ремонтпригодность и трудность регулировки величины щелей. При решении задач по повышению надежности работы многощелевых машин были разработаны новые конструкции мельниц [1], позволяющих при обеспечении регулировки величины щелей и хорошей ремонтпригодности повысить эффективность процесса измельчения.

Дисковые мельницы служат для измельчения материалов с твердостью не выше 6–7 единиц по шкале Мооса. Измельчаемое сырье через воронку поступает в рабочую камеру и, попадая между вращающимися дисками, подвергается истиранию путем сдавливания и трения. Затем под влиянием центробежных сил происходит калибровка на периферии дисков в кольцевом зазоре. Величина зазора регулируется на необходимую крупность [2].

Одним из основных показателей технического уровня дисковых мельниц является производительность, которая оценивается ее тремя видами:

- 1) конструктивно-теоретической $P_{кт}$, $\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{т} / \text{ед. времени}$;
- 2) технической $P_{тх}$, $\text{кг} \cdot \text{т} / \text{ед. времени}$;
- 3) эксплуатационной $P_э$, $\text{кг} \cdot \text{т} / \text{ед. времени}$.

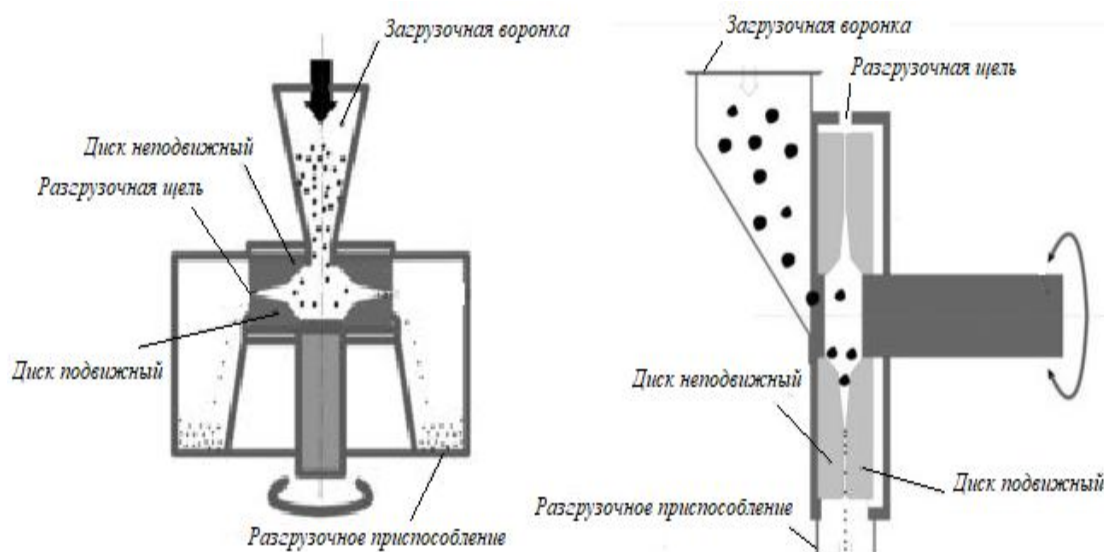


Рисунок 1 — Основные конструктивные исполнения дисковых мельниц

Машины дискового типа комбинированного вида воздействия на материал можно характеризовать тремя видами рабочего процесса: загрузки исходного материала; внутрикамерного принудительного самоизмельчения; выпуска готового продукта через щелевой зазор между рабочими органами [3].

При расчете конструктивно-теоретической производительности может быть получен результат, отражающий предельный теоретически возможный выход готовой продукции с учетом только особенностей конструкции данной машины и состояния ее главных параметров.

Если принять у мельниц со щелевым фронтом загрузки пропускную способность по готовому продукту, характеризующую ее технические возможности пропускать через зазор между дисками определенное количество продукта в единицу времени с учетом вероятностной величиной, отражающей степень заполнения готовым продуктом объема щелевого зазора, то теоретическая производительность может быть выражена следующей зависимостью

$$P_{km} = f(n_{щ}) = 3600 \cdot \pi \cdot d_{\delta} \cdot \delta \cdot V \cdot \gamma \cdot k_3,$$

где $f(n_{щ})$ — безразмерная величина $f(n_{щ}) \geq 1$, выражающая функциональную зависимость между количеством щелевых зазоров $n_{щ}$ и степенью повышения производительности выпуска готового продукта по отношению к монощелевому варианту машины; d_{δ} — диаметр базовой окружности щели; δ — средний размер щелевого зазора; V — средняя скорость истечения готового продукт из щелевого зазора; γ — насыпная объемная масса готового продукта.

Техническая производительность определяется с учетом всех факторов, существенно влияющих на интенсивность рабочего процесса и относящихся к группе технических и физико-механических. На техническую производительность измельчительных машин оказывают влияние следующие факторы, не отраженные в формуле теоретической производительности.

Группа коэффициентов, отражающих физико-механические свойства исходного материала:

- 1) фракционный состав исходного материала k_f ;
- 2) влажность исходного материала k_w .

Группа технических коэффициентов:

- 1) конструкция внутренних элементов дисков k_k ;
- 2) степень износа рабочих элементов дисков k_u ;
- 3) неравномерность подачи исходного материала k_n .

С учетом указанных коэффициентов техническая производительность измельчительных машин может быть определена по формуле

$$P_m = P_k \cdot k_f \cdot k_w \cdot k_k \cdot k_u \cdot k_n.$$

Эксплуатационная производительность может существенным образом отличаться от конструктивно-технологической, так и от технической ввиду индивидуальных особенностей конструктивного устройства машины, а также от вида и свойств измельчаемого материала, поэтому в каждом индивидуальном случае должна определяться отдельно.

$$P_{\text{э}} = \frac{Q_m}{t},$$

где Q_m — масса измельчаемого материала; t — фактическое время, за которое материал полностью измельчается в машине.

Таким образом, конструктивно-теоретическая, техническая и эксплуатационная производительности могут существенно отличаться между собой, наиболее близкие результаты можно получить только в процессе эксплуатации смой дробильно-измельчительной машины. При этом вполне логично, что эксплуатационная производительности, зависящая от многих,

в том числе и случайных не учтенных факторов, будет давать наиболее реальных результат, которым и следует руководствоваться в реальных условиях производств. Причем для различных материалов данная производительность может существенно отличаться по величине.

Список литературы

1. Левченко, Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-тилетней изобретательской деятельности) : монография / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — 353 с.
2. Левченко, Э. П. Повышение эффективности дисковых измельчителей / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, Л. Г. Алферов // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 5 (48). — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — С. 92–96.
3. Комбинированные дробильно-измельчительные машины и возможности их применения для измельчения отходов шамотного кирпича / Э. П. Левченко, О. А. Левченко, А. М. Зинченко и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. 33. — С. 171–179.

Еронько С. П.
д.т.н., профессор,
Ошовская Е. В.
к.т.н., доцент,
Понамарёва Е. А.
аспирант,
Цыхмистро Е. С.
инженер

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ КАТАПУЛЬТЫ ШИБЕРНОГО ЗАТВОРА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

После замены стопорных устройств шиберными затворами для регулируемого слива жидкой стали из разливочных ковшей у производителей возникла проблема, обусловленная необходимостью применения кислорода в начале разливки для прожигания корки, часто образующейся на поверхности стартовой смеси, которой заполняют канал ковшового стакана. Несмотря на предпринимавшиеся меры, до настоящего времени не удалось добиться 100%-ной вероятности начала разливки в штатном режиме, т. е. беспрепятственного истечения жидкого металла при первом открывании затвора и высыпания из его канала стартовой смеси.

Одним из действенных способов, позволяющим исключить использование кислорода и устранить вызываемый им интенсивный износ поверхности стенок выпускного канала, является механическое разрушение твердой перемычки с помощью катапульты, предварительно размещаемой в нижней части ковшового затвора. В момент полного совмещения отверстий огнеупорных плит затвора и высыпания стартовой смеси катапульта выбрасывает вверх стальной стержень, который при столкновении с образовавшейся коркой разбивает ее на части и открывает путь потоку жидкой стали.

Для проектирования опытно-промышленного образца катапультной системы, предназначенной к использованию в затворах сталеразливочных ковшей различной вместимости, потребовалось обоснование ее конструктивных и энергосиловых параметров. Поставленную задачу решали на основании закона о сохранении энергии исследуемой системы, для чего составили расчетную схему, которая показана на рисунке 1.

При взведенной катапульте, когда ее плоские упругие элементы получили деформацию в виде прогиба f , потенциальная энергия каждого из них составит:

$$W_{\text{п}} = \frac{kf^2}{2},$$

где k — коэффициент упругости элемента.

Суммарная энергия обоих упругих элементов в момент срабатывания катапульты преобразуется в кинетическую энергию металлического стержня $m_{\text{ст}}$, выбрасываемого вверх вдоль канала со скоростью $v_{\text{ст}}$.

$$W_{\text{к}} = \frac{m_{\text{ст}} v_{\text{ст}}^2}{2}. \quad (1)$$

Изменение кинетической энергии металлического стержня равно сумме работ действующих на него сил

$$W_{\text{к}} = A_{\text{дс}} + A_{\text{рк}}. \quad (2)$$

В этом выражении $A_{\text{дс}}$ — работа силы динамического сопротивления сыпучей смеси, действующей на лобовую часть движущегося стержня; $A_{\text{рк}}$ — работа силы, требуемой для разрушения металлической корки, которая образовалась на входе в канал разливочного стакана.

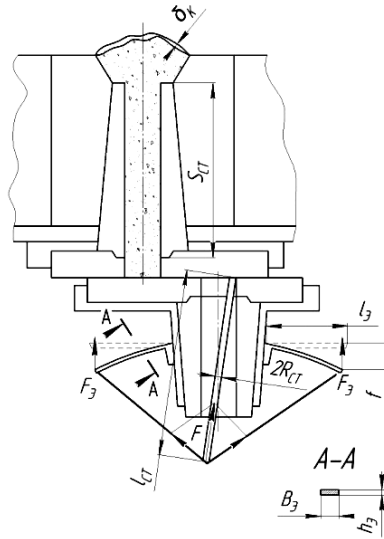


Рисунок 1 — Расчетная схема для определения параметров катапульти

Работа силы динамического сопротивления $F_{дс}$, действующей на стержень, после его перемещения по каналу стакана, равном $S_{ст}$, составит

$$A_{дс} = F_{дс} S_{ст} = 0,5 \rho_{ср} v_{ст}^2 \pi R_{ст}^2 S_{ст}, \quad (3)$$

где $\rho_{ср}$ — условная плотность среды, в которой движется стержень; $R_{ст}$ — радиус поперечного сечения стержня.

Условную плотность среды в выпускном канале при неполном высыпании из него стартовой смеси, имеющей насыпную плотность $\rho_{см} = 3600 - 3750 \text{ кг/м}^3$, как показали результаты ранее проведенных модельных исследований, можно принять $\rho_{ср} = (0,3 \dots 0,5) \rho_{см}$.

Работа силы, требуемой для разрушения корки толщиной δ_k при пределе прочности ее материала σ и необходимом перемещении стержня S_p , равном $R_{ст}$.

$$A_{рк} = 2\pi R_{ст} \delta_k \sigma S_p = 2\pi R_{ст}^2 \delta_k \sigma. \quad (4)$$

Подставив в формулу (1) значение массы стержня, имеющего длину $l_{ст}$ и плотность материала $\rho_{ст}$

$$m_{ст} = \pi R_{ст}^2 l_{ст} \rho_{ст}$$

равенство (2) с учетом выражений (3) и (4) принимает вид

$$0,5\pi R_{ст}^2 l_{ст} \rho_{ст} v_{ст}^2 = 0,5\pi R_{ст}^2 \rho_{ср} S_{ст} v_{ст}^2 + 2\pi R_{ст}^2 \delta_k \sigma.$$

После несложных преобразований

$$l_{ст} \rho_{ст} v_{ст}^2 - \rho_{ср} v_{ст}^2 S_{ст} = 4\delta_k \sigma \quad \text{или} \quad v_{ст}^2 (l_{ст} \rho_{ст} - \rho_{ср} S_{ст}) = 4\delta_k \sigma.$$

Требуемая скорость движения стержня в канале разливочного стакана

$$v_{ст} = \sqrt{\frac{4\delta_k \sigma}{l_{ст} \rho_{ст} - \rho_{ср} S_{ст}}} = 2 \sqrt{\frac{2\delta_k \sigma}{l_{ст} \rho_{ст} - \rho_{ср} S_{ст}}}.$$

Приравняв запас кинетической энергии движущегося стержня к суммарному запасу потенциальной энергии двух плоских упругих элементов катапульти, находящихся во взведенном положении

$$W_k = 2 \frac{kf^2}{2}$$

при заданном максимальном значении f требуемый коэффициент упругости элемента k и развиваемая им сила F_3 соответственно будут равны

$$k = \frac{W_k k}{f^2} \text{ и } F_3 = kf.$$

Далее с учетом размеров шибберного затвора конструктивно принимаем длину l_3 и ширину b_3 упругого элемента, при модуле упругости его материала E , находим осевой момент инерции и толщину поперечного сечения I и h_3 ,

$$I = \frac{F_3 l_3}{3Ef} \text{ и } h_3 = \sqrt{\frac{12I}{b_3}}.$$

Задаваемые исходные и полученные расчетные значения параметров катапульты приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 — Задаваемые исходные значения параметров катапульты

Вместимость ковша, т	Длина канала ковшового стакана $S_{ст}$, мм	Длина стержня катапульты $l_{ст}$, мм	Радиус поперечного сечения стержня $R_{ст}$, мм	Масса стержня $m_{ст}$, кг	Максимальная толщина разрушаемой корки δ_k , мм	Предел прочности материала корки σ , МПа
100	300	250	4	0,1	3	30
150	300	250	4	0,1	3	30
200	300	250	4	0,1	3	30
250	370	320	5	0,2	3	30
300	370	320	5	0,2	3	30

Таблица 2 — Расчетные значения энергосиловых параметров катапульты

Вместимость ковша, т	Требуемая скорость движения стержня, $v_{ст}$, м/с	Кинетическая энергия стержня W_k , Дж	Длина упругого элемента l_3 , мм	Максимальный прогиб упругого элемента f , мм	Коэффициент упругости элемента k , Н/мм	Сила, развиваемая упругим элементом F_3 , Н	Осевой момент инерции поперечного сечения упругого элемента I , мм ⁴	Ширина поперечного сечения упругого элемента b_3 , мм	Толщина поперечного сечения упругого элемента h_3 , мм
100	14,2	10,0	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
150	14,2	10,0	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
200	14,2	10,0	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
250	12,8	16,4	250	80	2,6	208	67,7	30	3,0
300	12,8	16,4	250	80	2,6	208	67,7	30	3,0

При промышленном использовании предложенной катапульты исключаются недостатки, присущие зарубежным аналогам (сложность конструкции, дороговизна изготовления и одноразовое применение всей системы). Эксплуатационные затраты отечественного образца связаны лишь с расходом металлических стержней, поскольку его силовой блок вынесен из выпускного канала шибберного затвора сталеразливочного ковша и может использоваться многократно.

Ушаков В. И.
к.т.н.,
Саратовский Р. Н.
к.т.н., с.н.с.

*НИПКИ «Параметр», Донбасский государственный технический институт,
г. Алчевск, ЛНР*

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ

Сегодня для конкретных металлургических задач можно разработать специализированные системы, благодаря чему индукционные тигельные печи средней частоты (ИТПСЧ) можно быстро преобразовать в универсальную плавильную установку.

Несмотря на то, что теоретически для плавления литейного чугуна при температурах до 1500 °С необходимо затрачивать 490–520 кВтч/т, средние величины потребления, которые были достигнуты на сталелитейных предприятиях, были значительно выше. В Англии для плавления литейного чугуна указана средняя потребляемая мощность в 718 кВтч/т [1], а в статистическом обзоре французских предприятий литейного чугуна [2] указано значение 855 кВтч/т.

Таким образом, можно утверждать, что существует высокий потенциал экономии электроэнергии. На самом деле снижение потребляемой мощности на 20 % может быть достигнуто без значительных инвестиций, при условии соблюдения определенных правил. Такие принципы могут служить основой для эффективной стратегии снижения затрат, что все более важно в нынешние времена, когда стоимость электроэнергии постоянно повышается. Учитывая такую ситуацию, задача состоит в предоставлении применимых предложений и рекомендаций, что способствует все более эффективному и надежному применению ИТПСЧ.

Плавка черных и цветных металлов в ИТПСЧ получили широкое распространение особенно в литейных производствах машиностроительных и металлургических предприятиях. По технологической эффективности установки индукционной среднечастотной плавки успешно конкурируют с традиционными плавильными агрегатами, использующими огневые методы плавки — коксовые (КВ) и газовые (ГВ) вагранки, а также с электродуговыми печами переменного (ДСП) и постоянного тока (ДППТ). Сравнение применяемых в литейном производстве плавильных агрегатов для плавки чугуна приведено в таблице 1 по удельному расходу электроэнергии (P_{Σ} , кВтч/т) и по относительной себестоимости (O_c), где за единицу принята себестоимость одной тонны расплава чугуна, полученной в ГВ.

ИТПСЧ по себестоимости одной тонны расплава чугуна уступают только газовым вагранкам и значительно превосходят остальные типы плавильных агрегатов, а также имеют наименьший удельный расход электроэнергии среди электропечей. При этом по экологической безопасности ИТПСЧ остаются вне конкуренции и производят значительно меньше шума, выбросов пыли, угарного и сернистого газа.

Удельная энтальпия для плавки литейного чугуна максимум до 1500 °С находится в области 390 кВтч/т. Если рассматривать конкретную установку печи, можно получить следующие значения: суммарные электрические и тепловые потери (рис. 1) современной десятитонной среднечастотной печи равны около 126 кВтч/т.

Следовательно, для всех практических применений потребляемая мощность только на плавку будет суммарно равна приблизительно 516 кВтч/т (табл. 2). Это означает, что при максимальной удельной мощности 1000 кВт/т, все содержимое печи будет расплавлено за 31 минуту. Время простоя, например, на удаление шлака, отбор проб, анализ, регулировку и разлив ориентировочно будет занимать от 15 до 20 минут, что можно увидеть в таблице 3.

Таким образом, весь цикл плавки будет равен 45–50 мин. Поэтому применение «высокоскоростной» печи не будет иметь большого смысла, если время простоя не будет сокращено до минимума или если не будет введена установка tandemных печей. При планировании и разработке

установки плавильной печи должна быть тщательно рассмотрена оптимизация такого времени простоя. При эксплуатации уже установленной печи необходимо тщательно планировать и оптимизировать время простоя. Для этого необходимо учитывать своевременную подачу точно взвешенных шихтовых материалов, которые должны быстро и непрерывно подаваться в печь.

Таблица 1 — Сравнение плавильных агрегатов по удельному расходу электроэнергии и по относительной себестоимости

Тип плавильного агрегата	$P_{э}$, кВтч/т	O_c , о. е.
ГВ	50–70	1
КВ	50–70	1,5–2
ДСП	500–800	2,0
ДПТ	480–650	1,8
ИТППЧ	1200–1300	2,0
ИТПСЧ	500–600	1,4

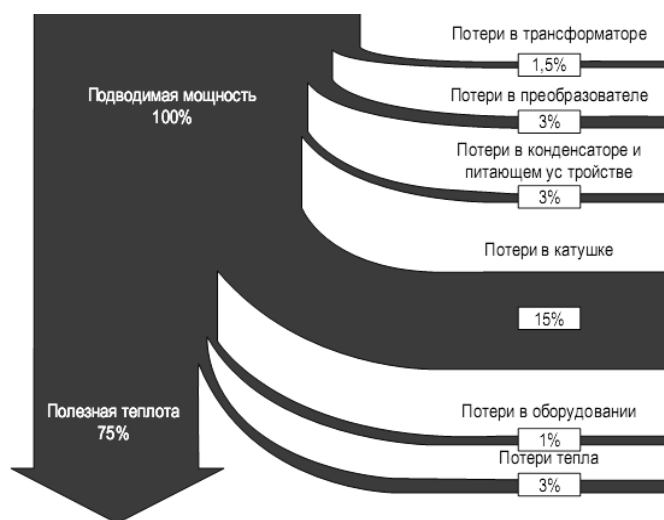


Рисунок 1 — Диаграмма стандартного потока энергии при плавке литейного чугуна

Таблица 2 — Потребляемая энергия и потери энергии при плавке

№ п/п	Потребляемая энергия и потери энергии	кВт ч/т
1	Удельная энтальпия для плавки литейного чугуна	390
2	Потери энергии в трансформаторе	7
3	Потери энергии в преобразователе частоты	18
4	Потери энергии в кабелях, токопроводящих шинах	9
5	Потери энергии в индукторе	77
6	Потери энергии в магнитопроводе	4
7	Тепловые потери	11
8	Итого потери п. 2–8	126
9	Суммарная потребляемая энергия	516

Таблица 3 — Стандартное время простоя при операциях по плавке литейного чугуна

№ п/п	Время простоя	мин
1	Удаление шлака	4
2	Измерение температуры	2
3	Отбор проб	3
4	Науглероживание	5
5	Разливка	3
6	Всего	17

Инженеры уже давно стремятся получить преимущества за счет полного использования номинальной выходной мощности таких сложных установок и максимально повысить показатель выплавки конкретной системы. Такие усилия привели к разработке тандемных установок, что легло в основу технологии Twin-Power фирмы ABB [3], DUAL-TRAK фирмы Inductotherm, DUOMELT фирмы OTTO JUNKER, аналогичные фирмы РЭЛТЕК. В конфигурации такого типа две печи без сердечника подключены к одному преобразователю частоты. При помощи специальной схемы цепи общий вывод преобразователя можно распределить между печами в любой необходимой пропорции. Создание таких систем позволило повысить эффективность использования установленной мощности оборудования системы электропитания печей, снизить ее стоимость на 30–40 % и повысить производительность плавильных установок [4].

Основным преимуществом тандемной установки DUOMELT является то, что в то время, когда в одной печи выполняются не производственные операции, плавка может продолжаться в другой печи только с небольшим снижением подводимой мощности. В результате этого более 95 % установленной мощности преобразователя будет использовано на плавку в течение всего периода, благодаря чему пропускная способность доводится до максимума.

Для обеспечения оптимальных условий для специальных металлургических задач можно управлять подводимой мощностью, частотой печи и концентрацией мощности вдоль индуктора печи. Для удовлетворения таких требований компания OTTO JUNKER разработала две специальные конфигурации контура, которые называются технологией концентрации мощности (Power-Focus) и многочастотной технологией (Multi-Frequency). Обе системы доказали свои преимущества на практике в различных областях применения. Технология концентрации мощности обеспечивает возможность автоматической или свободно выбираемой концентрации мощности в той секции индуктора (верхней или нижней), где она необходима больше всего. Таким образом, если печь наполнена только наполовину, подводимую мощность можно сконцентрировать в области дна тигля, после чего в данной зоне будет доступно больше энергии. Многочастотная технология предоставляет возможность изменения автоматической частоты во время текущего процесса плавки. Например, необходимая частота 250 Гц будет применяться для плавки шихтового материала. А для добавки науглероживающих средств и легирующих добавок система автоматически переключится на более низкую частоту 125 Гц.

Выводы. Для повышения эффективности ИТПСЧ необходимо:

1. Плавку производить при максимальной удельной мощности 700–1000 кВт/т.
2. Минимизировать потери энергии при плавке за счет сокращения времени простоя при сопутствующих технологических операциях при плавке чугуна.
3. Применять современные системы индукционной плавки типа DUOMELT с автоматическим контролем и управлением всеми процессами от приготовления и подачи шихты до разлива и выдержки металла.
4. Для получения оптимальных условий для специальных металлургических задач нужно управлять подводимой мощностью, частотой печи и концентрацией мощности вдоль индуктора печи.

Список литературы

1. Эффективная плавка в индукционных печах без сердечника: руководство по надлежащей практике № 50. — ETSU, Харвелл, Дидкот, Оксфордшир, 2000.
2. Джоливет, Р. // Литейное производство сегодня. — 2003. — № 229. — С. 36–39.
3. Викар, Х. Автоматизация плавки в литейном производстве ISSN0024 / Х. Викар // Литейное производство. — 1994. — № 6. — С. 26–32.
4. Мортимер, Дж. Х. Завтрашние технологии индукционной плавки существуют уже сегодня / Дж. Х. Мортимер // Литейщик России. — 2002. — № 1. — С. 32–37.

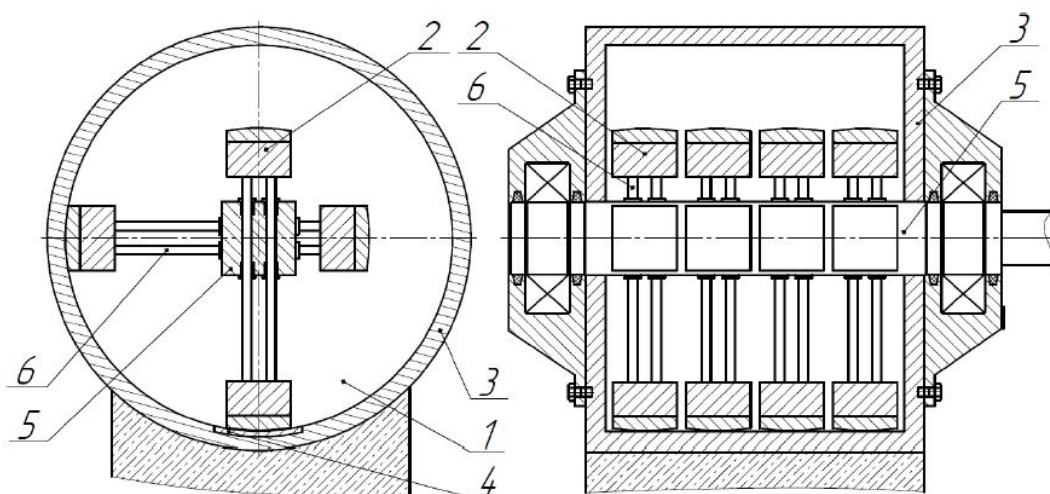
ПРЕИМУЩЕСТВА РАСКАЛЫВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ ПРЯМЫМ СТЕСНЕННЫМ УДАРОМ

Как известно сферическая и остроугольная стальная колотая дробь довольно широко используется как в машиностроении, металлургии, так и в авиа- и автомобилестроении, а также прочих отраслях промышленности.

Существующая технология раскалывания круглой дроби в шаровой мельнице имеет ряд недостатков, таких как высокие энергопотери, приводящими к повышенному тепловыделению, низкий выход готового продукта, переизмельчение дробимого материала из-за многократного ударного соударения мелющими шарами, и, соответственно, низкий коэффициент полезного действия.

Для улучшения качества дробимого материала в данной статье предлагается использование метода раскалывания металлической дроби с посредством стеснённого центрального удара [1], позволяющего осуществлять более благоприятный контакт дробящего элемента и стальной дроби. Такой способ наложения разрушающей нагрузки предотвращает переизмельчение готового продукта и уменьшает энергозатраты, что позволяет существенно повысить эффективность самого процесса раскалывания. Таким образом, для осуществления представленного выше способа раскалывания стальной дроби предлагается использовать ударный роторный измельчитель с падающими молотами (рис. 1) [2].

Запатентованный способ производства остроугольной стальной дроби стесненным ударом в дробильно-измельчительной технике ранее не применялся.



1 — рабочая камера; 2 — мелющие тела (ударник); 3 — стенка корпуса;
 4 — лист брони; 5 — ротор; 6 — направляющие штоки

Рисунок 1 — Схема роторно-ударного измельчителя

При ударном контакте происходит деформация взаимодействующих тел и возникают напряжения, определяемые по зависимостям, основанным на решении задачи Герца об упругом контакте тел сферической формы, имеющим решение в замкнутой форме [3, 4] для контактного взаимодействия с рабочей поверхностью ударного элемента и дробинки:

$$Q_1 = 0,918 \sqrt[3]{\frac{P_y \cdot \left(\frac{r + R_1}{2r \cdot R_1}\right)^2}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)^2}}; \quad (1)$$

где r — радиус частицы дроби; R_1 — радиус ударной поверхности молота; μ_1 — коэффициент Пуассона материала дроби; μ_2 — коэффициент Пуассона материала молота; E_1 — модуль упругости дроби; E_2 — модуль упругости молота.

По результатам численного решения определено, что наибольшее напряжение в дробинке возникает в зоне контакта с ударным элементом.

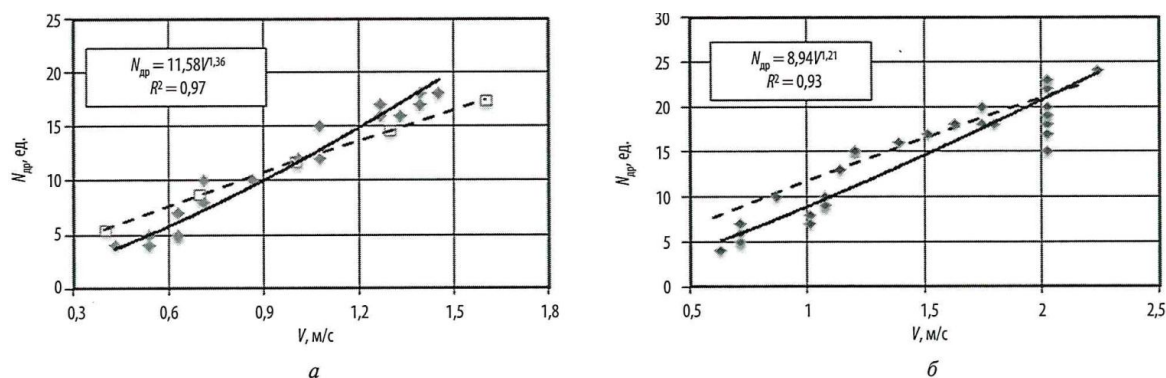
Зависимость для определения максимального количества дробинки, при котором обеспечивается их гарантированное раскалывание в процессе реализации одиночного центрального стесненного удара с определенными техническими параметрами процесса представлена следующей формулой:

$$N_{др} = 0,25 \frac{\sqrt[5]{(V^2 \cdot m_y \cdot \Theta^4 \cdot R_{np}^3)^3}}{(\sigma_{дин})^3}. \quad (2)$$

где V — скорость удара; m_y — масса ударного элемента; Θ — параметр, учитывающий свойства соударения; R_{np} — приведенный радиус кривизны контактных поверхностей соударяющихся тел; $\sigma_{дин}$ — динамический предел прочности при реализации стесненного соударения ударного органа с материалом, МПа.

При проведении на маятниковом копре экспериментальных исследований по разрушению стальной дроби с помощью стесненного удара, были получены числовые значения и построены графические зависимости количества дробинки, раскалываемых одиночным ударом молотом маятникового копра от скорости ударного контакта (рис. 2) [5].

Для определения значения экспериментального коэффициента пропорциональности предела прочности материала k_σ , зависящего от физико-математических свойств дроби и условий контактного нагружения, сопоставляли данные, полученные по формуле $\sigma_{дин} = k_\sigma \sigma_{ст.р.}$ с коэффициентом $k_\sigma = 3,06$, и данными экспериментов по раскалыванию дроби. В результате получено уточненное значение коэффициента предела прочности материала в условиях наложения стесненного удара: $k_\sigma = 4,6$.



а — для дроби диаметром 2,3 мм; б — для дроби диаметром 2,8 мм

Рисунок 3 — Зависимость числа дробинки, раскалываемых одиночным ударом молотом маятникового копра от скорости ударного контакта: теоретическая (пунктирная линия) и эмпирическая (сплошная линия) зависимости

В виде регрессионной модели выбрана зависимость аппроксимирующей функции для определения числа дробин, разрушаемых одиночным ударом молота маятникового копра, от скорости ударного контакта для стальной дроби в виде $N_{др} = kV^a$, где k и a — коэффициент и показатель степенной функции соответственно. Результаты аппроксимации методом наименьших квадратов приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты аппроксимирования эмпирических исследований

Средний диаметр	Коэффициенты и показатели степенной функции	
	k	a
2,3	11,58	1,36
2,8	8,94	1,21

Результаты исследований показали, что коэффициент корреляции и ошибка аппроксимации в первом случае составили 0,97 и 10,2 %, а во втором случае 0,94 и 14,1, соответственно. Средняя погрешность результатов теоретических и экспериментальных исследований в опытах составила 20,1 %, а достоверность математической модели 79,9 %.

Список литературы

1. Павлиненко, О. И. Аналитические приемы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дроби стесненным ударом / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — № 15 (58). — С. 106–112.
2. Павлиненко, О. И. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторной ударной мельницы для производства колотой дроби / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — Донецк : ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2019. — № 4 (18). — С. 3–9.
3. Глушак, Б. Л. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, С. А. Новиков. — Новосибирск : Наука, 1992. — 295 с.
4. Огородников, В. А. Прочность некоторых марок стали и армо-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2÷200 ГПа / В. А. Огородников, Е. Ю. Боровкова, С. В. Ерунов // Физика горения и взрыва. — Новосибирск : ИСО РАН, 2004. — Т. 40. — № 5. — С. 109–117.
5. Анализ параметров процесса раскалывания стальной сферической дроби стесненным центральным ударом / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, А. П. Жильцов // Черные металлы. — 2020. — № 8 (1064). — С. 29–33.

Вишневский Д. А.
д.т.н., доцент,
Бондарь Н. А.
старший преподаватель,
Гайдар А. И.
м.н.с.

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ МЕТОДОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Машины и агрегаты металлургических предприятий обычно включены в какую-либо производственную линию, состоящую из набора технологических агрегатов, выполняющих различные технологические функции. Основным требованием к оборудованию этих технологических линий является обеспечение таких режимов работы, которые позволяли бы безотказно выполнять все технологические функции. Обеспечить рациональный режим их функционирования, когда показатели надежности всех без исключения входящих в них агрегатов имеют различные характеристики надежности, практически невозможно. Структурные единицы, включаемые в рассмотрение, имеют неоднородные характеристики. При построении модели подобной линии отдельные элементы соединяются в последовательные цепи, другие — в параллельные, а в целом — в комбинированные [1, 2].

Разнообразие физических основ, на которых построены рассматриваемые технические объекты, и принципов их функционирования обусловило применение адекватных им методов и алгоритмов прогнозирования. Наиболее наглядным является прогнозирование функционирования объектов, поведение которых можно описать детерминированными функциями в пределах погрешностей измерения.

В зависимости от решаемой задачи степень детализации элементного состава может изменяться в широких диапазонах. Элементы сложной системы путем декомпозиции разделяются на составляющие. Степень декомпозиции определяется принятой на том или ином производственном участке степенью документированности причин отказов.

Структура отказов оказывается существенно неоднородной, особенно для относительно нового оборудования, по которому информация об отказах может оказаться ограниченной.

Поэтому для описания статистики наработки на отказ и определения закона распределения случайных величин требуются выборки достаточного количества случаев, что не всегда и не для всех элементов выполнимо. Поэтому при построении алгоритмов обработки массивов информации ставилась задача применения таких критериев, которые гарантировали бы определение закона распределения с требуемой достоверностью при ограниченном объеме информации.

Реальные законы распределения случайных величин зачастую обладают различными отклонениями от канонических, поэтому анализирующий алгоритм должен обладать способностью критериальной оценки степени соответствия информационного потока случайной величины тому или иному закону распределения.

Для описания характерных задач математической теории надежности восстанавливаемых технических систем, выбор функции распределения наработок элементом до отказа в процессе восстановления, нахождение функции восстановления и определение оптимальной стратегии эксплуатации по критерию минимума интенсивности эксплуатационных затрат. В теории надежности технических систем первичными понятиями являются случайная наработка (время) элемента (системы) до отказа и ее функция распределения. Именно они задают важнейшее понятие в теории надежности — процесс восстановления.

Если механические отказы зависят от повреждений самих элементов оборудования, то технологические и отказы, вызванные нарушениями при эксплуатации, напрямую или косвенно связаны с человеческим фактором (ЧФ).

Целью создания автоматизированной системы прогнозирования отказов оборудования является заблаговременное предупреждение ремонтных служб о выходе из строя детали, узла или машины, что, в свою очередь, позволит своевременное и качественное ремонтное воздействие на эксплуатируемое металлургическое оборудование (МО).

Данная система состоит из двух крупных блоков. Первый блок, назовем его А, отвечает за накопление и хранение данных наработок на отказ всех элементов агрегата. Второй блок, назовем его Б, отвечает за расчет показателей надежности, используя статистические данные из первого блока, выдает предупреждения о скором выходе из строя элемента системы, опираясь на методику статистической теории надежности рисунок 1. В системе предусмотрены математические методы расчета показателей надежности, определяющие принадлежность законам распределения наработки на отказ при наличии малого количества численных значений выборки [3].

Исходя из того, что срок службы — это случайная величина, для ее описания необходимо использовать вероятностные модели.

Необходимо разделить теоретическое и эмпирическое распределение вероятностей. При наличии статистических данных построить эмпирическое распределение не составит труда, но, чтобы его использовать для установления теоретического распределения, требуются большие объемы данных. В связи с этим все выводы о теоретическом распределении делают, анализируя природу данных, характер процессов, приводящих к предельному состоянию [4–6].

При анализе и расчетах надежности одной из необходимых операций является установление на основании статистических данных закона распределения вероятности наработки объекта на отказ или других случайных величин – времени восстановления, числа отказов за некоторый период эксплуатации, срока службы и др.

Вернемся к блоку А (рис. 1). Электронный агрегатный журнал выполняет те же функции, что и бумажный носитель, а именно: накапливает данные о техническом состоянии и работоспособности действующего оборудования в процессе эксплуатации; является основным исходным документом для установления характера и объема работ периодического ТО и ремонтов, сроков службы узлов и деталей оборудования, а также работ по совершенствованию оборудования. Преимущество электронного агрегатного журнала (рис. 2) — может работать в сети: возможно открыть доступ для просмотра данных различным службам, установить ограничение о внесении или изменении данных согласно должностным инструкциям, и самое главное — вся база статистических данных (сроки службы деталей, узлов, сборочных единиц) по запросу передается в блок Б (рис. 1) для проведения дальнейших расчетов.



Рисунок 1 — Схема описания системы прогнозирования отказа оборудования

В агрегатном журнале для каждого агрегата имеется своя структура, в которую входят: машина, узел, механизм, сборочный узел, деталь (рис. 3).

№ п/п	Дата технического осмотра	Наименование узла	Результаты осмотра, краткая характеристика дефектов	Табельный номер и электронная подпись лица производившего осмотр

Дата и вид ТОиР	Перечень работ, выполняемых для устранения дефектов	Узлы и детали замененные при ТОиР			Причина выхода из строя	Табельный номер и электронная подпись лица производившего ремонт
		наименование	количество	Срок службы, месяц		

Рисунок 2 — Вид агрегатного журнала

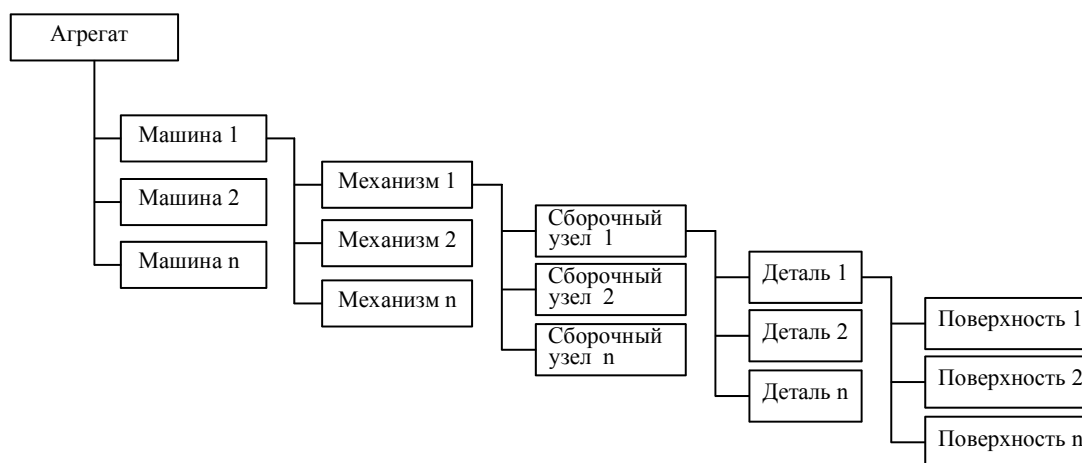


Рисунок 3 — Структура элементов электронного агрегатного журнала

Выводы. Внедрение данной системы позволит повысить культуру планирования всех видов ремонтов, уменьшить аварийные выходы из строя узлов механизмов, уменьшить время восстановления после отказов за счет грамотно спланированных ремонтов. Все вышеперечисленное приведет к повышению коэффициента готовности оборудования.

Список литературы

1. Вишневский, Д. А. Исследование моделей представления знаний в экспертных системах, используемых в металлургической отрасли / Д. А. Вишневский, Р. Ю. Коробов // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сб. науч. тр. III междунар. молодеж. науч.-практ. конф., (Курск, 17–18 нояб. 2016 г.) / отв. ред. Е. В. Павлов. — Курск : Университетская книга, 2018. — Т. 1. — С. 165–168.

2. Вишневский, Д. А. Анализ применения экспертных систем диагностики и ремонта на металлургических предприятиях с полным циклом / Д. А. Вишневский, Р. Ю. Коробов // Пути

совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : материалы международной науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию кафедры «Машины металлургического комплекса» ДонГТУ. — Алчевск, 2016. — С. 33–34.

3. Кобзар, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзар. — М. : Физматиздат, 2006. — 816 с

4. Лейфер, Л. А. Методы прогнозирования остаточного ресурса машин и их программное обеспечение / Л. А. Лейфер. — М. : Знание, 1988. — 60 с.

5. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. — Высшая школа, 1988. — 238 с.

6. Вишневский, Д. А. Надежность человека-оператора в системе «человек — машина» / Д. А. Вишневский, Н. А. Бондарь, А. Л. Сотников // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник тезисов докладов V междунар. науч.-техн. конф., 15 окт. 2020 г. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020. — С. 38–40.

Козлов Т. Р.

инженер

Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР,

Вишневский Д. А.

д.т.н, доцент,

Козачишен В. А.

к.т.н, доцент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КОНУСНОСТИ УЗКИХ ПЛИТ КРИСТАЛЛИЗАТОРА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Кристаллизатор является важнейшей частью МНЛЗ. Он определяет геометрические параметры непрерывно литой заготовки, а также в большей степени её качество. В слабовых МНЛЗ применяются кристаллизаторы со сборными медными плитами на общей раме. Это позволяет изменять положение узких плит, тем самым, изменяя ширину разливаемого сляба. Конструкция кристаллизатора МНЛЗ-1 ОАО «АМК» позволяет изменять ширину сляба в пределах 1000–1800 мм не только при переподготовке МНЛЗ, но и в процессе разливки, так как оснащен гидравлическими приводами позиционирования и датчиками положения [1].

Участок разливки стали ККЦ ОАО «АМК» выполняет разливку металла различных марок сталей и ширин сляба. После разливки серии плавок низкокремнистых марок типа SAE 1006, SAE1008 МНЛЗ-1 может сразу перестроиться на разливку S355, 09Г2С. Однако при таком переходе у технологического персонала возникают сложности с выбором величины конусности узких плит.

Для более подробного изучения влияния конусности кристаллизатора на процесс непрерывной разливки стали рассмотрим определённые случаи и проанализируем их.

После разливки марок сталей с содержанием марганца более 1 % и скоростями разливки 1,2–1,4 м/мин при этом конусность кристаллизатора выбрана 1 % на длину широких плит 900 мм, следующий заказ SAE 1006 с содержанием марганца 0,4–0,6 % и скоростями разливки 1,5–1,9 м/мин был разлит с той же конусностью. После разливки технологический персонал при осмотре кристаллизатора обнаружил выработку узких плит в нижней части (рис. 1) и вывел из эксплуатации плиты, не достигнувшие окончания регламентного пробега.

При выполнении заказа 09Г2С начали прогрессировать продольные трещины по широкой грани (рис. 2). Некоторые из них настолько раскрывались, что приводили к прорывам и остановкам МНЛЗ-1 на время устранения аварий. При этом конусность кристаллизатора выбиралась 0,9 %. Технологическим персоналом было принято решение настраивать кристаллизаторы при разливке 09Г2С с конусностью 1 %, чтобы сжать плотнее узкими плитами сляб и не дать трещинам развиваться.

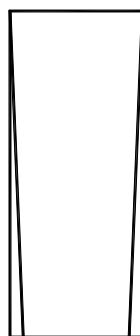


Рисунок 1 — Износ узких плит кристаллизатора



Рисунок 2 — Продольная трещина по широкой грани сляба

При выполнении заказа на товарный металл марки Q235 технологический персонал ориентировался при работе на сталь Зсп по схожести химического состава и других свойств (конусность 0,9 %). Часть заказа выполнялась с микролегированием титаном. Именно в этой части заказа появились продольные трещины по широкой грани. Увеличение конусности до 1 % позволило сократить количество трещин.

При разливке заказа марки стали S275JR которая относится к группе нелегированных низкоуглеродистых сталей, конусность принималась 0,9 %. На участке отделки при огневой зачистке наблюдалось увеличение обработки по продольным трещинам широкой грани. При этом ширина сляба по заданию максимально возможная 1800 мм. В данном случае также пришлось прибегнуть к увеличению конусности до 1 %.

Стоит обратить внимание, что при корректировке конусности с целью локализации продольных трещин технологическим персоналом после каждой серии выполнялся осмотр узких плит в нижней части. Неравномерного износа не наблюдалось.

Правильно подобранная величина конусности плит кристаллизатора должна идеально повторять усадку заготовки по длине кристаллизатора в течение всего времени нахождения металла в кристаллизаторе, обеспечивая равномерный теплоотвод между стенками кристаллизатора и заготовкой. Такая настройка позволит увеличить срок службы плит.

При выбранной избыточной конусности кристаллизатора плиты кристаллизатора в процессе разливки пережимают непрерывно литую заготовку в нижней части, что приводит к росту интенсивности износа плит кристаллизатора, увеличению усилий вытягивания заготовки, нестабильности приводов, возникновению дефектов.

При выбранной недостаточная конусность кристаллизатора к низу кристаллизатора зазор между плитами кристаллизатора увеличивается. Из-за чего возникают продольные трещины на широких гранях заготовки, в зависимости от увеличения величины зазора продольные трещины раскрываются ниже кристаллизатора и могут привести к прорыву корочки сляба. Также может наблюдаться избыточный расход ШОС или других смазок кристаллизатора.

В данный момент на МНЛЗ-1 ККЦ ОАО «АМК» для конкретного задания на разливку стали, конусность узких плит кристаллизатора определяется с учётом трёх факторов:

– времени нахождения непрерывно литой заготовки в кристаллизаторе (по скорости разливки);

- ширины сляба (величина фронта кристаллизации);
- свойству марки стали к усадке (химический состав).

Третий фактор разделяется на две подгруппы:

- по содержанию марганца;
- по содержанию элементов (Ti, B, Nb, V, W, Mo, Ni) измельчающих зерно за счет модификации (создание дополнительных центров кристаллизации).

Наиболее важным фактором при определении конусности является время нахождения металла в кристаллизаторе. Имея данные о максимальных и минимальных значениях скорости разливки и конусности кристаллизатора заложенные при проектировании эксплуатируе-

мого агрегата можно составить для обслуживающего персонала таблицу соотношений данных величин. Для составления программы можно воспользоваться формулами:

Время нахождения металла в кристаллизаторе:

$$t = \frac{H - h}{V_{\text{ц}}},$$

где H — высота плит кристаллизатора, мм; h — уставка уровня металла в кристаллизаторе (расстояние от мениска до верхнего среза плит), мм; $V_{\text{ц}}$ — целевая (средняя) скорость разливки, м/мин.

$$V_{\text{ц}} = (V_2 + V_1) / 2,$$

где V_1 и V_2 — минимальная и максимальная скорости для заданной марки стали.

При обнаружении продольных трещин в процессе разливки можно изменить время нахождения металла в кристаллизаторе, изменив скорость разливки или изменив уставку уровня металла в кристаллизаторе.

Зависимость величины конусности от скорости разливки:

$$K_{\text{СК}} = K_{\text{max}} - \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{min}}}{G_v} \varphi_k,$$

где K_{max} — максимально возможная конусность кристаллизатора, %; V_{min} — минимально возможная скорость разливки для агрегата, м/мин; G_v — минимальный шаг изменения скорости разливки, м/мин; φ_k — шаг изменения конусности, %.

$$\varphi_k = (K_{\text{max}} - K_{\text{min}}) / n,$$

где K_{min} — минимально возможная конусность кристаллизатора, %; n — число циклов изменения скорости во всём диапазоне скоростного режима МНЛЗ.

$$n = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) / G_v.$$

Таким образом, зависимость величины конусности от скорости:

$$K_{\text{СК}} = K_{\text{max}} - \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{min}}}{G_v} \times \frac{K_{\text{max}} - K_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} G_v = K_{\text{max}} - \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \times (K_{\text{max}} - K_{\text{min}}).$$

Рассмотрим влияние химического состава стали при настройке МНЛЗ, показателем легирования при выборе основных параметров разливки является содержание марганца, поэтому расчет строится следующим образом:

$$K_{\text{mn}} = K_{\text{min}} + \frac{Q_{\text{ц}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}} \times (K_{\text{max}} - K_{\text{min}}),$$

где Q_{min} — минимальное содержание марганца в разливаемом сортаменте, %; Q_{max} — максимальное содержание марганца в разливаемом сортаменте, %; $Q_{\text{ц}}$ — целевое содержание марганца для заданной марки стали, %.

$$Q_{\text{ц}} = (Q_1 + Q_2) / 2,$$

где Q_1 и Q_2 — минимальное и максимальное содержание марганца для заданной марки стали.

Свое влияние на усадку сляба в кристаллизаторе оказывает геометрия слитка. Соотношение ширины слитка к толщине не учитываем, ведем расчет только по ширине заготовки.

$$K_{\text{ш}} = K_{\text{min}} + \frac{H_3 - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \times (K_{\text{max}} - K_{\text{min}}),$$

где H_{min} — минимальная ширина сляба для МНЛЗ, мм; H_{max} — максимальная ширина сляба для МНЛЗ, мм; H_3 — ширина сляба для конкретного задания, мм.

При расчете конусности кристаллизатора необходимо учитывать наличие или отсутствие в заказе на определённую марку стали микролегирования. Для этого вводится коэффициент микролегирования $K_{\text{микро}}$.

При наличии в химическом составе элементов: *Ti, B, Nb, V, W, Mo, Ni* $K_{\text{микро}} = 1,1$; при отсутствии микролегирования $K_{\text{микро}} = 1$.

Конусность кристаллизатора определится выражением:

$$K = \frac{K_{\text{СК}} + K_{\text{мп}} \times K_{\text{микро}} + K_{\text{ш}}}{3}.$$

При вводе в программу, созданную на основе данных формул, параметров разливаемого металла можно получить размер конусности кристаллизатора, которая будет повторять величину усадки заготовки в кристаллизаторе.

Выводы. В условиях производства МНЛЗ-1 ККЦ было исследовано влияние конусности плит кристаллизатора на процессы непрерывной разливки стали. В зависимости от изменений условий разливки вносились корректировки величины конусности плит кристаллизатора в пределах 10 % от номинальной величины. При этом наблюдалось влияние данных изменений на характер проявления поверхностных дефектов заготовки и динамику износа плит кристаллизатора. Опытным путем было выявлено, что на величину усадки сляба в кристаллизаторе влияют следующие факторы: скорость разливки, химический состав разливаемой стали, геометрия слитка. Комплексный подход к расчету и выбору величины конусности плит кристаллизатора улучшает качество заготовки, увеличивает стойкость плит кристаллизатора, снижает усилия приводов вытягивания заготовки МНЛЗ, уменьшает расход ШОС для кристаллизатора.

Список литературы

1. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.

Сотников А. Л.
д.т.н., профессор,
Пасечник С. Ю.
к.т.н., доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР,

Орлов А. А.
аспирант

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ПРАКТИКА ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Визуальный и измерительный контроль (ВИК) является наиболее простым и доступным методом неразрушающего контроля (НК). Согласно исследованиям авторов [1], ВИК способен достаточно уверенно идентифицировать ряд дефектов сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП). Разработанная авторами классификация дефектов сварных соединений, полученных СТП позволяет во время их визуального контроля устанавливать сходство признаков дефектов и классифицировать их. Последнее можно выполнять в табличном виде. В качестве практического примера в данной работе рассматриваются результаты визуального контроля стыкового сварного соединения пластин из алюминия, полученного СТП.

Серия экспериментов по применению СТП проводилась с применением вертикального консольно-фрезерного станка типа 6Т12. Сварку вели специально изготовленным инструментом из нержавеющей стали 08Х18Н10. Наконечник инструмента имел простую форму с овальным профилем.

В эксперименте использовались заготовки пластин из алюминия марки А7Е, толщиной 6 мм, размещенные на подложке из стали, установленные и закреплённые в зажимах фрезерного станка.

Проводились три эксперимента с варьированием следующих режимов сварки (табл. 1): глубины погружения инструмента и длины хвостовика инструмента.

На рисунке 1 представлены изображения внешнего вида сваренных пластин из алюминия с лицевой стороны шва (рис. 1, а) и со стороны корня шва (рис. 1, б) после выполненных экспериментов № 1, № 2 и № 3. На заготовках отмечены области, играющие важную роль в описании выявляемых дефектов: з1, з2 — зона ввода и вывода сварочного инструмента, соответственно; з3 — зона интереса, в области которой располагаются выявленные дефекты; НС, ОС — набегающая и отступающая сторона шва, образуемые в результате перемешивания расплавленного алюминия в процессе сварки.

Таблица 1 — Режимы СТП при проведении экспериментов

Наименование параметра	Значение по экспериментам		
	№ 1	№ 2	№ 3
Скорость вращения инструмента, мин ⁻¹	800	800	800
Скорость подачи инструмента, мм/мин	40	40	40
Угол наклона инструмента, град	2	2	2
Глубина погружения инструмента, мм	0,5	0,5	0,6 ↑
Длина хвостовика инструмента, мм	130	78 ↓	78
Температура окружающей среды	0 °С*		

*Так как эксперименты проводились в неотопляемом цехе, заданные режимы сварки могли в неполной мере обеспечить необходимую температуру плавления алюминия.



- а — заготовки с лицевой стороны шва; б — заготовки со стороны корня шва;
 1, 2, 3 — заготовки, полученные в ходе эксперимента № 1, № 2, № 3, соответственно;
 31 — зона, соответствующая началу входа инструмента в заготовку;
 32 — зона выхода инструмента из заготовки; 33 — зона повышенного внимания;
 НС — набегающая сторона шва; ОС — отступающая сторона шва

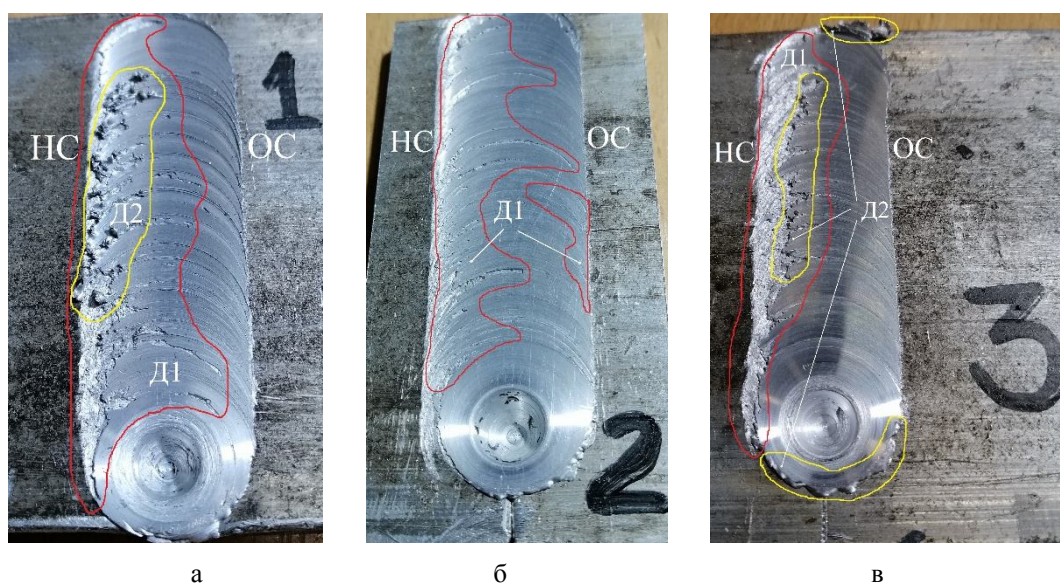
Рисунок 1 — Общий вид полученных сварных соединений

Чешуйчатый вид сварного шва является типовой структурой шва при сварке трением с перемешиванием и не является дефектом.

На заготовках со стороны корня шва (зона повышенного внимания — 33, обозначенная на рисунке 1, б) можно наблюдать общий дефект для всех трёх испытаний — продольная трещина в металле, которая выходит на поверхность корневой части шва.

Вид образца, содержащий дефект в виде заглаженного плечами инструмента непровара приведен на рисунке 2, б. По фотографии полученного методом СТП сварного шва видно, что дефект находится непосредственно под лицевой стороной сварочного шва и имеет устойчивую внутреннюю поверхность с внутренними полостями в тонком подповерхностном слое. Дефект явно выражен по наступающей стороне шва.

На образцах № 1 (рис. 2, а) и № 3 (рис. 2, в) можно наблюдать аналогичную ситуацию, как на образце № 2 (рис. 2, б) — дефект на набегающей стороне шва. Однако дефект имеет более выраженную структуру несплавления (зона Д1). Сварные швы, полученные в ходе эксперимента № 1 и № 3, имеют только частично заглаженные плечами инструмента участки, что не позволяет идентифицировать этот дефект как заглаженный непровар. Учитывая схожесть условий испытаний, можно определить этот дефект как несплавление на лицевой стороне шва для всех трех образцов.



Д1 — зона дефекта в виде несплавления на лицевой стороне шва; Д2 — зона дефекта типа грата;
 1, 2, 3 — заготовки, полученные в ходе эксперимента №1, №2, №3, соответственно;
 НС — набегающая сторона шва; ОС — отступающая сторона шва

Рисунок 2 — Вид лицевой поверхности шва с дефектами

При визуальном обследовании образцов испытаний № 1 и № 3 в зоне сварных швов можно обнаружить дефект типа грата (зона Д2 на рисунке 2). Следует учесть, что зона у двух вышеперечисленных дефектов совпадает и располагается на набегающей стороне шва, что является распространённым участком для образования дефектов при СТП [2] и свидетельствует о выборе неподходящих режимов сварки [3].

Согласно результатам исследования [4], причинами возникновения таких дефектов могут являться малый диаметр бурта инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; недостаточное заглубление бурта инструмента в свариваемый металл; большие зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок.

Обнаруженный в ходе экспериментов в данном исследовании перечень дефектов имеет высокий коэффициент корреляции с выявляемыми дефектами визуальным и измерительным методом неразрушающего контроля сварных соединений СТП, представленные в классификации [1]. В результате сварки трением с перемешиванием заготовок из алюминия, образуются типовые внешние (поверхностные) дефекты, такие как несплавление на лицевой стороне шва и продольная трещина с выходом на внешнюю часть корня шва, которые можно определить с помощью визуального метода неразрушающего контроля.

Обнаруженные в результате обследования заготовок трёх испытаний дефекты представляют высокую опасность, поскольку существенно влияют на прочность сварного соединения. Можно заключить, что причинами возникновения подобных дефектов является нарушение оптимального режима сварки. В этой связи необходимо дальнейшее проведение серии экспериментов по подбору оптимальных параметров сварки.

Используемый в работе метод контроля может быть рекомендован как первичный для обнаружения только поверхностных дефектов размером не менее 0,1 мм.

Список литературы

1. Сотников, А. Л. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием / А. Л. Сотников, А. А. Мухоматов, А. А. Орлов // Сварка и диагностика. — 2022. — № 3 — С. 19–24.

2. Филиппов, А. В. Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле / А. В. Филиппов, С. Ю. Тарасов, Е. А. Колубаев, В. Е. Рубцов // *Фундаментальные исследования*. — 2015. — № 6. — С. 296–300.
3. Феофанов, А. Н. Влияние величины подачи рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием на механические свойства стыковых соединений сплава 1565ч / А. Н. Феофанов, В. В. Овчинников, А. М. Губин // *Современные материалы, техника и технологии*. — 2019. — № 4 (26). — С. 226–239.
4. Покляцкий, А. Г. Характерные дефекты при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и основные причины их образования / А. Г. Покляцкий // *Автоматическая сварка*. — 2008. — № 6. — С. 48–52.

Харламов Ю. А.
д.т.н., профессор,
Петров П. А.
к.т.н., доцент,
Мурга С. В.
аспирант

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ШАЙБОВОГО КАНТОВАТЕЛЯ

Кантователь — приспособление, предназначенное для изменения пространственной ориентации объекта поворотом на заданный угол вокруг горизонтальной оси. Кантователи в линиях прокатных станов служат для поворота (кантовки) прокатываемой заготовки (блюда, слитка, профиля, раската) относительно ее продольной оси на угол 90° перед задачей в следующий калибр валков. Установка кантователя перед рабочей клетью с горизонтальными валками (или нескольких кантователей вдоль линии прокатки непрерывных и полунепрерывных станов) обеспечивает равномерное обжатие раската по всему сечению без применения сложных в конструкции и обслуживании вертикальных и универсальных клетей. В зависимости от назначения кантователи применяют на участках рабочих клетей блюмингов, слябингов, рельсобалочных, сортовых и трубопрокатных станов, а также в линиях отделки проката.

Известна конструкция крюкового кантователя слитков блюмингов (слябингов); кантователя толстых листов и рулонов горячекатаной (холоднокатаной) полосы [1–3]. В заготовочных, рельсобалочных и сортовых (крупносортовых) станах для кантовки проката применяют клещевой кантователь. С целью осмотра пачек сортового проката на инспекционном рольганге используют кантующий механизм в вилку которого помещают пакет профилей. В составе блюмовых машин непрерывной разливки стали можно встретить кантующие холодильники, совмещающие процесс охлаждения, перемещения и кантовки заготовки [4]. На сортовых станах эксплуатируются: роликовые, рашпильные, эксцентриковые, рычажные и шайбовые кантователи; кантующие втулки; роликовые и геликоидальные проводки [5].

В настоящее время неотъемлемой частью технологического процесса прокатного производства крупносортовых станов является поворот «набок» раската посредством шайбового кантователя, прототипом которого послужила конструкция кантователя сортового проката, включающего кантующую втулку и кривошипно-шатунный механизм ее поворота. Сложная кинематика установки объясняется необходимостью подъема раската над рольгангом при одновременном его повороте относительно продольной оси. Основное влияние на выбор конструкции устройства оказывают размеры, форма и масса раската [1].

На крупносортном полунепрерывном стане 600 сортопрокатного цеха Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» эксплуатируется универсальный кантователь шайбового типа предназначенный для кантовки прокатываемых полос перед задачей их в клеть (рис. 1). Кантователь позволяет осуществлять кантовку профиля на любой угол в пределах до 90° со смещением или без смещения кантуемой заготовки по длине бочки роликов рольганга.

Для недопущения смещения от оси прокатки одновременно с кантовкой происходит смещение на катках всей тележки с помощью кривошипного механизма 1. При кантовке шатун 2 (поворот шайбы) и шатун 3 (смещение тележки) движутся на встречу друг другу. При выходе из строя тормозного механизма или командоаппарата 4 происходит столкновение шатунов 2 и 3, что приводит к поломке выходного вала и корпуса редуктора.

Для решения данной проблемы был разработан шайбовый кантователь новой конструкции, позволяющий кантовать профиль на заданный угол в пределах до 90° без смещения от оси прокатки. Тем самым, при выходе из строя командоаппарата или тормозного механизма исключается возможность аварии за счет отсутствия шатуна смещения тележки (рис. 2).

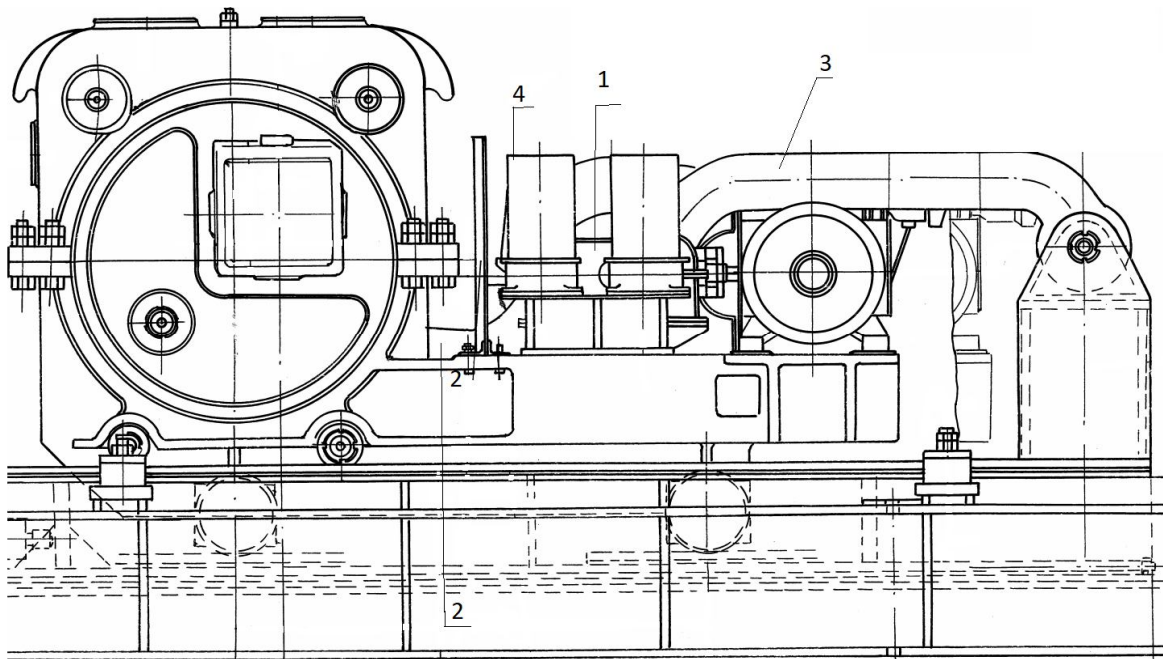
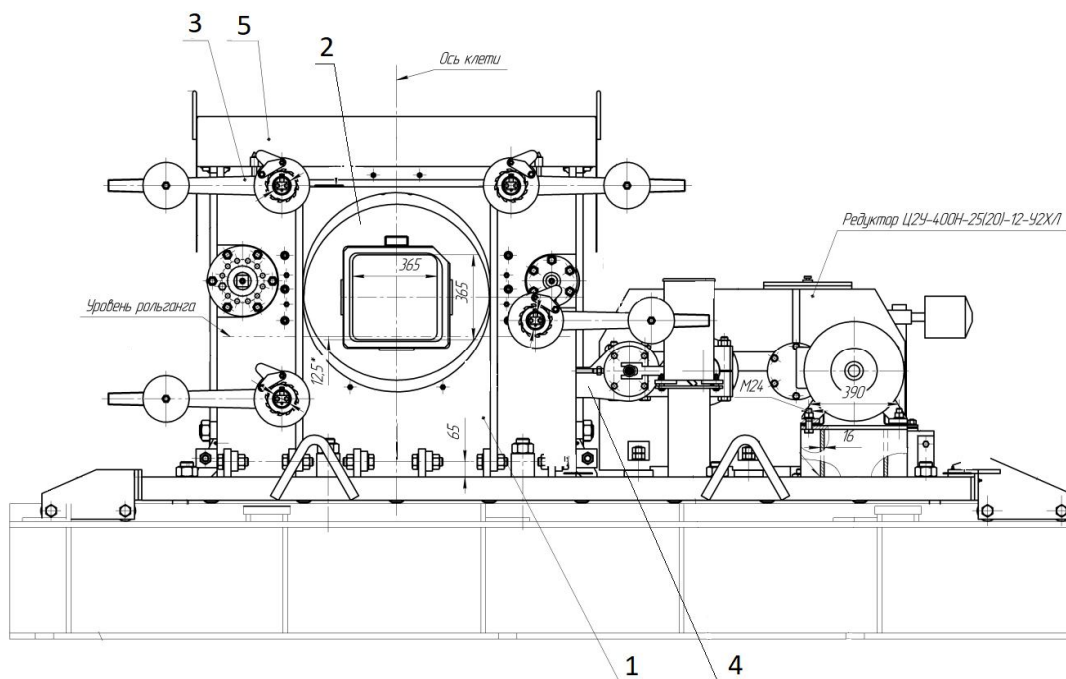


Рисунок 1 — Универсальный кантователь крупносортового стана 600



1 — корпус кантователя, 2 — кантующая шайба,
3 — храповой механизм, поджимающий кантующую шайбу к корпусу, 4 — шатун

Рисунок 2 — Кантователь шайбовый новой конструкции

Основное преимущество новой конструкции кантователя (рис. 2) заключается в том, что кантовка осуществляется по оси прокатки, благодаря этому исключается необходимость сдвига всей тележки для возврата раската на ось прокатки. Кроме того, отсутствие второго шатуна значительно упрощает компоновку привода кантователя.

Также к достоинствам данной конструкции следует отнести систему автоматической регулировки зазора в узлах скольжения кантующей шайбы, уменьшение количества подшипников качения и упрощение системы управления электродвигателем.

Анализ различных вариантов существующих манипуляторов и кантователей, применяемых на крупносортовых станах различных металлургических предприятий, проведенный в процессе выполнения данной работы, позволил сделать вывод о необходимости внедрения усовершенствованной конструкции шайбового кантователя в технологическую линию стана 600 сортопрокатного цеха Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК».

Список литературы

1. Машины и агрегаты металлургических заводов : учебник для вузов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребенник и др. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Металлургия, 1988. — 680 с.
2. Колесников, А. Г. Технологическое оборудование прокатного производства : учебное пособие / А. Г. Колесников, Р. А. Яковлев, А. А. Мальцев. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 158 с.
3. Королев, А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. — М. : Металлургия, 1969. — 465 с.
4. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. IV–5. Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечник [и др.] ; под общ. ред. В. М. Сеницкого, Н. В. Пасечника. — М. : Машиностроение, 2000. — 912 с. : ил.
5. Целиков, А. И. Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. — М. : Металлургиздат, 1958. — 432 с.

Таровик А. Б.
к.т.н.,
Желтобрюхова О. Е.
старший преподаватель,
Низмеев А. А.
ассистент
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

КЛАССИФИКАЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Классификация комбинированных методов обработки может осуществляться по ряду признаков [1, 2]:

1. По количеству и природе подводимых видов энергии (энергетических воздействий).
2. По способу подвода энергии в зону обработки.
3. По характеру распределения энергетических воздействий в пространстве и времени.
4. По количественным характеристикам энергетических воздействий.

Классификация по первому признаку основывается на использовании известных видов энергии (рис. 1): механической (М), электрической (Э), лучевой (Л), энергии химических реакций (Х), термической (Т), магнитного поля (Мг), акустического поля (Ак), путем комбинированного (К) их воздействия (двух и более видов энергии) на материал обрабатываемой заготовки (рис. 2) [3, 4].



Рисунок 1 — Классификация методов обработки по виду затрачиваемой энергии



Рисунок 2 — Классификация комбинированных методов обработки по виду применяемой энергии

Методы механохимической обработки (МХ) предусматривают одновременно протекание химических процессов и механического воздействия на материал детали. При механоэлектрохимической обработке (МЭХ) имеет место одновременное воздействие механической, электрической и химической энергии. Механотермическая (МТ) обработка основана на одновременном или последовательном воздействии на материал заготовки нагрева (охлаждения) и пластического деформирования.

Методы электрохимической (ЭХ) обработки предусматривают одновременное воздействие на обрабатываемый материал электрической энергии и энергии химических реакций.

Методы механомагнитной обработки (ММг) предусматривают механическую обработку деталей ферромагнитными или абразивными порошками в магнитном поле.

Механоакустическая обработка (МАк) предусматривает одновременное деформирование обрабатываемого материала и воздействие акустических волн на его структуру. При механомагнитной и механоакустической обработке имеет место использование соответственно магнитного поля и звуковых волн для изменения состояния структуры обрабатываемого материала и его деформирования или разрушения в этом состоянии.

Электромеханическая обработка (ЭМ) сопровождается одновременным воздействием на материал детали электрической и механической энергии.

Методы механохимико-термической обработки (МХТ) предусматривают одновременное или последовательное воздействие на обрабатываемый материал нагрева в присутствии окружающей среды специального состава с целью обеспечения насыщения поверхностного слоя детали соответствующими элементами на заданную глубину.

Второй признак — способ подвода энергии в зону обработки — делит комбинированные методы на подклассы методов последовательного и параллельного энергетического воздействия.

К первым относится, например, механическая обработка с подводом в зону резания электрического тока.

Ко вторым относится резание с предварительным подогревом слоя материала индуктором токов высокой частоты, размещаемым на суппорте станка, спереди резца.

Третий признак делит комбинированные методы обработки на группы, дифференцирующие характер подвода энергии в зону обработки в пространстве и во времени на методы, воздействующие на весь объем материала заготовки, методы обработки поверхностей, методы точечного (локального) воздействия с непрерывным и дискретным подводом энергии.

Четвертый признак — количественное соотношение совмещаемых процессов — определяет степень взаимодействия различных видов физико-химического воздействия. Это может приводить к количественному изменению и делит группы методов на подгруппы. По этому признаку комбинированные методы делятся на две подгруппы.

Первая подгруппа — методы с преимущественным влиянием одного воздействия (например, механического или теплового, химического и т. д.). Дополнительное воздействие, например, тепловое (при преимущественном механической), снижая механические характеристики материала срезаемого слоя, повышает эффективность механического воздействия, качественно не изменяя природы процесса механической обработки. Для комбинированных процессов этого типа различают базовые и дополнительные энергетические воздействия.

Вторая подгруппа — методы, у которых нельзя разделить физико-химические воздействия на основные и дополнительные. В этом случае процесс обработки может быть описан специфическими закономерностями.

На основании вышеизложенного, к первому виду относятся комбинированные методы обработки, использующие один и тот же вид энергии, но два различных способа ее подвода (например, точение с наложением низкочастотных вибраций для дробления стружки) [5].

На рисунке 3 представлена классификация комбинированных методов обработки.

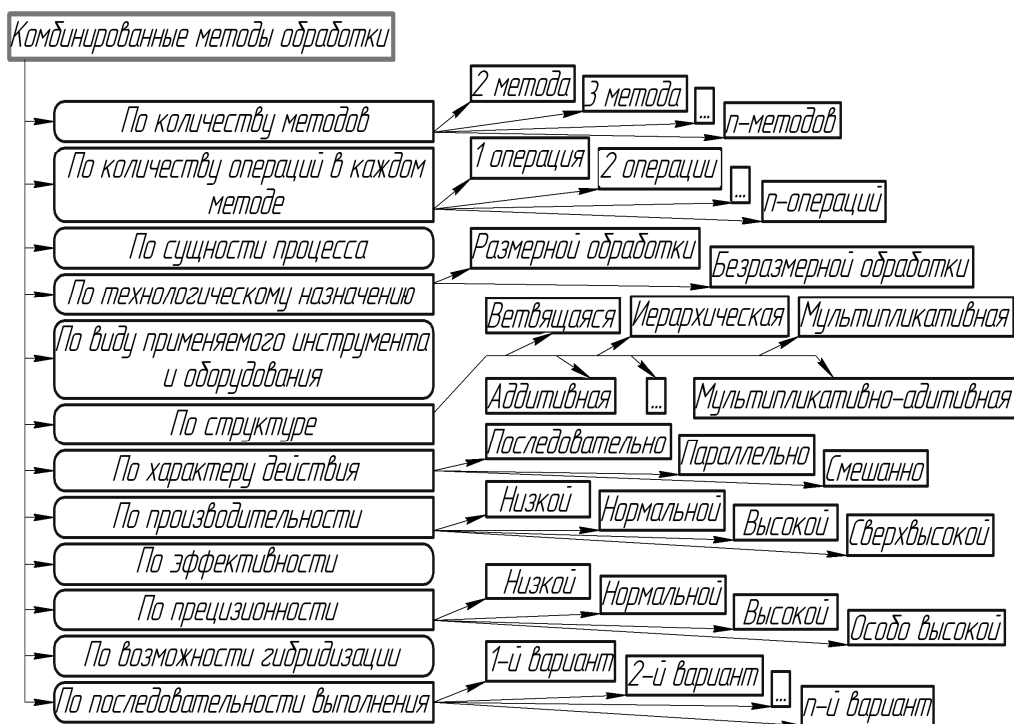


Рисунок 3 — Классификация комбинированных методов обработки

Комбинированные методы обработки могут подразделяться: по количеству методов, по количеству операций в каждом методе, по сущности процесса, по технологическому назначению, по виду применяемого инструмента и оборудования, по структуре, по характеру действия, по производительности, по эффективности, по прецизионности, по возможности гибридизации, по последовательности выполнения.

Список литературы

1. Физико-технологические основы методов обработки / А. П. Бабичев [и др.] ; под ред. А. П. Бабичева. — Ростов н/Д : Феникс, 2006. — 409 с. : ил.
2. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. — М. : Машиностроение, 2005. — 272 с. : ил.
3. Попов, Л. М. Физико-химические методы обработки / Л. М. Попов. — 2-е изд., перераб. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2006. — 97 с. : ил.
4. Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е. В. Смоленцев. — М. : Машиностроение, 2005. — 511 с. : ил.
5. Научно-технические технологии в машиностроении / А. Г. Суслов, Б. М. Базров, В. Ф. Безъязычный [и др.] ; под ред. А. Г. Суслова. — М. : Машиностроение, 2012. — 528 с. : ил.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Важным направлением повышения эффективности отделочной обработки поверхностей деталей машин и механизмов является поиск и внедрение перспективных технологий. Это особенно важно при получении сложных нелинейных поверхностей. Примером является сферическая поверхность рычага коробки гидрораспределителя трактора МТЗ-80, выполняемая по 7-му качеству с шероховатостью $Ra1,25$ (рис. 1).

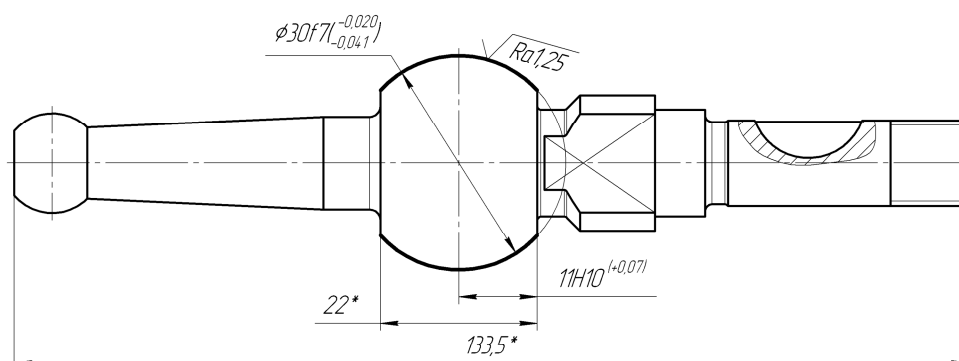
Сферическая поверхность $\varnothing 30f7$ является конструкторской основной базой рычага и в процессе эксплуатации подвергается механическому изнашиванию. Поэтому поверхность должна обладать повышенной износостойкостью.

Заводской маршрут обработки данной поверхности включает черновое и чистовое точение, предварительное и чистовое шлифование, выполняемое на бесцентрово-шлифовальных станках моделей ВШ-418 и ЗМ184П соответственно. После этого с целью упрочнения поверхностного слоя, производится обкатка сферы на обкатном станке. Суммарное основное время отделочной обработки (шлифование и обкатывание) по заводской технологии составляет $\sum T_O = 1,23$ мин.

Несмотря на то, что бесцентровое шлифование является весьма эффективной операцией обработки поверхностей деталей машин, ему присущ ряд технологических недостатков:

- вероятность появления на поверхности зон вторичной закалки, под которыми располагаются слои отпущенного металла. Возникающие в результате этого растягивающие напряжения вызывают ускоренный износ и разрушение деталей в процессе эксплуатации;
- остаточные напряжения растяжения в поверхностном слое могут достигать значительных величин (более 400 МН/м^2), что снижает предел выносливости материала;
- необходимость правки, балансировки и испытаний шлифовального круга перед эксплуатацией.

Вышеизложенные недостатки и данные о трудоёмкости обработки свидетельствуют, что поиск методов повышения эффективности отделочной обработки сферической поверхности рычага является актуальной задачей.



1. Материал: сталь 45Х ГОСТ 4543-2016, $HB \leq 229$.
2. * – размер для справок.

Рисунок 1 — Эскиз детали «Рычаг»

Целью данной работы является оценка целесообразности замены бесцентрового шлифования и обкатывания сферической поверхности рычага гидрораспределителя сельхозмашин методами обработки с использованием гибкой абразивной ленты.

Анализ доступных авторам источников позволяет сделать вывод, что наиболее перспективным для внедрения в заданных условиях является способ ленточного шлифования основанный на чередовании абразивного воздействия и упрочнения (наклёпа), осуществляемого в непрерывном цикле [1]. Способ требует применения специальной комбинированной ленты, в которой абразивные участки чередуются с участками наклёпа. На участках наклёпа в ленту вмонтированы стальные закалённые шарики, выступающие над её поверхностью (рис. 2, а). Схема крепления шарика на ленте показана на рисунке 2, б. В процессе работы контактному ролику (рис. 2, в) сообщается колебательное движение в направлении, перпендикулярном касательной к обрабатываемой поверхности в точке её контакта с роликом (D_{Spad}). Амплитуда колебаний выбирается такой, чтобы обеспечивался гарантированный отрыв ленты от обрабатываемой поверхности.

Управлять качеством обрабатываемой поверхности при данном способе шлифования можно путём варьирования отношения суммарной длины участков наклёпа L к общей длине ленты. Согласно данным [1], оптимальное сочетание таких показателей качества поверхности, как шероховатость и уровень остаточных сжимающих напряжений, обеспечивается при $L = 30\%$ ($Ra = 1,25 \dots 0,63$ мкм; $\sigma_{сж} = 300 - 360$ МПа). Это полностью соответствует требованиям чертежа и техническим условиям на изготовление детали «Рычаг».

Для проведения корректного сравнительного анализа производительности припуск h на шлифование лентой принят таким же, как и при шлифовании кругом.

Глубина резания $t = h = 0,1$ мм.

Режим шлифования для стали 45X определяли по рекомендациям [2]:

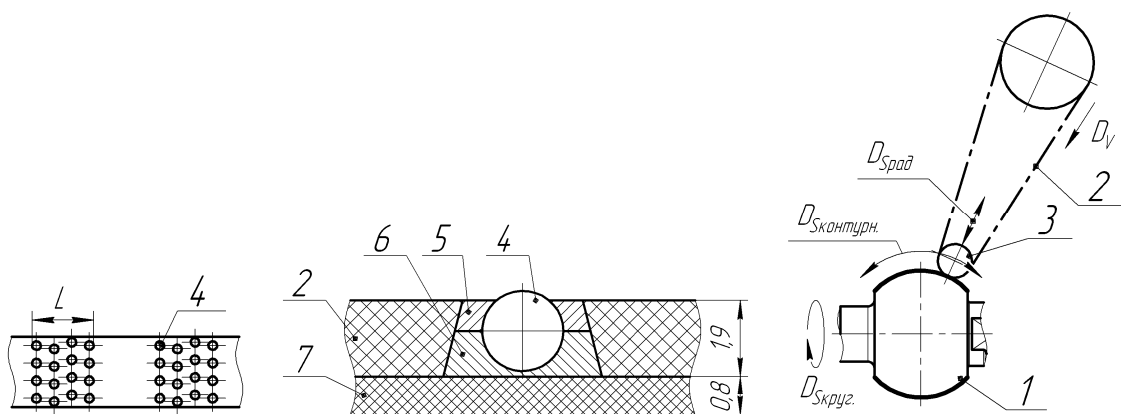
– скорость резания $V = 25$ м/с;

– круговая подача $S_{\text{круг}} = 7,0$ м/мин;

– радиальная подача $S_{\text{рад}} = 0,02$ мм/об.

Основное время определяли по формуле:

$$T_0 = \frac{\pi \cdot d}{S_{\text{круг}}} \cdot \frac{h}{S_{\text{рад}}} = \frac{\pi \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{7,0} \cdot \frac{0,1}{0,02} = 0,07 \text{ мин.}$$



1 — обрабатываемая деталь; 2 — специальная комбинированная лента; 3 — контактный ролик;
4 — шарик; 5 — сепаратор; 6 — обойма; 7 — несущая основа.

D_V — движение резания; $D_{\text{Скруг}}$ — движение круговой подачи (вращение детали);

$D_{\text{Сконтурн}}$ — движение контурной подачи; D_{Spad} — движение радиальной подачи

Рисунок 2 — Обработка сферы специальной комбинированной лентой

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Применение ленточного шлифования специальной комбинированной лентой сферической поверхности рычага гидрораспределителя трактора МТЗ-80 позволяет обеспечить требуемое чертежом качество поверхностного слоя за 0,07 минуты. Снижение станкоёмкости по отношению к заводскому технологическому процессу составляет 3,9.

2. Использование комбинированной абразивной ленты позволяет исключить обкатную (упрочняющую) операцию. В результате этого сокращается производственный цикл, высвобождаются производственные площади, сокращаются затраты на эксплуатацию и обслуживание оборудования.

3. Для выполнения предложенного варианта отделочной обработки в зависимости от технологического оснащения машиностроительного предприятия могут использоваться как специальные ленточно-шлифовальные станки, так и модернизированные универсальные токарно-винторезные станки.

Список литературы

1. Пат. 2008171 Российская Федерация, МПК51: В24В21/00. Способ ленточного шлифования / Касимов В. Г., Зенин М. А., Ключанов В. В. ; заявитель и патентообладатель Поволжский авиационный научно-технологический центр. — № 5044777/08 ; заявл. 28.05.1992 ; опубл. 28.02.1994, Бюл. № 18. — 5 с. : ил.

2. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. — М. : Машиностроение, 1975. — 174 с.

*Пипкин Ю. В.**к.т.н.,**Зинченко А. М.**к.э.н., доцент**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СТАНДАРТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ В ОБЛАСТИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Порядок формирования документов межотраслевой системы стандартов технологической оснастки (ССТО) определен ГОСТ 31.0000.01-90 «Технологическая оснастка. Основные положения». Основное назначение этой системы состоит в комплексном нормативно-техническом, методическом и программном обеспечении решений научно-технических и производственных задач, связанных с технологической оснасткой. Базовым стандартом ССТО определены коды шифров технологической оснастки в области «обработки под давлением» (табл. 1).

Расшифровки термина «штамп» в ГОСТ 31.0000.01-90 не дается и предлагается в области терминологии применять его совместно со стандартом другой международной межотраслевой системы ГОСТ 3.1109-82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий». Однако в последнем также отсутствует определение термина «штамп» и в свою очередь имеется косвенная отсылка к внесистемному стандарту ГОСТ 18970-84 «Обработка металлов давлением».

Таблица 1 — Группа технологической оснастки для обработки под давлением

Область технологической оснастки (шифр первой цифры*)	Разновидности технологической оснастки (шифры первой и второй цифры*)
Разновидности приспособлений и инструмента для обработки под давлением (3)	Штампы и приспособления для холодной штамповки листовой (30) Штампы и приспособления для холодной штамповки объемной (31) Штампы и приспособления для холодной штамповки специальных видов (32) Штампы и приспособления для холодной штамповки на прессах и горизонтально-ковочных машинах (33) Штампы и приспособления для горячей штамповки на машинах ударного действия (34) Штампы и приспособления для горячей штамповки свободной ковкой на молотах и прессах (35) Штампы и приспособления для горячей штамповки специальных видов объемной формовки (36) Пресс-формы для изделий из неметаллических материалов (37) Резерв/Прочие (38/39)

*Имеются в виду цифры после шифра системы стандартов 31.ХХ00.

Операцииковки и штамповки. Термины и определения» в части термина «штамповка». Термин «штамп» разъясняется в ГОСТ 15830-84 «Обработка металлов давлением. Штампы. Термины и определения» следующим образом:

«Штамп — технологическая оснастка, посредством которой заготовка приобретает форму и (или) размеры, соответствующие поверхности или контуру рабочих элементов штампа».

Приведенное определение не в полной мере соответствует определению термина «технологическая оснастка» по ЕСТД: «Технологическая оснастка — средства технологического оснащения, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса».

Следует учитывать, что технологическая оснастка дополнительно делится стандартом ЕСТД на два типа — приспособление и инструмент:

1. «Приспособление — технологическая оснастка, предназначенная для установки или направления предмета труда или инструмента при выполнении технологической операции».
2. «Инструмент — технологическая оснастка, предназначенная для воздействия на предмет труда с целью изменения его состояния».

С первого взгляда можно отметить, что штампы относятся к категории «инструмент».

Тогда определение термина «штамп» следует уточнить:

«Штамп — инструмент для операций штамповки, посредством которого заготовка приобретает форму и (или) размеры, соответствующие поверхности или контуру его рабочих элементов».

Рассмотренное несоответствие усложняет внедрение системы ССТО, так как приводит к вольной трактовке терминов. Так, в [1] изложено следующее:

«Операции листовой штамповки осуществляются с помощью специального инструмента-приспособления — штампа. Штамп — инструмент для получения идентичных изделий методом пластической деформации. Согласно ГОСТ 15830-84, штамп — технологическая оснастка, посредством которой заготовка, пластически деформируясь, приобретает форму и (или) размеры, соответствующие поверхности или контуру рабочих элементов штампа».

В приведенном примере в одной фразе штамп рассматривается и как инструмент-приспособление, и как инструмент, и как технологическая оснастка. Данный подход вольной трактовки терминов (который стандартом не допускается) представляется нерациональным.

Проблема нечеткой терминологии приводит, например, к тому, что при рассмотрении методов автоматизированного проектирования конструкций [2] значение термина «штамп» не рассматривается.

В ССТО (табл. 1) штампы и приспособления для штамповки разделены. Однако документов или научных статей с термином «приспособления для штамповки» не обнаружено.

В целом на данный момент можно отметить отсутствие документов ССТО, касающихся технологической оснастки для обработки давлением. По ГОСТ 31.0000.01-90 такими документами, кроме стандартов могут быть: руководящие документы (РД), рекомендации (Р), промышленные каталоги (К), альбомы (А), типажи (Т), стандартные программы (ПС), типовые программы (ПТ), информационные массивы (ИМ), справочные рекомендации (СР), методические рекомендации (МР).

Также обращает внимание то, что в предложенной кодировке ССТО (табл. 1) большее внимание уделено только одному из процессов обработки давлением — штамповке. В тоже время ГОСТ 18970-84 наряду со штамповкой также определены другие отдельные процессы обработки давлением: ковка, разделительные операции, формоизменяющие операции. В соответствии с указанным выше разделением операций в ГОСТ 18323-86 «Оборудование кузнечно-прессовое. Термины и определения» можно выделить характерные группы технологического оборудования:

- для ковки — ковочно-штамповочные молоты;
- для разделительных операций — приводные ножницы;
- для формоизменяющих операций — ротационные кузнечно-прессовые машины.

Таким образом, кроме штампов, как инструмента для одного из видов обработки давлением, штамповки, следует рассматривать также и инструмент для других операций. Так, например, интервалы внесистемных стандартов ГОСТ 11384-74–ГОСТ 11399-75 и далее ГОСТ 11400-75–ГОСТ 11435-75 посвящены инструменту кузнечному для ручных и молотовых работ, который также следует относить к технологической оснастке.

В целом по ЕСТД технологическая оснастка относится к средствам технологического оснащения совместно с технологическим оборудованием и вместе они являются орудиями производства, необходимыми для осуществления определенного технологического процесса, точнее некоторой его части.

В части производственных процессов, наряду с кузнечно-штамповочным производством, обработка давлением является основным технологическим процессом также для других видов производства [3–6], таких как прокатно-прессово-волочильное производство, метизное производство, производство гнутых профилей, накатка резьбовых и зубчатых поверхностей. Очевидно, что указанные процессы обработки давлением затруднительно систематизировать в подразделах «Резерв» и «Прочие» (табл. 1).

Проведенный анализ применения ССТО в области обработки давлением показал следующее:

1. Применение системы стандартов технологической оснастки не получило распространение в области обработки давлением, что отражается в полном отсутствии соответствующих документов. При этом имеется значительное количество внесистемных стандартов в данной области.

2. Основная сложность применения ССТО заключается в отсутствии четкой терминологии для конкретных групп технологической оснастки. Обобщенные термины в базовом стандарте ССТО ГОСТ 31.0000.01-90 также отсутствуют, что приводит к необходимости обращения к определениям ЕСТД.

3. Разнообразие процессов обработки давлением открывает неохваченную исследователями область, связанную с поиском обобщающих классификационных признаков и взаимосвязей с целью применения положений ССТО.

4. Поставленные ССТО задачи определяют возможные перспективы совершенствования решений научно-технических и производственных задач, связанных с технологической оснасткой на основе межотраслевой интеграции предметных навыков и знаний.

5. Большое разнообразие допускаемых ССТО документов создает условия для планомерной работы по ее внедрению.

Список литературы

1. Самохвалов, В. Н. Проектирование штампов для листовой штамповки деталей летательных аппаратов : учебное пособие / В. Н. Самохвалов, Е. Г. Громова. — Самара : Издательство Самарского университета, 2020. — 80 с.

2. Автоматизированное проектирование штампов : учеб. пособ. / А. Г. Схиртладзе [и др.] ; под ред. проф. В. В. Морозова ; Владим. гос. ун-т. — Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. — 284 с.

3. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : конспект лекций / С. Б. Сидельников, Р. И. Галиев, Д. Ю. Горбунов и др. — Электрон. дан. (3 Мб). — Красноярск : ИПК СФУ, 2008. — 95 с.

4. Прокатное производство : учебник для вузов / П. И. Полухин, Н. М. Федосов, А. А. Королев, Ю. М. Матвеев. — М. : Металлургия, 1968. — 676 с.

5. Березовский, С. Ф. Производство гнутых профилей : учеб. пособ. для ПТУ. — М. : Металлургия, 1985. — 200 с.

6. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев / В. В. Лапин, М. И. Писаревский, В. В. Самсонов, Ю. И. Сизов. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. — 228 с.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СТАНДАРТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ

Машиностроение является отраслью, обеспечивающей техническое оснащение других отраслей промышленности, в том числе и металлургической. Переход к шестому промышленному укладу связывается с цифровизацией производства, что создает базу для межотраслевой интеграции экономики. Верификацию межотраслевых BIGDATA естественно основывать на интеграционных взаимосвязях, установившихся в доцифровой период развития технологий. Выявление, описание и исследование таких взаимосвязей является актуальным, так как соответствует задачам становления цифровой экономики.

Система стандартов технологической оснастки (ССТО) относится к межотраслевым системам стандартов, в частности к группе стандартов, обеспечивающих качество продукции и работ [1]. Порядок формирования фонда документов системы стандартов технологической оснастки определяется ГОСТ 31.0000.01-90 «Технологическая оснастка. Основные положения». Определение технологической оснастки ГОСТ 31.0000.01-90 не устанавливает. В тоже время в другом стандарте ССТО, ГОСТ 31.010.01-84 «Приспособления станочные. Термины и определения», имеется ссылка к получившей широкое распространение межгосударственной межотраслевой системе стандартов — «Единая система технологической документации» (ЕСТД, шифр системы — 3). Рассмотрим в таблице 1 вывод обобщающего разъяснения термина «технологическая оснастка» на основе взаимосвязи определений на основе ГОСТ 3.1109-82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий».

Исходя из полученного обобщающего содержания термина для выявления объекта «технологическая оснастка» требуется наличие:

- 1) определенного производства;
- 2) технологического процесса, состоящего из частей;
- 3) технологического оборудования, в котором размещаются предметы труда (материалы или заготовки), рабочие инструменты (средства воздействия на предметы труда) и технологическая оснастка.

Таблица 1 — Анализ взаимосвязи терминов

Наименование термина	Содержание термина по ГОСТ 3.1109-82
Технологическая оснастка	Средства технологического оснащения, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса
Средства технологического оснащения	Совокупность орудий производства, необходимых для осуществления технологического процесса
Технологическое оборудование	Средства технологического оснащения, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещают материалы или заготовки, средства воздействия на них, а также технологическую оснастку
Обобщающее содержание термина	
Технологическая оснастка — это совокупность орудий производства, дополняющих технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса и размещающихся совместно с материалами или заготовками, но не воздействующих на них.	

В области металлургии основными видами производств являются: производство чугуна и стали (черная металлургия), производство цветных металлов и их сплавов (цветная металлургия). Родственным к указанным является производство отливок деталей (литейное производство). Задачей первых двух является получение определенной марки сплава металлов, т. е. заданного материала. Задачей литейного производства является получение отливок заданной формы из уже полученной марки металла или сплава. Объединяет эти производства то, что материал в ключевой момент производственного процесса находится в расплавленном жидком состоянии. Также с расплавлением материала связано сварочное производство. Однако подготовительные технологические процессы имеют принципиальные различия, отражающиеся и в характере технологического оборудования. Таким образом, в целом все указанные выше необходимые признаки наличия технологической оснастки в области металлургии имеются.

Следует отметить, что в ГОСТ 31.0000.01-90 указана его применимость на прямую к области машиностроения и приборостроения. Область металлургического производства, включающего черную и цветную металлургию, на сегодня в ССТО не представлена. Литейное и сварочное производства относятся к машиностроению. И действительно стандартом определены шифры групп технологической оснастки, связанные с литьем и сваркой (табл. 2).

Для сварочного производства в ССТО представлено две группы документов:

1) ГОСТ 31.2031.01 и ГОСТ 31.2031.02, определяющие типы, параметры, размеры и технические условия на приспособления сборно-разборные переналаживаемые для сборки деталей под сварку;

2) ГОСТ 31.211.41 и ГОСТ 31.211.42, определяющие основные конструктивные элементы, параметры и технические условия, правила приемки, методы контроля деталей и сборочных единиц сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ.

Таблица 2 — Группы технологической оснастки литейного и сварочного производства

Область технологической оснастки (шифр первой цифры*)	Разновидности технологической оснастки (шифры первой и второй цифры*)
Разновидности сварочных, термических, сборочных, строительных, плотничных, столярных приспособлений и инструмента, кроме режущего инструмента (2)	Приспособления и инструмент для сварки, наплавки, пайки, термической резки, сборки под сварку и пайку (20) Резерв/Прочие (21, 24, 26, 28/29)
Разновидности приспособлений и инструмента литейного (4)	Приспособления и инструмент плавильный, заливочный (40). Модели, плиты, ящики, стержневые, опоки литейные(41). Приспособления и инструмент формовочный(42). Приспособления и инструмент для литья кокильного под давлением(44). Приспособления и инструмент для литья непрерывного центробежного(45). Приспособления и инструмент для литья по выплавляемым и выжигаемым моделям(46). Приспособления и инструмент выбивной, зачистной, обрубной(47). Резерв/Прочие(43,48/49)

*Имеются ввиду цифры после шифра системы стандартов 31.XX00.

Для литейного производства термины и определения изложены во внесистемном стандарте ГОСТ 17919-84 «Оснастка технологическая литейного производства. Термины и определения». В частности, приводится такое определение: «Технологическая оснастка литейного производства – средства технологического оснащения, дополняющие литейное технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса получения отливок». Это определение полностью соответствует ССТО. Также соответствует положениям ССТО (табл. 2) и деление литейной оснастки на группы: плавильная печная, за-

ливочная, литейные формы, литейные модели, формовочные приспособления. В дополнение к внесистемным стандартам в ССТО литейная оснастка дополнительно разделена по видам литья. Однако документов ССТО по литейной оснастке не обнаружено.

Металлургическое производство — черная и цветная металлургия — не представлены в ССТО. Для того, чтобы оценить возможность применения ССТО в металлургическом производстве, на первом этапе удобно сравнить технологическое оборудование и процессы с родственным литейным производством [2, 3]. Анализ показывает, что, несмотря на сходные технологические процессы подготовки сырья и плавления, имеются принципиально различимые процессы, связанные с характером производства. Выплавка чугуна, стали и цветных металлов является непрерывным (процессным) производством [4], а получение отливок деталей — дискретным. Примером оборудования непрерывного производства являются машины и механизмы для переработки жидких продуктов доменной плавки, например, агрегаты грануляции чугуна и шлака. При литье заготовок требуется оборудование для подготовки штучных форм и стержней для заливки, что характерно для дискретного производства.

Выводы. Применение ССТО в области металлургии характеризуется тем, что соответствующие конструкции средств технологического оснащения представлены частично, что объясняется разделением по типу процессов на непрерывное и дискретное производство.

Документы в области литейного и сварочного производства имеют в ССТО собственное шифрование. Группы оснастки, выделенные в ССТО аналогичны существующим внесистемным стандартам. Для сварочного производства имеется ряд внутрисистемных стандартов. Это объясняется тем, что литейное и сварочное производство представляют собой отрасли машиностроения и относятся к дискретному типу.

Список литературы

1. Лифиц, И. М. Стандартизация, метрология и сертификация : учебник / И. М. Лифиц. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Юрайт-Издат, 2005. — 345 с.
2. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. IV-5. Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечник, В. М. Сеницкий, В. Г. Дрозд и др. ; под общ. ред. В. М. Сеницкого, Н. В. Пасечника. — М. : Машиностроение, 2000. — 912 с.
3. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. IV-4. Машины и оборудование кузнечно штамповочного и литейного производства / Ю. А. Бочаров, И. В. Матвиенко и др. ; под общ. ред. Ю. А. Бочарова, И. В. Матвиенко. — М. : Машиностроение, 2005. — 926 с.
4. Шамилева, Э. Э. Исследование типов производства / Э. Э. Шамилева, О. А. Шаркова // Инновационная наука. — 2015. — № 11. — С. 188–190. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tipov-proizvodstva>.

РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В связи с ужесточающимися требованиями безопасности труда на промышленных предприятиях (прежде всего тяжёлого машиностроения) появляется всё больше мест ограниченного доступа для работника. При этом остро встаёт вопрос контроля состояния и работы оборудования, т. к. обслуживающему персоналу необходимо осуществлять регулярные его осмотры и проверки. Остановка непрерывно работающих линий или оснащение всех подобных мест стационарным оборудованием визуального контроля нерациональны и экономически неэффективны. Следовательно, возникает необходимость использования мобильного комплекса контроля, позволяющего получить доступ к оборудованию в опасных зонах, при этом не подвергая опасности работника.

Возможным решением данной проблемы является применение робота с дистанционным управлением оснащённого средствами визуального и аудиоконтроля.

Были рассмотрены существующие аналоги мобильных роботов, например, для отбора проб жидкости, диагностики состояния трубопроводов и др.

При анализе способов передвижения было решено остановиться на шагающей схеме как наиболее подходящей к различным неподготовленным поверхностям с возможными препятствиями. Наиболее распространёнными конструкциями шагающих роботов являются гексапод — с шестью конечностями и квадропод — с четырьмя. Достоинствами гексапода являются статически стабильная походка и простота управления. Однако по другим критериям квадропод имеет преимущества, т. к. он имеет меньшую массу и материалоемкость, требования к источнику питания, более высокую скорость. Минусом же квадропода является динамически стабильная походка из-за чего предъявляются более жёсткие требования к управлению движением, а остановка может осуществляться только при опускании всех четырёх конечностей. по результатам сравнения выбрана последняя схема.

Для управления роботом был применен контроллер Arduino Nano (рис. 1) с платой расширения Diymore Standard Nano V3.0 I/O. Для движения конечностей были выбраны сервоприводы Tower Pro MG90S Micro Servo (рис. 2).

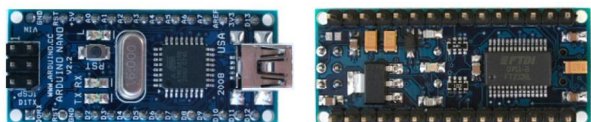


Рисунок 1 — Arduino Nano



Рисунок 2 — Сервопривод

Для проверки кинематических характеристик механизма проведён кинематический анализ для определения положения звеньев механизма согласно схеме приведённой на рисунке 3.

Модели частей робота (рис. 4) разработаны в САПР Компас-3D, выполнен прочностной анализ. Подготовка моделей к печати осуществлялась с помощью слайсера Cura. Печать произведена на 3D-принтере Flyingbear Ghost 5.

Управление изготовленным прототипом (рис. 5) осуществляется с помощью мобильного телефона по Bluetooth интерфейсу в программе Bluetooth Spp Pro. Произведены испытания передвижения на различных типах поверхностей (скользкой, песчаной, каменистой) в результате которых робот показал свою эффективность.

Данная модель может быть оснащена видеокамерой, тепловизором, микрофоном, манипулятором для отбора проб.

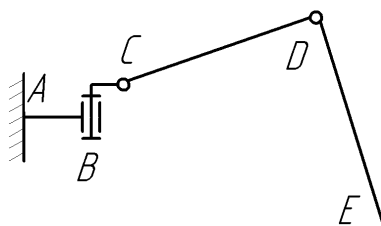


Рисунок 3 — Кинематическая схема конечности робота

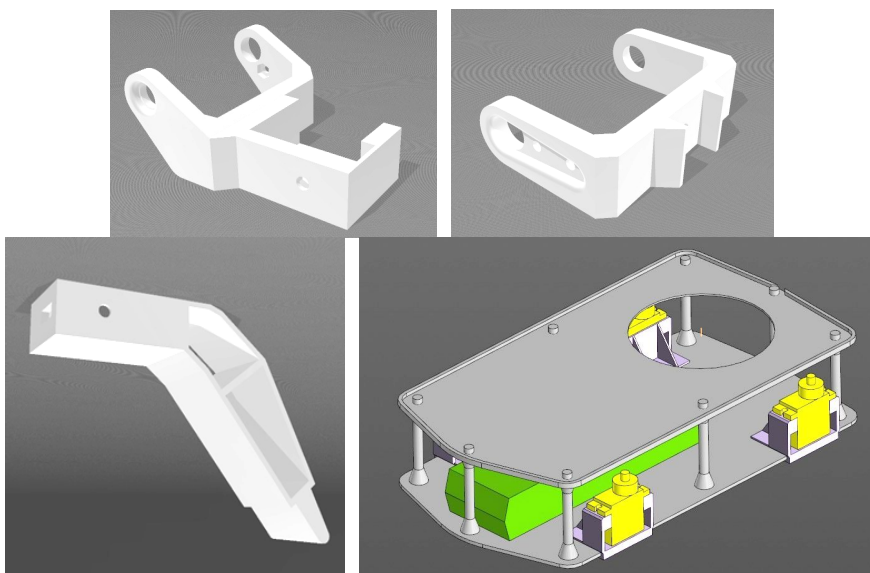


Рисунок 4 — Детали робота

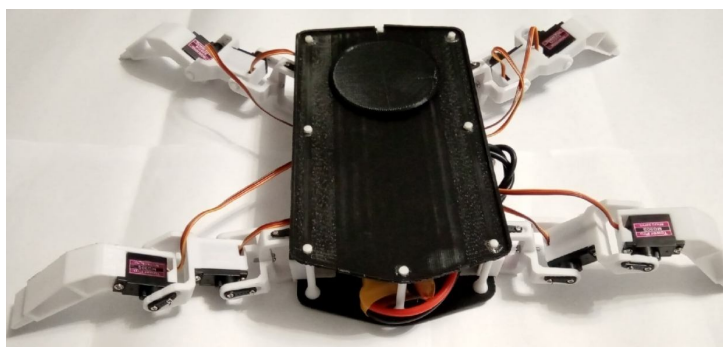


Рисунок 5 — Прототип робота

Заключение. Разработка может применяться в производственных условиях в качестве вспомогательного устройства для визуального и звукового контроля работы оборудования. Для изготовления устройства возможно использовать непрофессиональное оборудование для 3D-печати. Устройство имеет достаточно простую конструкцию, не сложно в изготовлении и доработке.

Список литературы

1. Greek Automata [Electronic resource]. — Access mode: <http://www.ancient-wisdom.com/greekautomata.html>.
2. Макаров, И. М. Робототехника: История и перспективы / И. М. Макаров, Ю. И. Топчеев. — М. : Наука; Изд-во МАИ, 2003. — 349 с.
3. Moran, M. E. The da Vinci Robot / M. E. Moran // Journal of Endourology. — 2007. — Vol. 20. — No. 12. — P. 986–990.
4. Фокин, В. Г. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем / В. Г. Фокин, С. В. Шаныгин // Молодой ученый. — 2015. — № 18 (98). — С. 207–215. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/98/22115/>.
5. Ермолин, В. С. Теоретическая механика. Часть 2. Кинематика / В. С. Ермолин, В. С. Королев, И. Ю. Потоцкая. — СПб. : Изд. Дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2012. — 223 с.
6. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. — 2-е изд. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 203 с.
7. Arduino [Electronic resource]. — Access mode: <http://arduino.cc>.

Бревнов А. А.
к.т.н., доцент,
Бревнова О. В.
аспирант,
Левченко Э. П.
к.т.н., доцент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ЛОПАТОК МАШИН РАЗГОННО-УДАРНОГО ТИПА

Необходимость в дроблении различных материалов существует в металлургической, строительной, аграрной и других отраслях промышленности. Одним из эффективных способов дробления является измельчение насыпных материалов в машинах разгонно-ударного типа. Повышение радиальной скорости частицы способствует улучшению условий разрушения измельчаемого материала, поэтому важно использовать это преимущество при дальнейшем его движении в зоне действия разгонных лопаток.

Наиболее простым вариантом размещения разгонных лопаток является радиальное их расположение на роторе (рис. 1).

Для увеличения эффективности дробления необходимо придать частице достаточную энергию для ее разрушения во время удара об отбойную поверхность. Движение твердых частиц под действием внешних сил в зоне разгонных лопаток рассмотрено в различных источниках [1, 2]. Изучение поведения твердых частиц под действием разгонных лопаток основывается на решении уравнений движения материальной точки

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F_{\text{ц}} - F_{\text{мп}}, \quad (1)$$

где m — масса материальной точки; $F_{\text{ц}}$ — центробежная сила; $F_{\text{мп}}$ — сила трения.

В работе [1] доказывается, что повысить эффективность ударного измельчения возможно за счет выполнения разгонных лопаток ротора, отклоненными в противоположную вращению сторону на величину $12\text{--}14^\circ$ (рис. 2).

Систему уравнений, описывающую движение частицы по наклонной лопатке, в неподвижной системе Oxy можно записать в виде

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi - F_{\text{мп}}, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi - F_k, \end{cases} \quad (2)$$

где φ — угол отклонения лопатки от радиального направления; F_k — сила Кориолиса.

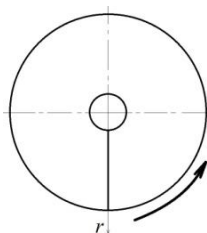


Рисунок 1 — Радиальное расположение лопатки

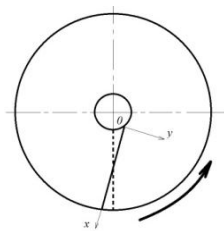


Рисунок 2 — Наклонное расположение лопатки

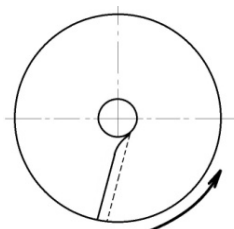


Рисунок 3 — Усовершенствованный профиль лопатки

В работе [3] рассмотрена задача улучшения скоростных характеристик движения твердых частиц при подходе к зоне действия вращающихся разгонных лопастей за счет замены конусного профиля питателя профилем в виде брахистохроны. Это определяет более выгодные начальные условия дальнейшего разгона частицы. Применить такое решение можно и к форме разгонных лопаток. Изменение формы прямой лопатки на профиль с дополнительным начальным участком в виде брахистохроны показано на рисунке 3.

В момент соприкосновения вращающейся лопатки с частицей происходит удар, с физической точки зрения, схожий с падением частицы на твердую поверхность под действием гравитации. При движении частицы на начальном участке лопатки по профилю в виде брахистохроны, в сравнении с прямой, реакция поверхности на частицу в большей степени отклонена к радиальному направлению, что позволяет повысить скорость частицы. К тому же, при таком профиле, в момент удара частицы о лопатку, энергия в меньшей степени расходуется на деформацию частицы, что также способствует увеличению ее скорости.

Таким образом, усовершенствование формы разгонных лопаток должно повысить эффективность разрушения измельчаемого материала за счет геометрического фактора, позволяющего сообщить частице дополнительный импульс, увеличивающий ее скорость.

Список литературы

1. Гребенчук, П. С. Описание движения частиц материала в рабочей зоне ударно-центробежной мельницы / П. С. Гребенчук, Э. И. Левданский // Инженер-механик. — 2013. — № 4 (61). — С. 41–44.
2. Гарабажиу, А. А. Математическое моделирование процесса перемешивания сухих сыпучих материалов в энергосберегающем роторно-центробежном смесителе / А. А. Гарабажиу // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2013. — № 3. — С. 126–134.
3. Бревнов, А. А. Сравнительный анализ условий подачи материала в разгонно-ударную дробилку / А. А. Бревнов, О. В. Бревнова, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института. — 2020. — Вып. 21 (64). — С. 88–93.

Бочаров А. В.
к.т.н., доцент,
Непогожев Д. С.
бакалавр 4-го курса

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, РФ

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОКРЫТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РОЛИКОВ НЕПРЕРЫВНО-ТРАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА

Прокатное производство является завершающим этапом металлургического цикла. Современные прокатные цеха работают в непрерывном режиме, что позволяет широко применять комплексную механизацию и автоматизацию производства [1].

Одним из основных технологических агрегатов современного цеха производства холодного проката и покрытий является травильный агрегат. Требования к надёжности его механизмов предъявляются высокие, т.к. поломка одного устройства ведёт к простоя всего агрегата. Непрерывно-травильный агрегат [2] предназначен для удаления окалины с поверхности горячекатаных полос путём механического разрушения окалины и последующего химического растворения ее в растворе соляной кислоты, а также промасливания протравленной полосы и в случае необходимости укрупнения рулонов путём сварки полос встык. Процесс травления и регенерации отработанных солянокислотных растворов осуществляется в замкнутом технологическом цикле с максимальным использованием всех промывных вод и кислых стоков в системе регенерации. Высокая степень автоматизации управления работой агрегатов. Незначительный объем раствора в ваннах и высокоэффективная система циркуляции его позволяют освобождать ванны от растворов в течение нескольких минут. Насосы высокой производительности обеспечивают интенсивный обмен растворов у поверхности полосы, сокращая время травления [3].

В агрегате используются различные роликовые устройства для транспортирования и натяжения обрабатываемой полосы [4]. В зависимости от места установки в агрегате работа этих устройств носит различный характер. В одних случаях устройству приходится преодолевать весьма значительные постоянные; сопротивления движению полосы, как это имеет место при размотке с натяжением полосы из рулона, протягивании полосы через окалиномател, вытаскивании полосы из петлевой ямы, ванн химической обработки и т. п. В подобных случаях электродвигатель привода устройства работает в двигательном режиме, тянет полосу. В связи с этим устройства, предназначенные для протягивания полосы, получили наименование тянущих роликов, тянущих устройств или станций.

Устройства, используемые для продвижения полосы (или листов) в тех случаях, когда сопротивление движению полосы возникает за устройством, получили название подающих роликов или устройств. Подающие ролики рассчитывают обычно на небольшие толкающие усилия, так как большие сопротивления ими не удаётся преодолеть из-за гибкости полосы. Электродвигатель привода подающих роликов работает в двигательном режиме.

В других случаях описываемые устройства используют для создания дополнительно устойчивого сопротивления движению полосы — натяжения на некоторых участках агрегата. Создавать натяжение полосы бывает необходимо, например, при движении ее в петлевых устройствах, травильных ваннах и проходных печах для исключения больших провисаний, перед моталками для обеспечения смотки полосы в рулон с натяжением и в других подобных случаях. Кроме этого, натяжение полосы обеспечивает более устойчивое ее движение и улучшает условия управления электроприводами машин, одновременно транспортирующих полосу.

По виду контакта полосы с рабочими роликами тянущие, подающие и натяжные устройства делятся на два типа. К первому типу относятся устройства с линейным контактом между роликами и полосой: полоса зажимается между двумя параллельно расположенными

роликами. Ко второму типу относятся устройства с контактом между роликами и полосой по поверхности или так называемые S-образные устройства. В таких устройствах полоса огибает ролики, прижимаясь к их поверхности под действием либо только натяжения, либо натяжения и прижимных роликов.

При эксплуатации натяжных станций S-образного типа, используемого в линии НТА, периодически возникает необходимость ремонта натяжных роликов. Ролик представляет собой сложную составную деталь. Его ось изготавливается из дорогой и прочной стали марки 50ХФ. Бочка ролика составная. На прочную основу из стали марки 45ХН наносится слой стойкой к истиранию резины. Износ слоя резины из-за нагрузок и относительно низкой прочности основная причина отказа этого элемента. Главной причиной использования этого материала является его высокая коррозионная стойкость.

На сегодняшний день существуют несколько видов материалов покрытий, которые позволят ролику выполнять свои функции с заведомо большим ресурсом [5]. В ходе сравнительного анализа оптимальным на сегодняшний день является полиуретан. Технология нанесения и создания покрытий из полиуретана на основе простых полиэфиров методом жидкого формования хорошо известна и отработана для нанесения такого слоя на ролики [6]. Наносят материалы двух типов: полиуретановая композиция твердостью 90 у. е. по Шору А, состоящая из двух компонентов: А (смола), В (отвердитель); для покрытия твердостью 50 у. е. по Шору А, состоящая из трех компонентов: А (смола), В (отвердитель), С (полиолы).

Для нанесения материала используется оборудование: смесительно-дозировочные установки: УСД-1, УСД-10, УЛ-02; станки токарные; круглошлифовальный станок модели 3А 174; дробеструйная установка; стационарный термошкаф; передвижные термошкафы; грузовой манипулятор; передаточная тележка; прессформы литьевые; шкурка шлифовальная ГОСТ 6456-82; кисти флейц ГОСТ 10597-87; дробь металлическая 0,5-1,5 ДЧК ГОСТ 11964-81; резцы проходные ГОСТ 18878-73; круг шлифовальный 25А25Н СМ2 ГОСТ 2424-83; пылегазоочистные установки ВС-1, ВС-2, ВС-5, ВС-7.

Существуют три способа нанесения полиуретана [6]:

1. Нанесение полиуретанового покрытия методом литья в формы. Внутренняя поверхность формы перед сборкой обрабатывается антиадгезионной кремнийорганической пастой КПД ГОСТ 19783-74. Форма с подготовленным роликом собирается, места разъема формы уплотняются сырой резиновой смесью и резиновыми кольцами. Собранный форма устанавливается в термошкаф с помощью передаточной тележки и прогревается до температуры $(100\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение двух часов, после чего форма извлекается из термошкафа, запускается пылегазоочистная установка ВС-1 и производится заливка с помощью смесительно-дозировочной установки УСД-10. По окончании заливки форму с помощью передаточной тележки устанавливают в термошкаф на термостатирование. Время термостатирования зависит от размеров детали и формы и выбирается в соответствии с технологическими картами.

2. Нанесение полиуретанового покрытия типа «Монотан» методом литья в формы. Форму перед сборкой тщательно очищают и обрабатывают внутри антиадгезионной пастой «Силрелиз». Запускают пылегазоочистную установку ВС-5. Проводят дробеструйную обработку поверхности бочки ролика до матового цвета. С помощью кисти флейц промывают ролик бензином, сушат в течение 30 мин и наносят кистью адгезионную пасту «Силбонд». Сушку проводят на открытом воздухе или в термошкафу при температуре $(100\pm 3)^\circ\text{C}$. Для деталей, изготовленных из углеродистой стали, рекомендуется двухслойное покрытие адгезионной пастой и горячая сушка. Затем сверлят в конце бочки ролика отверстие под термопару. Собирают форму, ставят на разогрев до температуры $70\text{--}75^\circ\text{C}$ в термошкаф. Помещают канистру с полиуретаном «Монотан» в термошкаф и выдерживают при температуре $(70\pm 5)^\circ\text{C}$ минимум 12 час. Запускают пылегазоочистную установку ВС-1. Производят разливку разогретого полиуретана «Монотан» из канистры в форму. Разливку проводят медленно для предотвращения захватывания воздуха. После разливки устанавливают форму в термошкаф на термостатирование. Полимеризация начинается при температуре выше 75°C .

Минимальная вязкость полиуретана достигается в интервале температур 110–115 °С, что обеспечивает удаление из него захваченного воздуха. Время полимеризации зависит от массы, формы, марки металла, длины отливки и её толщины в поперечном сечении. В термошкафу нагрев формы производится до температуры 110–115 °С, по показаниям прибора ФЦЛ-501-08, считывающего температуру с термопары, установленной в теле ролика. Выдерживают эту температуру в течение двух часов, затем переключают нагрев термошкафа до температуры 145–150 °С. После нагрева ролика до температуры 145–150 °С, нагрев прекращают. При достижении температуры ролика (135±2) °С, включают нагрев и вместе с термошкафом выдерживают ролик при этой температуре в течение 11–11,5 час. После выдержки нагрев термошкафа отключают. Через четыре часа после отключения, изымают форму с роликом из термошкафа для последующего охлаждения на воздухе. После охлаждения форму разбирают и извлекают из неё ролик.

3. Нанесение полиуретанового покрытия на ролики ротационным методом. Устанавливают ролик, промазанный клеем «Тиксон» на токарный станок. Удлиняют края бочки картонными выводными планками шириной не более 50 мм. При наклейке планок контролируют качество приклеивания. Наличие картонных планок позволяет сохранить геометрические размеры (диаметр бочки) по всей длине покрываемого ролика. Устройство подачи включают влево-вправо до тех пор, пока не будет достигнут соответствующий чертежу диаметр изделия, включая припуск +5 мм. Полиуретановое покрытие наносится на вращающийся ролик спиралевидно. Перед заправкой машины УСД-1 материал подогревается в термошкафу: компонент «А» — до 70 °С, компоненты «В» и «С» — до 30 °С. При покрытии ролика большого диаметра компонент «А» заправляют в стационарную и передвижную ёмкости, чтобы процесс литья не прерывался. Передвижная ёмкость имеет автономное устройство для разогрева и вакуумирования материала и соединяется с УСД-1 шлангом, что позволяет заправлять и вакуумировать компонент «А» во время работы. Нанесение покрытия на ролики осуществляется при температуре в цехе не ниже 15 °С. Массовый расход полиуретановой композиции, выдаваемого смесительно-дозировочной установкой составляет 0,9–1,0 кг/мин. Перед нанесением запускается пылегазоочистная установка ВС-1. Для получения лучших механических свойств роликов, после нанесения полиуретанового покрытия проводят термостатирование: выдержка ролика в термошкафу при температуре 100–110 °С в течение 8–16 час (время выдержки зависит от размеров ролика и выбирается в соответствии с технологической картой). Токарная обработка или шлифовка роликов производится не менее чем через 48 час после нанесения покрытия согласно технологической карте. Перед обработкой запускается пылегазоочистная установка ВС-7. Размеры бочки обработанного ролика должны соответствовать чертежу.

Для восстановления и увеличения надёжности роликов непрерывно-травильного агрегата целесообразно наносить полиуретановое покрытие твёрдостью 50 у. е. по Шору А, состоящее из трёх компонентов: А (смола), В (отвердитель), С (полиолы), ротационным методом с последующей механической обработкой. Ролик с таким покрытием сможет работать в условиях повышенной агрессивности среды и высокого гидроабразивного износа, высоких ударных нагрузок, сдвиговых напряжений и деформаций.

С таким покрытием износ бочки ролика будет незначительный и позволит существенно увеличить срок эксплуатации всего ролика. Кроме того, расчёт показал, что такая замена возможна, так как все полученные прочностные показатели покрытия превышают минимально допустимые запасы прочностей [7].

Список литературы

1. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства : учебное пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. — 3-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2020. — 528 с.
2. Жильцов А. П. Металлургические технологии и комплексы : учеб. пособ. / А. П. Жильцов, А. Л. Челябинна. — Липецк : ЛГТУ, ЭБС АСВ, 2013. — 132 с.

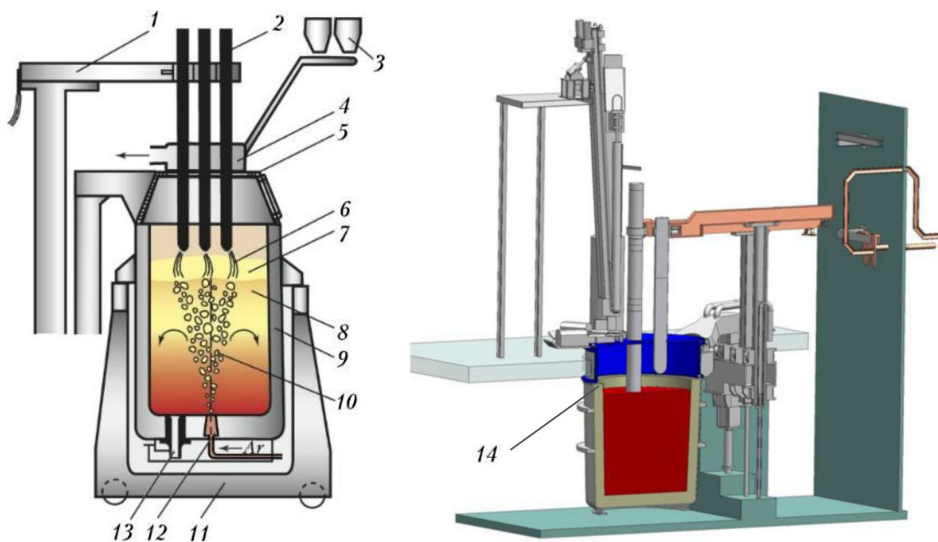
3. Основы металлургического производства : учебник для вузов / В. А. Бигеев, В. М. Колокольцев, В. М. Салганик [и др.]. — 3-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2021. — 616 с.
4. Колесников, А. Г. Механизмы и устройства рабочих клеток прокатных станов : учебное пособие по курсу «Расчет и конструирование прокатных станов» / А. Г. Колесников, Р. А. Яковлев. — М. : Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2008. — 63 с.
5. Эксплуатационные материалы / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, А. А. Глущенко, А. Л. Хохлов. — 3-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2022. — 528 с.
6. Технология изготовления композиционных материалов методами литья, проката и прессования : монография / Г. Н. Гаврилов, В. А. Хренов, В. Т. Ерофеев [и др.] ; под ред. Г. Н. Гаврилова, В. Т. Ерофеева. — Саранск : МГУ им. Н. П. Огарева, 2020. — 340 с.
7. Жильцов А. П. Основы проектирования узлов и механизмов металлургических машин : учеб. пособ. / А. П. Жильцов, П. Ф. Гахов, А. А. Харитonenko. — Липецк : ЛГТУ, ЭБС АСВ, 2013. — 157 с.

**АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗМОЖНЫХ ОТКАЗОВ,
ПРИВОДЯЩИХ К ПРОСТОЮ АГРЕГАТА «ПЕЧЬ-КОВШ»**

Кислородно-конвертерный процесс занимает ведущее место в мировой практике среди различных способов производства стали и является определяющим сталеплавильным процессом. В настоящее время это самый массовый способ производства стали. Он лидирует по основным показателям в сравнении с электропечным и специальными способами производства высококачественной стали [1].

Современное конвертерное производство представляет собой сочетание технологий предварительной подготовки чугуна, выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки металла. Сквозная технология кислородно-конвертерного производства стали заключается во внепечном получении марки стали и разливкой на МНЛЗ в готовую продукцию в виде слябов. На сегодняшний день наиболее современным способом внепечной обработки стали является обработка её в агрегате печь-ковш.

Установки «печь-ковш» [2] все чаще применяются для внепечной обработки стали как в кислородно-конвертерных, так и в электросталеплавильных цехах. Особенность агрегата печь-ковш, заключается в том, что данная разработка опирается на последние достижения в области шлаковой технологии и включает использование погруженной электрической дуги. Длительная по времени металлургическая обработка стали переносится из плавильной печи на другие этапы процесса. Кроме того, агрегат «печь-ковш» (рис. 1) выступает в качестве буфера между процессом выплавки и разливки, причём в нем можно регулировать температуру и химический состав стали в жёстко допустимых пределах.



- 1 — токоподвод; 2 — графитированные электроды; 3 — бункеры для ферросплавов; 4 — система удаления технологических газов; 5 — водоохлаждаемый свод (крышка); 6 — электрические дуги; 7 — рафинировочный шлак; 8 — жидкий металл; 9 — футерованный ковш; 10 — газовая продувка; 11 — устройство для транспортирования ковша (сталевоз); 12 — продувочное устройство; 13 — выпускное отверстие с шиберным затвором; 14 — Чертежный эскиз установки

Рисунок 1 — Принципиальная схема агрегата «печь-ковш»

На агрегате «печь-ковш» сталь нагревается, температура корректируется до нужного значения, и осуществляются металлургические реакции (десульфурация/ рафинирование). Установка даёт возможность точно корректировать окончательный химический состав стали при минимальных издержках.

Процесс осуществляется в ковше с основной футеровкой. Ковш закрывается полностью водоохлаждаемой крышкой. Энергия для нагрева стали подаётся тремя графитовыми электродами, по аналогии с дуговой сталеплавильной печью переменного тока. Дуги, образующиеся на кончиках графитовых электродов, погружаются в основной белый шлак, защищающий огнеупорную футеровку ковша от излучения дуги. Установка «печь-ковш» работает на большой мощности и с длинными электрическими дугами, покрытыми шлаком, благодаря чему достигается высокий коэффициент полезного действия. Во время процесса в агрегате металл постоянно продувается инертным газом, который подаётся снизу через продувочные кирпичи в днище ковша. В рабочем пространстве печи инертный газ служит дополнительной защитой металла от загрязнения из-за возможного проникновения воздуха ввиду недостаточной герметичности крышки ковша [3].

Эти функции можно обобщить следующим образом:

1. Нагрев стали электрическими дугами, погруженными в шлак.
2. Перемешивание и продувка жидкой стали инертным газом.
3. Рафинирование основным белым шлаком.
4. Атмосфера инертного газа в печи-ковше.

Желаемый эффект достигается только в результате реализации всех четырёх функций. Нагрев погруженными электрическими дугами с высокой полезной мощностью возможен только при соответствующей шлаковой смеси и эффективной гомогенной продувке инертным газом. Металлургические реакции, происходящие в печи-ковше, зависят от реакций на границе шлак/сталь, на которые благоприятное влияние оказывает высокая турбулентность, создаваемая за счёт продувки инертным газом [2].

Основные и белые шлаки отличаются низким содержанием кислорода. Осаждение неметаллических включений и десульфурация зависят от горячего жидкого шлака. Необходимое для процесса десульфурации низкое содержание кислорода в системе достигается за счёт атмосферы инертного газа. Легирование критических элементов можно производить только при создании неокисляющей среды. Основным преимуществом любого процесса ковшевого рафинирования по сравнению с плавильной печью является работа печи-ковша с использованием восстановительного основного шлака. Конструкция печи-ковша представляет собой почти герметичную систему, состоящую из ковша с крышкой, что обеспечивает рафинирование стали без риска нового окисления.

С помощью инертного газа сталь не только перемешивается, но также защищается от повторного окисления. Металлургические реакции, а также распределение тепла в стали поддерживаются пограничными реакциями, инициированными продувкой инертным газом. Кроме того, в печи-ковше можно оптимально адаптировать температуру стали под процесс разливки, благодаря чему сокращается время цикла и потребление энергии в сталеплавильном агрегате.

Так как процесс в печи-ковше воспроизводим, то даже для критических марок стали можно выдержать химический анализ в достаточно узких диапазонах. Результаты, достигаемые в печи-ковше, не зависят от процесса в плавильном агрегате. Практически не имеет значения, каково начальное содержание кислорода. Высокое содержание кислорода можно легко снизить, поскольку в ковше нет другого его источника, кроме собственно стали [4].

Для раскисления стали обычно используются кремний или алюминий. Если марка стали допускает только незначительное содержание этих двух элементов, то в ограниченных количествах можно провести чистое рафинирование с использованием основных шлаков. Для дальнейшего снижения содержания кислорода в стали можно использовать обработку в вакууме или с применением силикокальция [4].

Процесс в печи-ковше способствует эффективному удалению неметаллических включений из стали при правильном использовании технологии шлакования. Донная продувка инертным газом вызывает интенсивную и турбулентную реакцию на границе сталь / шлак, что способствует осаждению включений. В печи-ковше возможно производство марок сталей с очень высокой степенью чистоты, в том числе, дляковки [5].

При оценке конструкции и изучении эксплуатации реальной установки можно четко определить источники причин возможных отказов:

1. Закупорка продувочного блока. Работа печи-ковша невозможна без перемешивания стали, поэтому при его нарушении возможно образование настывлей.

2. Утечка охлаждающей жидкости в подающей магистрали.

3. Прорыв ковша. Прорывы ковша имеют место в районе шлакового пояса или при ослаблении продувочного блока.

4. Открытие шиберного затвора. Проблемы с открытием и закрытием шиберного затвора вызывают нарушение герметичности камеры.

5. Работа с твёрдым шлаком. При нарушении времени нахождения ковша без перемешивания может образовываться слой твёрдого шлака, и можно предпринять следующие действия для ломки такого шлака.

6. Порядок контроля свободного борта печи-ковша. Цель контроля свободного борта ковша заключается в обеспечении достаточного свободного борта во избежание проблем эксплуатации печи-ковша.

Проанализировав эти отказы агрегата, можно установить наиболее важные события, которые могут приводить к простою агрегата печь-ковш, и зная их, были разработаны контрмеры по их предупреждению [6].

Список литературы

1. Современный кислородно-конвертерный процесс : учеб. пособ. / А. Д. Чертов, под ред. В. А. Синельникова. — Липецк : ОАО «НЛМК», 2010. — 198 с.

2. Основы металлургического производства : учебник для вузов / В. А. Бигеев, В. М. Колокольцев, В. М. Салганик [и др.]. — 3-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2021. — 616 с.

3. Лапшин, И. В. Автоматизация агрегатов внепечной обработки стали и спецэлектromеталлургии : учебное пособие / И. В. Лапшин. — М. : МИСИС, 2009. — 109 с.

4. Дюдкин, Д. А. Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. — М. : Теплотехник, 2008. — 325 с.

5. Челядина, А. Л. Металлургические технологии и комплексы : учеб. пособ. / А. Л. Челядина, А. П. Жильцов. — Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2013. — 376 с.

6. Харитоненко, А. А. Анализ и усовершенствование методов технического обслуживания и ремонта оборудования в металлургическом производстве / А. А. Харитоненко, А. П. Жильцов // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2019 — Вып. 17 (60). — С. 98–104.

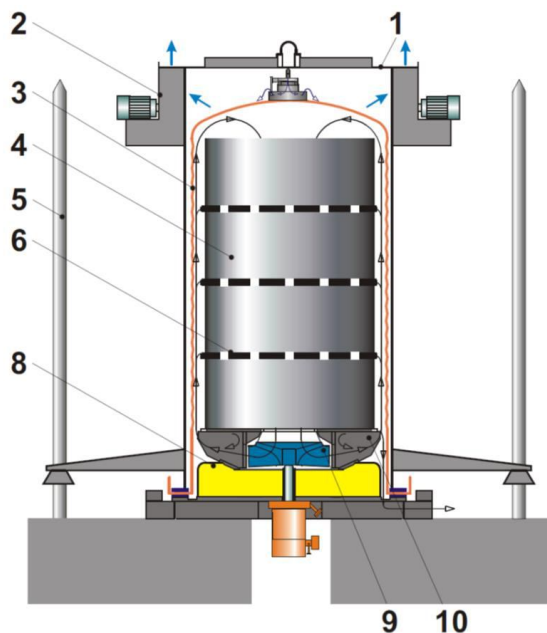
ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ВЕНТИЛЯТОРА СТЕНДА ОТЖИГА КОЛПАКОВОЙ ПЕЧИ ЗА СЧЁТ ДОБАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Колпаковые печи предназначены для светлого рекристаллизационного отжига рулонов конструкционной стали после холодной прокатки [1].

Основными составными частями колпаковых печей (рис. 1) являются нагревательные колпаки, печные стенды, муфели, конвекторные кольца, циркуляционные вентиляторы с направляющими аппаратами и колпаки ускоренного охлаждения.

Стенды и свод нагревательного колпака футеруются шамотным легковесным кирпичом [2]. В нижней части колпака установлены в 2 ряда по высоте 12 инжекционно-атмосферных горелок. Для уборки продуктов сгорания из печи на нагревательном колпаке имеются 2 эжектора, в которые продукты сгорания поступают через 2 отверстия в верхней части нагревательного колпака и трубой эжектора удаляются в систему боронов. Подключение газа и инжекционного воздуха к газо- и воздухопроводам осуществляется с помощью гибких шлангов. В центре печного стенда крепится циркуляционный вентилятор. Верхний конец вала вентилятора с крыльчаткой находится в печи и выполнены из жаропрочной стали.

Каждый стенд оборудован индивидуальными подводами смешанного и защитного газов, технической водой для охлаждения циркуляционного вентилятора и химочищенной воды для холодильников защитного газа, электропитания для двигателей вентиляторов, термодатчиками и проводкой КИП, что обеспечивает возможность установки любого нагревательного колпака на любом стенде отделения.



1 — корпус охлаждающего колпака; 2 — вентилятор; 3 — муфель; 4 — садка; 5 — направляющая стойка; 6 — конвекторный диск; 8 — стенд отжига; 9 — вентилятор стенда; 10 — основной конвектор

Рисунок 1 — Принципиальная схема колпаковой печи

Муфель предназначен для разделения нейтральной атмосферы под муфелем и печной атмосферы и изготавливается из жаропрочной хромоникелевой стали X13N10T. Колпак ускоренного охлаждения применяется для интенсификации охлаждения рулонов на печном стенде после отжига. Колпак состоит из сварного металлического кожуха цилиндрической формы и осевого вентилятора. Колпак ускоренного охлаждения устанавливается на печной стенд после снятия нагревательного колпака.

Отожжённые рулоны устанавливаются на стенд принудительного охлаждения стопой в 3–4 рулона по высоте с прокладкой между ними конвекторных колец, через которые просасывается наружный холодный воздух, охлаждая рулоны, главным образом, с торцов. Нагретый воздух отсасывается через воздухопроводы и выбрасывается в атмосферу (в зимнее время — в помещение) цеха. У каждого стенда имеется пульт управления со штепсельными розетками для присоединения питания к осевым вентиляторам колпаков ускоренного охлаждения, циркуляционным вентиляторам печных стендов.

Цикл отжига состоит из периодов нагрева, охлаждения и вспомогательных операций (загрузки и разгрузки стендов, продувки и т. п.) На период нагрева садки на стенд устанавливается переносной нагревательный колпак, на который для сжигания коксодоменного газа смонтированы инжекционные атмосферные горелки. В период нагрева защитный газ приводится в движение с помощью стендового вентилятора в подмуфельном пространстве. Защитный газ нагревается от стенок муфеля и переносит тепло к рулонам. По окончании периода нагрева нагревательный колпак отключают и переносят на другой подготовленный к отжигу стенд. Для интенсификации теплообмена и сокращения длительности охлаждения применены колпаки ускоренного охлаждения и вынесенные холодильники защитного газа. Защитный газ, проходя в межтрубном пространстве холодильников, отдает тепло оперённым трубам, через которые проходит охлаждающая вода.

Каждый стенд имеет в своем составе циркуляционный вентилятор с жаропрочной динамически сбалансированной крыльчаткой и двигателем с регулируемой скоростью вращения. Что касается двигателя, то речь идёт о специальном водоохлаждаемом двигателе в вакуумногерметичном исполнении [3]. Крыльчатка же смонтирована на валу самого двигателя. В подавляющем большинстве случаев двигатели, используемые в стендах, иностранного производства, либо собраны с использованием значительного количества иностранных комплектующих. В сложившихся в настоящий момент макроэкономических условиях как закупка нового двигателя, так и ремонт вышедшего из строя могут привести не только к значительным затратам, но и к длительным простоям оборудования ввиду сложностей с закупкой и логистикой комплектующих. Задачей ремонтных служб в данных условиях является продление жизненного цикла оборудования как можно дольше [4].

При длительной эксплуатации данного узла существует риск налипания различных технологических отложений на лопастях крыльчатки, что в дальнейшем может привести к разбалансировке и повышенным нагрузкам на подшипники, вал и прочие детали данного узла. С целью ранней диагностики и своевременного вывода узла в ремонт для предотвращения более критичных последствий необходимо производить постоянный мониторинг и контролировать заданные параметры работы узла [5]. В данном случае наиболее подходящим методом диагностики является вибродиагностика.

В настоящее время из всего многообразия измеряемых параметров, характеризующих состояние механического оборудования (температура, давление и т. д.), наиболее перспективным направлением диагностики состояния оборудования является анализ вибрации различных частей механизмов [6]. Это определяется следующими факторами: анализ вибрации является методом неразрушающего контроля; вибрация содержит максимальный объем диагностической информации; машина «прозрачна» для вибрации, то есть нужную информацию можно получать в месте, удалённом от источника вибрации; для измерения вибрации не требуется остановка, разборка и изменение режимов работы агрегата [7].

В результате поисков подходящих технических решений подобран комплекс оборудования для вибродиагностики, позволяющий довольно просто осуществить установку датчи-

ков и контролировать централизованно большое количество оборудования. Беспроводной виброметр PCE-VMS 504 представлен на российском рынке.

Беспроводной комплекс измерения виброскорости, виброускорения, смещения и температуры с внешними датчиками. Комплекс позволяет использовать до 60 датчиков для одной базы. Всего можно использовать одновременно до 6 базовых станций и 360 датчиков. Система может эксплуатироваться в диапазоне температур от -20 до $+1250$ С, что позволяет использовать ее в самых сложных условиях. Беспроводная система мониторинга PCE-VMS 504 измеряет вибрацию в диапазоне до 30 г и в частотном диапазоне от 5 до 10 кГц. Система использует внешние сенсоры, передача сигнала от которых выполняется в беспроводном режиме. Сенсоры имеют магнитные держатели и легко устанавливаются на машины и оборудование (рис. 2).

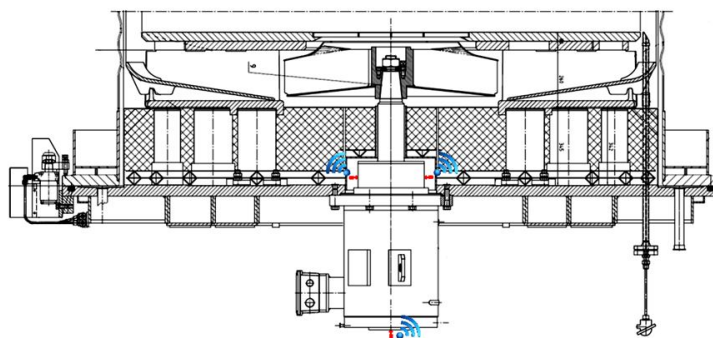


Рисунок 2 — Схема установки датчиков на узле вентилятора

В процессе работы сервер Socket/Web Kommunikation отправляет полученные данные к блоку управления беспроводной системой измерения вибрации PCE-VMS 504, и дальше отправляются на ПК. Неоспоримое преимущество системы — отсутствие соединительных проводов, мешающих в работе.

В ходе разработки предложения по модернизации стенда был произведён анализ «узких мест» и предложен вариант вибродиагностики, как метода контроля состояния оборудования [8]. Подобран конкретный прибор и датчики для вибродиагностики, способные работать в заданных условиях и производить сбор требуемых параметров. Реализация данного подхода к контролю состояния оборудования позволит диагностировать неисправности на ранних этапах и предотвращать более серьёзные последствия возможных отказов.

Список литературы

1. Колесников, А. Г. Технологическое оборудование прокатного производства : учебное пособие / А. Г. Колесников, Р. А. Яковлев, А. А. Мальцев. — М. : Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2014. — 168 с.
2. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства : учеб. пособ. / А. И. Рудской, В. А. Лунев. — 3-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2020. — 528 с.
3. Жильцов А. П. Основы проектирования узлов и механизмов металлургических машин : учеб. пособ. / А. П. Жильцов, П. Ф. Гахов, А. А. Харитonenko. — Липецк : ЛГТУ, ЭБС АСВ, 2013. — 157 с.
4. Морозова, И. Г. Современные проблемы металлургии, машиностроения и материалобработки : учеб. пособ. / И. Г. Морозова, М. Г. Наумова, И. И. Басыров. — М. : ИД МИСиС, 2018. — 52 с.
5. Корнилов, Ю. А. Нагревательные устройства для термической обработки. Расчет и конструирование электрических печей сопротивления : учеб. пособ. / Ю. А. Корнилов, Ю. М. Домбровский. — Ростов н/Д : Донской ГТУ, 2017. — 61 с.
6. Колобов, А. Б. Вибродиагностика. Теория и практика : учеб. пособ. / А. Б. Колобов. — М. : Инфра-Инженерия, 2019. — 252 с.
7. Бочаров, А. В. Теоретические основы центровки роторного оборудования : учеб. пособ. / А. В. Бочаров. — Липецк : ЛГТУ, ЭБС АСВ, 2016. — 85 с.
8. Раскатов, Е. Ю. Основы научных исследований и моделирования металлургических машин : учеб. пособ. / Е. Ю. Раскатов, В. А. Спиридонов. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 468 с.

*Зинченко А. М.**к.э.н., доцент,**Денисова Н. А.**к.т.н., доцент,**Кучма С. Н.**к.т.н., доцент,**Стародубов С. Ю.**старший преподаватель**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

СИЛА РЕЗАНИЯ КАК КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СИСТЕМУ «ИНСТРУМЕНТ — ДЕТАЛЬ»

Сила резания при механической обработке является одним из показателей общей эффективности процесса резания. Составляющая силы резания P_x может рассматриваться как показатель, в той или иной степени, зависящий от некоторых условий, также характеризующих процесс резания. К таким условиям, или факторам, обычно относят: подачу, скорость резания и, в условиях ультразвукового воздействия, расход СОЖ и амплитуду колебаний. Другими словами можно определить силу резания как функцию:

$$P_x = f(S; V; Q; A),$$

где S — подача, мм/об; V — скорость резания, м/мин; Q — расход СОЖ, л/мин; A — амплитуда ультразвуковых колебаний, мкм.

С точки зрения организации исследований влияния ультразвуковых колебаний на процесс резания и, в частности, на силу резания, можно показатели S , V , Q и A рассматривать как параметры оптимизации факторного пространства и с учетом их значений планировать эксперимент. Факторное пространство с четырьмя параметрами оптимизации значительно усложняет как планирование эксперимента, так и верификацию полученных результатов. С этой точки зрения целесообразно уменьшить количество факторов оптимизации. С учетом особенностей определения скорости резания, этот показатель можно исключить из рассмотрения и, соответственно, из плана эксперимента. Связано это с тем, что скорость резания достаточно жестко привязана к материалу режущей части инструмента и обрабатываемому материалу через их физико-механические свойства, которые в процессе обработки практически не подвержены изменениям. Таким образом, для силы резания можно определить зависимость следующего вида:

$$P_x = f(S; Q; A).$$

Значение составляющей силы резания P_x можно считать основной величиной, определяющей эффективность воздействия ультразвуковых колебаний на процесс механической обработки. Для оценки эффективности ультразвукового воздействия достаточно определить величину P_x , чем меньше P_x , тем выше эффективность. Учитывая сказанное, значение P_x можно определить как параметр оптимизации, характеризующий эффективность ультразвукового воздействия на механическую обработку с переменными параметрами $x_{1(S)}$, $x_{2(Q)}$, $x_{3(A)}$. Параметры x_1 , x_2 , x_3 можно считать координатами некоторого факторного пространства и, как следствие, факторами оптимизации. Функция $f(x_1, x_2, x_3)$ — называется функцией отклика в факторном пространстве, а ее геометрическое изображение в факторном пространстве — поверхностью отклика.

Верификация функции отклика позволит получить выражение для расчета P_x и, следовательно, позволит определить эффективность воздействия ультразвуковых колебаний на процесс резания.

Задача по верификации функции $f(x_i)$ характеризуется тем, что нам не известно в полной мере поведение переменных x_1, x_2, x_3 . Следовательно, мы не можем установить аналитическое выражение функции отклика (f). Поэтому приходится ограничивать представление функции полиномом вида:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (1)$$

где β_0 — свободный член; β_i, β_{ij} — коэффициенты регрессии; x_i, x_j — уровни факторов.

В результате исследования необходимо получить коэффициенты b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} , которые будут представлять собой оценку теоретических коэффициентов. После определения указанных коэффициентов уравнение (1) примет вид:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l}^k b_{ijl} x_i x_j x_l, \quad (2)$$

где \hat{y} — расчетное значение параметра оптимизации (y — выборочная оценка для η).

Выражение (2) можно считать обобщенной полиномиальной моделью составляющей силы резания по оптимизируемому параметру $P_x = \hat{y}$.

После того как выбран параметр оптимизации и сформирована полиномиальная модель, необходимо уточнить независимые переменные (факторы). Необходимо, чтобы они имели количественную оценку (в нашем случае: скорость подачи, объемный расход СОЖ, амплитуда колебаний, т. е. мм/об, л/мин, мкм соответственно).

Поскольку о поведении системы нам не известно ничего, что могло бы указать на вид модели, то следует воспользоваться моделью для $k = 3$:

$$\bar{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (3)$$

По переменным x_1, x_2, x_3 непосредственно проводится исследование, а остальные определяются в результате расчетов. Исходные данные для расчета сведем в таблицу 1.

Таблица 1 — Исходные данные

Независимые переменные(факторы)	нулевой уровень	интервал варьирования
Подача S, x_1 , мм/об	0,3	$\pm 0,1$
Расход СОЖ Q, x_2 , л/мин	3	± 1
Амплитуда ультразвуковых колебаний A, x_3 , мкм.	5,5	$\pm 5,5$

Исследования по верификации функции отклика проводились на оборудовании кафедры Технологии и организации машиностроительного производства ДонГТИ. В итоге были получены значения коэффициентов b_i :

$$b_0 = 438,375; \quad b_1 = 2,380; \quad b_2 = -31,380; \quad b_3 = -61,880;$$

$$b_{12} = 27,630; \quad b_{23} = 15,880; \quad b_{13} = -10,875; \quad b_{123} = -9,125.$$

Полученные коэффициенты требуют проверки значимости. Проверка, выполненная стандартным образом, с использованием критериев Стьюдента, Кохрена и Фишера дала возможность оценить значимость коэффициентов.

Коэффициенты b_i следует считать статистически значимыми, если выполняется неравенство:

$$\Delta b_i < b_i.$$

Таким образом, коэффициенты $b_0, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ являются значимыми, а коэффициент b_1 , является незначимым. Незначимые коэффициенты можно отбросить без пересчета остальных коэффициентов, так как при линейной модели все коэффициенты независимы.

Учитывая результаты выполненных расчетов, уравнение регрессии можно записать в следующем виде:

$$\bar{y} = 438,375 - 31,280x_2 - 61,880x_3 + 27,630x_1x_2 + 15,880x_2x_3 - 10,875x_1x_3 - 9,125x_1x_2x_3. \quad (4)$$

Анализируя полученную модель (4), можно сделать вывод о том, что наиболее значимым фактором, влияющим на осевую составляющую сил резания, при ультразвуковом воздействии является фактор x_3 (амплитуда ультразвуковых колебаний) так как он имеет наибольший коэффициент. Кроме того, зависимость силы P_x от амплитуды колебаний носит обратно пропорциональный характер, т. е. с увеличением амплитуды составляющая сил резания P_x уменьшается. Фактор x_2 , также имеет обратно пропорциональное влияние на оптимизируемый параметр (P_x) т. е. с увеличением значения расхода СОЖ осевая составляющая сил резания снижается.

В производственных условиях данную модель можно использовать в аналитической форме (4). При возможном изменении факторов (например, в ходе технологической подготовки выпуска новой продукции) можно предварительно оперативно оценивать изменения значения силы резания и соотносить их с возможностями технологической системы (инструмент, оснастка, конструктивные особенности детали, технические возможности ультразвукового оборудования и др.).

Список литературы

1. Льюис, К. Д. Методы прогнозирования экономических показателей / К. Д. Льюис. — М. : Финансы и статистика, 1986. — 130 с.
2. Казаков, В. Ю. Планирование и организация эксперимента / В. Ю. Казаков. — Томск : Изд-во ТПУ, 2009. — 127 с.
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю. П. Адлер. — М. : Наука, 1976. — 320 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 628.16.06

Чебан В. Г.
к.т.н., доцент,
Ковалинский Г. Н.
ассистент

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

МЕМБРАННЫЙ АППАРАТ С ПЛОСКИМИ НАПОРНЫМИ КАНАЛАМИ

Одним из факторов, определяющим состояние окружающей среды, являются воды подземных источников, ливневых стоков, коммунальных и промышленных сбросов. Их качество на данном этапе свидетельствует о необходимости принятия радикальных мер по его улучшению. Существующие традиционные технологии очистки воды уже не в достаточной мере выполняют свои функции, поэтому на смену им приходят новые, более прогрессивные технологии. Одной из них является мембранная технология очистки воды.

Мембранная очистка, традиционно называемая тангенциальной, осуществляется в напорных каналах. Одними из них являются плоские напорные каналы постоянной высоты, образованные двумя параллельными поверхностями, как минимум одна из которых проницаемая [1–4]. Среди них особое место занимает плоский напорный канал дискообразной формы [4], образованный двумя плоскими поверхностями, выполненными в виде соосных дисков, как минимум один из которых имеет центральное отверстие.

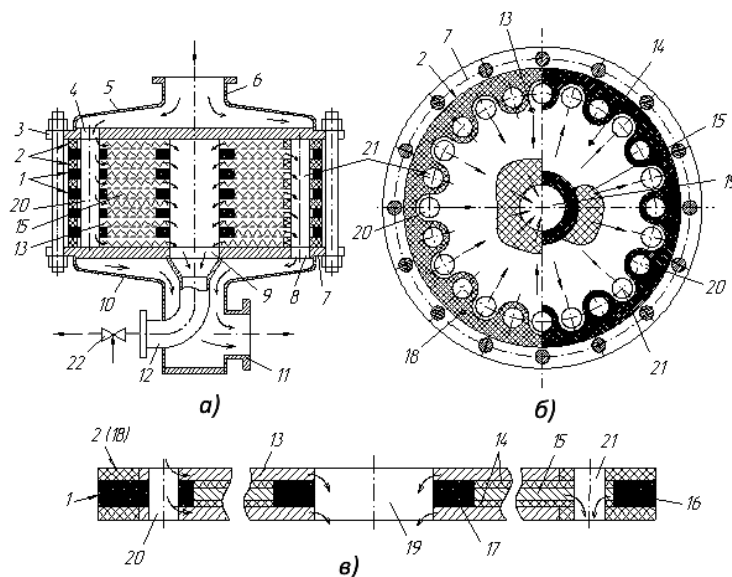
Результаты исследований показали, что с целью повышения эффективности очистки дискообразный напорный канал может быть изготовлен таким образом, чтобы обеспечить в нем постоянную скорость потока жидкости от периферии к центру. В результате этого обеспечивается снижение потерь давления жидкости, достигается постоянная тонкость очистки по всей проницаемой поверхности, снижаются потери жидкости, что повышает производительность очистителя. Объясняется это тем, что в таком канале площадь поперечного сечения линейно уменьшается от периферии к центру, то есть в направлении потока жидкости.

Более детальные исследования показали, что все это возможно лишь в дискообразном напорном канале, в котором имеет место получение преобладающего количества фильтрата над количеством концентрата. Однако при незначительных потерях жидкости на регенерацию проницаемой поверхности этот канал, в сравнении с другими типами каналов, проявляет абсолютно новое свойство, заключающееся в том, что линейное уменьшение площади поперечного сечения канала обеспечивает постепенное увеличение скорости потока жидкости от входа к выходу. Такого нет в других типах напорных каналов для мембранного разделения. В них, как правило, имеет место обратная картина, при которой в канале по ходу потока жидкости скорость ее падает, причем при возрастающей концентрации загрязнения, что является противоречивым для процесса саморегенерации проницаемой поверхности, в ходе которого более логичным является увеличение скорости жидкости в направлении ее движения.

Новое свойство плоского кольцеобразного напорного канала целесообразно использовать в мембранных аппаратах с целью повышения производительности за счет улучшения условий мембранного разделения жидкости. Одним из них может быть и мембранный аппарат для разделения воды на фильтрат и концентрат, представленный на рисунке 1.

Аппарат содержит дисковые кассеты 1 с центральным отверстием и расположенные с обеих их плоских сторон выполненные в виде плоского кольца промежуточные пластины 2. Кассеты 1 и пластины 2 одинакового диаметра и с одинаковыми центральными отверстиями, сложены соосно в стопку и стянуты в пакет. Сделано это с помощью стяжных устройств, верхней крышки 3, имеющей входные отверстия 4 и коллектор 5 разделяемой воды с вход-

ным патрубком 6, и нижней крышки 7, имеющей выходные отверстия 8 и 9, коллектор 10 фильтрата с выходным патрубком 11 и патрубок 12 для вывода концентрата. Каждая промежуточная пластина 2 выполнена в виде турбулизирующей сетки и охватывающего ее опорного кольца, которые образуют закрытый снаружи кольцеобразный напорный канал 13.



а — вертикальный разрез; б — поперечный разрез; в — узел

Рисунок 1 — Мембранный аппарат

Каждая из мембранных кассет 1 выполнена в виде двух полупроницаемых мембран 14 с центральным отверстием, между которыми расположена дренажная сетка с центральным отверстием, образующая кольцеобразный дренажный канал 15 для приема и вывода фильтрата. Центральные отверстия в мембранах и дренажной сетке образуют вместе центральное отверстие в кассете 1, а кольцеобразный дренажный канал 15 является закрытым со стороны периферии и центрального отверстия. Для этого ячейки дренажной сетки вдоль наружного диаметра и вокруг центрального отверстия заполнены герметизирующим материалом, который вместе с ней образуют снаружи опорное кольцо 16, а изнутри — герметизирующее кольцо 17, к которым монолитно присоединены мембраны 14. Опорное кольцо 18 каждой промежуточной пластины 2 также выполнено путем заполнения герметизирующим материалом ячеек турбулизирующей сетки со стороны наружного диаметра. При этом со стороны центрального отверстия опорные или герметизирующие кольца отсутствуют. В пакете опорные кольца 16 и 18 мембранных кассет 1 и промежуточных пластин 2, соответственно, образуют цилиндрическую часть корпуса аппарата, а их центральные отверстия — сливной коллектор 19 для вывода концентрата из всех напорных каналов 13. Кроме того, они выполнены с равномерно расположенными по окружности отверстиями для воды и фильтрата, которые через один и по замкнутой синусоиде окружены упоминаемым материалом в ячейках сеток. В пакете одни из них, например непарные, образуют сквозные коллекторные отверстия 20 для подвода воды через отверстия 4 в крышке 3 от ее коллектора 5 к кольцеобразным напорным каналам 13. Парные же отверстия опорных колец образуют сквозные коллекторные отверстия 21 для вывода фильтрата из дренажных кольцеобразных каналов 15 кассет 1 через отверстия 8 в крышке 7 в коллектор 10. То есть, количество отверстий в мембранных кассетах 1 и промежуточных пластинах 2 в два раза больше, чем их количество в одной из крышек или равно сумме в двух крышках, при этом отверстия 4 в крышке 3 смещены по окружности на один шаг их выполнения относительно отверстий 8 в крышке 7. К тому же, сквозные отверстия 20 в каждой промежуточной пластине 2 охвачены материалом по окружности не полностью и сообщаются с напорным кольцеобразным каналом 13 для подвода воды, а в

кассетах 1 они охвачены ним по окружности полностью и отделены от дренажного канала 15 для вывода фильтрата. Сквозные отверстия 21 для фильтрата в промежуточных пластинах 2 охвачены материалом по окружности полностью и отделены от напорного канала 13, а в кассетах 1 они охвачены материалом частично и сообщаются с кольцеобразным дренажным каналом 15 для приема и вывода фильтрата.

Как отмечалось выше, особенность каждого кольцеобразного напорного канала 13 состоит в том, что площадь его поперечного сечения линейно уменьшается от периферии к центру, то есть в направлении потока разделяемой в нем воды. Из рисунка 1 очевидно и то, что и дренажный канал 16 имеет кольцеобразную форму, а конкретнее форму плоского кольца незначительной толщины. Следовательно, площадь его поперечного сечения увеличивается от центра к периферии, то есть в направлении вывода фильтрата из него.

Более наглядно это демонстрируется работой описанного выше мембранного аппарата для разделения воды на фильтрат и концентрат, которая заключается в подаче под давлением и непрерывным потоком такой воды через патрубок 6 крышки 3 в коллектор 5, откуда она через входные отверстия 4 попадает в сквозные коллекторные отверстия 20 пакета. Из них направляется в многочисленные кольцеобразные напорные каналы 13, в которых движется вдоль мембран 14 в направлении сливного коллектора 19 пакета. Большая часть воды в виде фильтрата проникает через мембраны 14 кассет 1 и попадает в дренажные кольцеобразные каналы 15. Двигаясь в радиальном направлении, он оставляет их через многочисленные коллекторные отверстия 21 пакета, затем через отверстия 8 нижней крышки 7 поступает в ее коллектор 10 и оставляет аппарат через выходной патрубок 11. Меньшая часть воды, концентрация которой увеличивается от входа к выходу напорного канала 13, а количество определяется дросселем 22, в виде концентрата с напорных каналов 13 по сливному коллектору 19 пакета, через отверстие 9 в крышке 7 и по патрубку 11 оставляет аппарат.

Формирование потока разделяемой воды в каждом кольцеобразном напорном канале 13 от его периферии к центру посредством многочисленных периферийных коллекторных отверстий 20 с последующим удалением части ее через центральное отверстие 19 пакета в сравнении с другими известными плоскими каналами обеспечивает более равномерное ее распределение по поверхностям мембран 14 кассет 1. В результате достигается уменьшение числа и площади застойных зон и улучшение условий разделения воды. Кроме того, принятое формирование потока разделяемой воды в каждом напорном канале 13 обеспечивает постепенное возрастание его скорости за счет наличия линейно уменьшающейся площади поперечного сечения канала в том же направлении. Это также значительно улучшает условия разделения, так как, в отличие от других напорных каналов, направление увеличения скорости разделяемой воды совпадает с направлением увеличения ее концентрации. Следствием улучшения условий разделения воды является повышение производительности аппарата.

Список литературы

1. А. с. 1775155 СССР, МКИЗ В01D63/16. Мембранный аппарат / Н. С. Орлов, А. Ш. Шаяхметов, А. Г. Бородин; Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева. — № 4805443/26 ; заявл. 12.02.90 ; опубл. 15.11.92, Бюл. № 42.

2. Пат. 2073555 Российская Федерация, МПК6 В01D63/08. Фильтрационный аппарат / Л. А. Ровинский ; заявитель и патентообладатель Ровинский Л. А. — № 94003076/26 ; заявл. 26.01.94 ; опубл. 20.02.97.

3. Типы мембранных модулей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.files/medmemb14.pdf>.

4. Пат. 2183133 Российская Федерация, МПК6 В01D29/01, 63/08. Устройство для отделения, фильтровальная кассета и опорное кольцо / В. Хенттонен, П. Лейму, М. Суйкки, Я. Паатеро, К. Карльссон, М. Тепплер ; заявитель и патентообладатель ВАЛЬМЕТ-РАЙСИО ОЙ. — № 98118137/12 ; заявл. 26.02.97 ; опубл. 10.06.02.

*Сёмин Д. А.**д.т.н., профессор,**Леваинов А. Н.**старший преподаватель**Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР,**Ковалевский Д. С.**технический директор**ООО «ЮГМК ЛЛМЗ», г. Луганск, ЛНР*

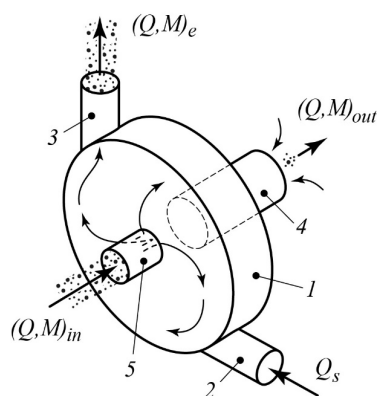
ВИХРЕКАМЕРНЫЕ НАГНЕТАТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

В транспортных и транспортно-технологических системах страны, ее регионов и городов широко используется трубопроводный транспорт. В трубопроводном транспорте в качестве рабочих сред используются жидкости и газы, которые могут быть транспортируемыми средами или выполняют транспортирующую роль в продуктопроводах. Условия работы трубопроводных транспортных систем, как правило, экстремальные. Большие перепады температур, наличие абразивных и химически агрессивных веществ в транспортируемой и окружающей среде, высокая запыленность и влажность многократно снижают надежность элементов оборудования транспортных систем, что приводит к повышенным эксплуатационным затратам, которые достигают 30÷50 % стоимости данного оборудования. В отдельных случаях затраты на остановку производства могут многократно превосходить стоимость транспортной системы в целом [2–4, 6]. Таким образом, вопросы надежности являются ключевыми при проектировании и эксплуатации систем промышленного трубопроводного транспорта.

Одним из основных элементов трубопроводных транспортных систем, влияющих на их надежность и эффективность, являются питатели (нагнетатели). Классические струйные аппараты такие, как прямоточные и вихревые эжекторы, вследствие простоты своей конструкции и отсутствия подвижных рабочих частей обладают высокими показателями надежности, полностью определяющейся механическими свойствами материала, из которых они изготовлены, и практически не зависят от технологии их использования, а также способностью работать на разнообразных жидкостях и газах в широком диапазоне температур и давлений, пожаробезопасностью, нечувствительностью к вибрации, ускорению, ударным нагрузкам и др. Данные аппараты широко используются в качестве питателей (нагнетателей) трубопроводных транспортных систем, но имеют достаточно низкие показатели энергоэффективности по коэффициенту полезного действия, не превышающего 30 % [1].

Улучшить показатели их энергоэффективности можно, используя более совершенные способы передачи энергии в исследуемых струйных устройствах, которыми являются вихрекамерные нагнетатели (ВКН) (рис. 1) [1, 5].

Вихрекамерный нагнетатель работает следующим образом. В тангенциальный канал питания 2 вихревой камеры 1 поступает энергонесущий поток с расходом Q_s . В зависимости от перепада давления на вихревой камере и сопротивления пневмотранспортного трубопровода энергонесущий поток делится на два, одна часть которого через выходной канал 2 с расходом Q_e уходит в пневмотранспортный трубопровод, а другая, двигаясь в дренажный канал 4 от периферии к центру, создает вращательное движение в вихревой камере 1. Вращательное движение сопровождается повышенным давлением на периферии и понижением давления в центральной части вихревой камеры, за счет которого и происходит всасывание транспортируемой среды в канал всасывания 5. Транспортируемая среда попадая во вращательное поле транспортирующего потока в вихревой камере под действием центробежных сил перемещается на ее периферию в область повышенного давления, под действием которого и происходит транспортирование.



1 — вихревая камера; 2 — канал питания; 3 — выходной канал; 4 — дренажный канал; 5 — канал всасывания;
 $Q_s, Q_e, Q_{out}, Q_{in}$ — транспортирующие потоки: питания, выходной, дренажный и всасывания соответственно;
 M_{in}, M_e, M_{out} — транспортируемые потоки сыпучей среды: всасывания, выходной и дренажный соответственно

Рисунок 1 — Схема вихрекамерного нагнетателя

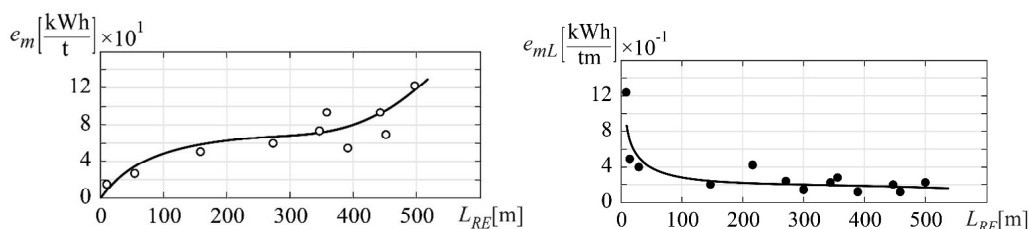


Рисунок 2 — Энергетическая эффективность транспортирования сыпучих грузов с помощью струйных питателей эжекторного типа: (сверху) затраты энергии на транспортирование 1 т груза; (снизу) затраты энергии на транспортирование 1 т груза на 1 м

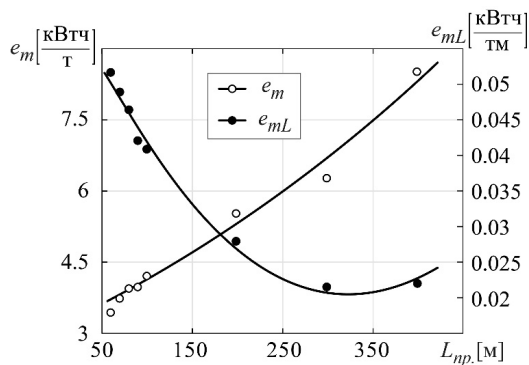


Рисунок 3 — Энергетическая эффективность транспортирования кварцевого песка с помощью питателя вихрекамерного типа

Благодаря комбинированию в рабочем процессе ВКН не только передачи энергии посредством турбулентного обмена, но и действия центробежной силы на частицу транспортируемой среды, перемещаемую в зону повышенного давления на периферии вихревой камеры, можно повысить показатели энергоэффективности, особенно при транспортировании сыпучих сред.

Экспериментальные исследования на модели пневмотранспортной системы с питателем вихрекамерного типа при транспортировании сыпучих грузов показал, что удельные энергозатраты на транспортирование 1 т и 1 т груза на 1 м могут быть кратно меньше по сравнению с пневмотранспортными системами со струйными питателями эжекторного типа (рис. 2 и рис. 3).

Список литературы

1. Роговой, А. С. Совершенствование энергетических характеристик струйных нагнетателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.17 / Роговой Андрей Сергеевич. — Луганск : ВНУ им. В. Даля, 2007. — 193 с.
2. Сьомін, Д. О. Підвищення ефективності переміщення вантажів трубопровідним транспортом засобами струминної арматури : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.12 / Сьомін Дмитро Олександрович. — Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2004. — 381 с.
3. Вихрові виконавчі пристрої : монографія. В 2 ч. Ч. 1. Однорідні робочі середовища / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев та ін. — Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2009. — 256 с.
4. Вихрові виконавчі пристрої : монографія. В 2 ч. Ч. 2. Гетерогенні робочі середовища / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев та ін. — Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2013. — 190 с.
5. Syomin, D. Power characteristics of superchargers with vortex work chamber / D. Syomin, A. Rogovoy // TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. — 2010. — Vol. 10. — P. 232–240.
6. Syomin, D. Vortex mechanical devices in control systems of fluid mediums / D. Syomin, V. Pavljuchenko, Y. Maltsev et al. // TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. — 2010. — Vol. 10. — P. 440-445.

Левченко Э. П.
к.т.н., доцент,
Бойко Н. З.
к.т.н., доцент,
Ткачев Р. Ю.
к.т.н., доцент,
Бойко Е. А.

старший преподаватель

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

УПРАВЛЕНИЕ СЖИМАЮЩИМИ УСИЛИЯМИ НА МАТЕРИАЛ С ЭЛЕМЕНТАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ ТОЛКАТЕЛЕЙ ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Для повышения эффективности дисковых дробильно-измельчительных машин широко используются различные конструктивные приемы усовершенствования их конструкций, при этом одним из подходов является периодическое наложение сжимающих усилий на измельчаемый материал [1]. На сегодняшний день известно два основных способа создания таких условий в рабочей камере машины: механическое сжатие за счет организации качания одного или всех дисков посредством толкателей, как правило кулачкового типа; обеспечение качания дисков с помощью гидро- или пневмоцилиндров или электромагнитных толкателей.

Преимуществом первого способа является простота реализации, но в качестве недостатков выступают низкая надежность конструктивных элементов толкателей и ремонтоспособность, а также существенная инерционность при относительно малой силе создания сжимающих усилий.

Таким образом более перспективным является второй способ, особенно за счет применения гидравлических толкателей в качестве инструмента качания диска, которые позволяют организовать большие силы сжатия материала при работе мельницы (рис. 1).

Поскольку нижний рабочий орган дисковой мельницы совершает колебательное (возвратно-поступательное) движение то вполне очевидно, что золотник также должен совершать колебательное движение определенной частоты и амплитуды. Таким образом, рассмотрим реакцию поршня при синусоидальном перемещении золотника и определим параметры генератора для настройки системы управления [2–4].

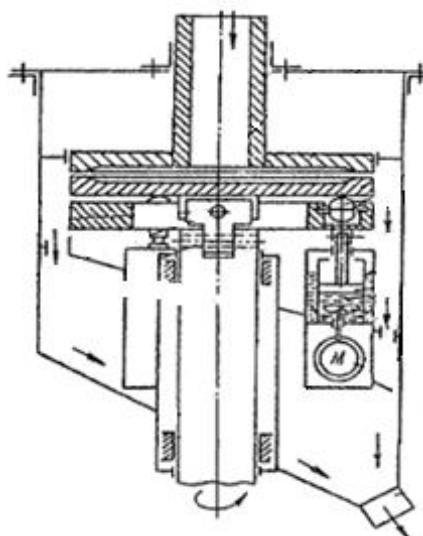


Рисунок 1 — Дисковая машина с гидроприводом качания диска

Изучение движения поршня механизма толкателя описывается уравнением

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[y_{n-1}^* - (-1)^n \frac{k_v x^*}{\omega} \sqrt{1 + (-1)^n \frac{c_n y_{n-1}^*}{p_0 F_n} (1 - \cos(\omega t))} + \frac{c_n}{p_0 F_n} \left(\frac{k_v x^*}{2\omega} \right)^2 (1 - \cos(\omega t))^2 \right], \quad (1)$$

где k_v — крутизна скоростной характеристики холостого хода гидравлического исполнительного механизма с идеальным золотником; c_n — жесткость внешней нагрузки, приведенная к поршню; y — перемещение поршня; p_0 — постоянная сила, действующая на поршень; F_n — эффективная площадь поршня; ω — частота управляющего сигнала; t — время; x^* — амплитуда колебаний золотника.

Полином (1) определяет вынужденный периодический процесс гидравлического исполнительного механизма, нагруженного пропорциональной нагрузкой. Наибольшее отклонение поршня при позиционной нагрузке будет меньше отклонения холостого хода на величину

$$\Delta y_1 = \left(\frac{k_v x^*}{\omega} \right)^2 \cdot \frac{c_n}{p_0 F_n}. \quad (2)$$

Отношение амплитуды перемещения золотника к частоте его колебаний, при котором сила, развиваемая давлением жидкости, уравновесится внешней пропорциональной нагрузкой при наибольшем отклонении поршня.

$$\kappa = \frac{x^*}{\omega} = \frac{p_0 F_n}{k_v c_n}. \quad (3)$$

Таким образом, гидравлический исполнительный механизм дроссельного управления при синусоидальном перемещении золотника и пропорциональной положительной нагрузке будет работать в режиме двигателя лишь при выполнении условия

$$\frac{x^*}{\omega} < \frac{p_0 F_n}{k_v c_n}. \quad (4)$$

Проведя аналогичный анализ для отрицательной пропорциональной нагрузки

$$\frac{x^*}{\omega} < 0,41 \frac{p_0 F_n}{k_v c_n}. \quad (5)$$

При нарушении условия поршень, дойдя до своего максимального отклонения, определяемого сигналом управления, не будет возвращаться к начальному положению, а будет продолжать движение до упора под действием внешней нагрузки. Исполнительный механизм из-за разрыва непрерывности потока жидкости в гидравлическом тракте потеряет управление.

Амплитудно-частотная характеристика исполнительного механизма запишется в виде

$$A(\omega) = \frac{y_{уст}^*}{x^*} = \frac{k_v}{\omega} \left(1 - \frac{c_n k_v}{4 p_0 F_n} \cdot \frac{x^*}{\omega} \right). \quad (6)$$

График амплитудно-частотной характеристики гидропривода измельчителя приведен на рисунке 2. Для давления $p_0 = 205 \text{ кгс/см}^2$; суммарной площади шести цилиндров $F_n = 800 \text{ см}^2$; жесткости приведенной к поршню внешней нагрузки $c_n = 400 \text{ кг/см}$; крутизне скоростной характеристики холостого хода гидравлического исполнительного механизма с идеальным золотником $k_v = 15,5 \text{ с}^{-1}$ при коэффициенте расхода золотника $\mu = 0,6$.

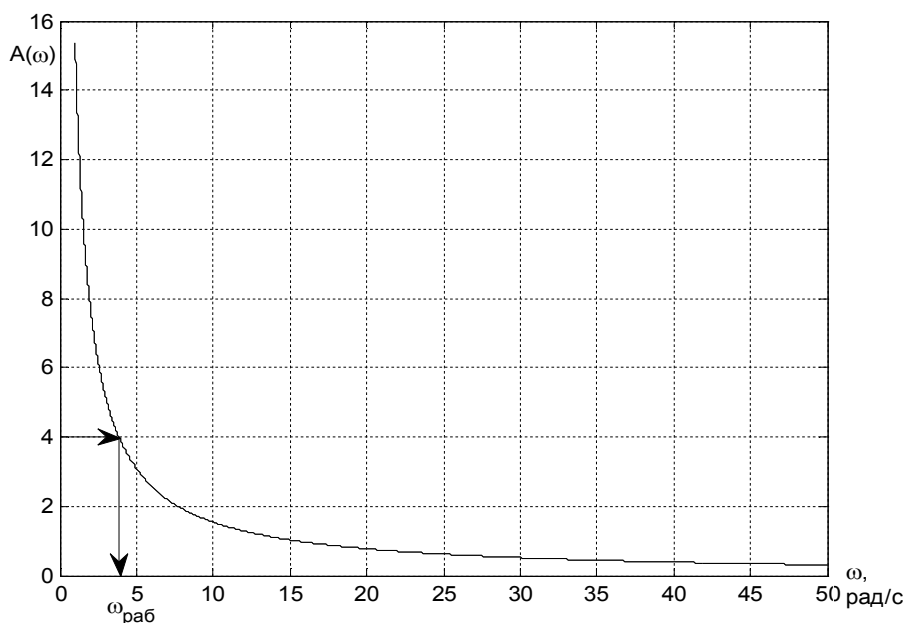


Рисунок 2 — График амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого гидропривода дискового измельчителя

Данная кривая сходна с амплитудно-частотной характеристикой идеального интегрирующего звена и является низкочастотным устройством. Рабочий частотный диапазон составляет от 1 рад/с до 30 рад/с (0,16–4,77 Гц), при этом амплитуда колебаний поршней от 14 до 0,5 мм в зависимости от частоты входного управляющего воздействия. Сдвиг по фазе между движением поршня, нагруженного позиционной упругой нагрузкой и перемещением золотника равен $-\pi/2$ и равен фазовому сдвигу в ненагруженном исполнительном механизме.

Список литературы

1. Левченко, Э. П. Гидравлический механизм повышения эффективности работы дисковой мельницы / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, Н. Г. Алферов // Сб. тезисов докл. международной науч.-тех. конф., посвященной 50-ти летию кафедры «Машины металлургического комплекса» ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО «ДонГТУ», 2016. — С. 26–27.
2. Разработка системы управления для реализации вынужденных колебаний рабочей гарнитуры в дисковой мельнице / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, А. Н. Новохатский и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2018. — Вып. 9 (52). — С. 149–154.
3. Расчет вынужденных периодических движений толкателей дисковой мельницы при пропорциональной нагрузке / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, Е. Е. Бизянов и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2018. — Вып. 11 (54). — С. 136–142.
4. Левченко, Э. П. Некоторые особенности гидравлизации дисковой мельницы истирающе-раздавливающего действия / Э. П. Левченко, В. С. Коваленко // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых : сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 76–78.

*Геммерлинг О. А.
к.т.н., доцент,
Куфаев Д. О.
магистрант*

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОКАЛИНЫ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Проблема очистки поверхностей металлического проката от окалины — сложная производственная задача. В зависимости от успешности реализации способов ее удаления с поверхности металла, напрямую зависит цена готовой продукции металлургического производства.

Существуют различные способы удаления окалины с металла. Наибольшее распространение получили механические, гидравлические и химические способы удаления окалины. Им присущи свои достоинства и недостатки.

В данной работе будем использовать гидроимпульсное удаление окалины — с помощью импульсной струи жидкости высокого давления (20–25 МПа). Основное достоинство импульсной струи жидкости по сравнению со стационарной — это то, что струя выпускается короткими импульсами и следующий импульс воздействует на свободную от воды поверхность металла. По данным многочисленных исследований была подтверждена более высокая разрушающая способность импульсной струи — в 2–3 раза. Также к достоинствам данного способа относятся: снижение удельных энергозатрат, отсутствие вредных для здоровья людей и окружающей среды факторов, высокая безопасность труда и пожаробезопасность. К условным недостаткам гидроимпульсного способа разрушения относятся: относительная сложность изготовления генератора гидроимпульсной струи (необходимо обеспечить высокую точность изготовления подвижных элементов золотниковых клапанов); необходимость периодического технического обслуживания генератора, и в связи с этим, необходимость квалифицированного технического персонала.

Для реализации гидроимпульсного способа удаления окалины необходимо решить ряд задач:

1. Разработка физической и математической моделей взаимодействия гидроимпульсной струи с поверхностью металлической заготовки.
2. Определение необходимого усилия для разрушения окалины гидроимпульсной струей.
3. Расчет рациональных параметров генератора гидроимпульсной струи.
4. Проектирование исполнительного органа с насадками для разрушения окалины.
5. Проведение экспериментальных исследований на натуральных образцах металлического проката.

В качестве устройства для создания импульсной струи жидкости будет использоваться генератор импульсной струи [1], разработанный и успешно использованный для разрушения угля на шахтах Донбасса [2–4]. Генератор импульсной струи предназначен для преобразования стационарного малорасходного потока рабочей жидкости ($5\text{--}5,5 \text{ м}^3/\text{ч}$) высокого давления (28–32 МПа) в импульсный поток с мгновенным расходом $60\text{--}90 \text{ м}^3/\text{ч}$ и давлением 24–28 МПа. Мощность потока в период выстрела воды составляет около 500–700 кВт при том, что потребляемая мощность насоса 55 кВт. Большая мощность потока обеспечивает значительную разрушающую способность струи.

В данном исследовании определены следующие параметры гидроимпульсной установки для разрушения окалины: необходимое давление на выходе генератора импульсной струи $P_{\text{ген}}$; величина снижения давления при преодолении струей определенного расстояния между насадками и металлической заготовкой (прокатом) ΔP ; рациональная частота импульсов генератора f ; скорость перемещения насадков установки относительно металла (или оборот) $v_{\text{стр}}$; диаметр насадка $d_{\text{н}}$; количество и схема расположения насадков в пространстве.

Список литературы

1. Пат. 6173. Украина, МКИ E21C45/00. Гидроимпульсное устройство / Тимошенко Г. М., Гулин В. В., Тимошенко В. Г., Селивра С. А. ; заявитель и патентообладатель Донецк. политехн. ин-т. — № 94270971 ; заявл. 10.06.93 ; опубл. 29.12.1994, Бюл. № 8–1.
2. Гулин, В. В. Новый способ разрушения угольного массива / В. В. Гулин, В. С. Коломиец // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: горно-электромеханическая. — Донецк : ДонНТУ, 2002. — Вып. 51. — С. 69–74.
3. Бойко, Н. Г. Определение рациональных параметров разрушения угля импульсной струей жидкости / Н. Г. Бойко, В. С. Коломиец, О. А. Геммерлинг // Промышленная гидравлика и пневматика: всеукраинский научно-технический журнал. — 2009. — № 3 (25). — С. 12–14.
4. Геммерлинг, О. А. Установление закономерностей разрушения угольного массива импульсной струей жидкости // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: горно-электромеханическая. — Донецк : ДонНТУ, 2004. — Вып. 83. — С. 64–70.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АСПИРАЦИИ ЛИТЕЙНОГО ДВОРА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Острой проблемой доменного производства остается значительный уровень пылегазовыделений на литейном дворе. В основном пыль и газы выделяются от леток чугуна и шлака, желобов участков слива и ковшей. Проведенные исследования [1] показали, что на процесс образования выбросов вредных веществ на литейном дворе доменной печи большое влияние оказывают: площадь поверхности испарения расплава; скорость слива металла; скорость выгорания кремния на границе металл-газ; температура испарения металла, которая в свою очередь зависит от содержания примесей в чугуне. Повышение содержания кремния в чугуне приводит к увеличению температуры экзотермических реакций на поверхности расплава и резко активизирует процесс образования пыли.

Эффективным способом пылеподавления при сливах металла и предотвращения развития экзотермических окислительных реакций на поверхности расплава является нейтрализация окислительного компонента в газовой фазе над поверхностью металла. Этого можно достичь путем подачи инертного газа на струю металла или в приемный ковш. В качестве инертного газа, позволяющего предотвратить контакт металла с кислородом воздуха, можно использовать азот, углекислый газ, дымовые газы от сжигания доменного газа. Полное подавление выбросов токсичных газов и пыли при сливе чугуна и шлака может быть обеспечено применением специальных укрытий с отводом образующихся газов на очистку.

Существенно уменьшить неорганизованные выбросы на территории литейного двора доменной печи можно путем применения аспирационной установки, обеспечивающей отведение вредных газов и пыли из мест их выделения (от леток, мест слива чугуна и шлака) с последующим направлением улавливаемых газов в пылегазоочистные установки [2, 3]. Принципиальная схема аспирационной системы литейного двора доменной печи представлена на рисунке 1.

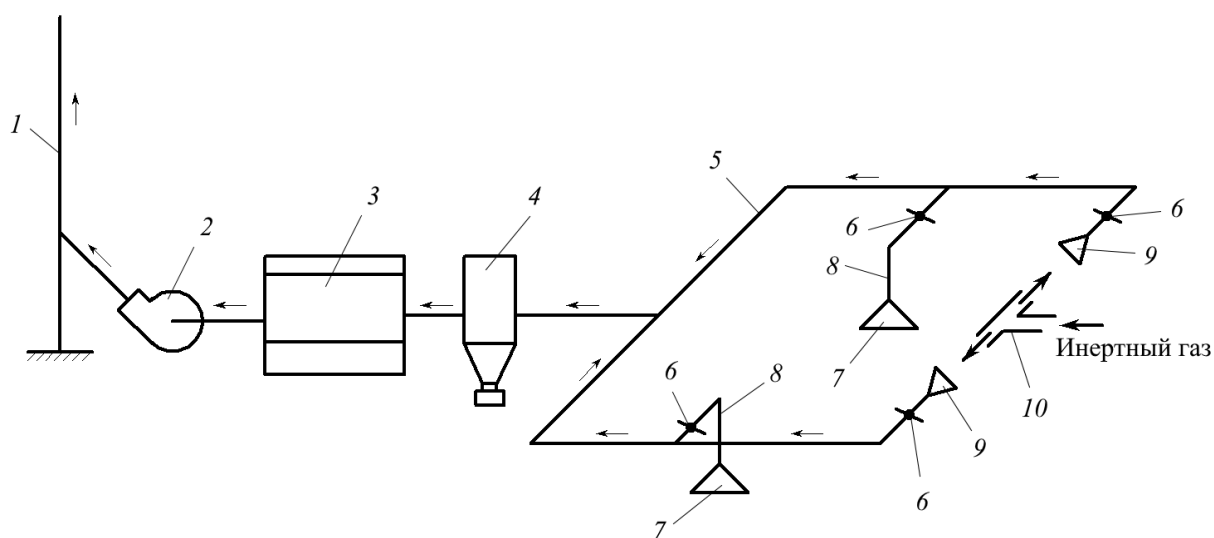


Рисунок 1 — Схема аспирационной системы литейного двора доменной печи

Система аспирации содержит: промышленную вентиляционную трубу с факельным выбросом 1, дымосос с системой автоматического регулирования 2, фильтры тонкой 3 и грубой 4 очистки аспирационных выбросов, вентиляционные газоотводы 5, дроссель-клапаны 6 для регулирования системы в зависимости от фазы выпуска чугуна и шлака, зонты 7 над местами слива чугуна и шлака, установленные на периферийных газоходах 8, местные боковые улавливатели газов от чугунной и шлаковой леток 9, направляющее устройство для потока инертного газа 10.

Зонты 7 над местами слива чугуна и шлака могут быть изготовлены из листового металла и оснащены открывающимися смотровыми окнами для контроля процесса заполнения ковшей. В зоне леток использование зонтов и козырьков не представляется возможным из-за работы механизмов, обслуживающих летки, поэтому для аспирации пылевыделений используются боковые местные улавливатели газов 9 в виде раструбов, которые располагаются вблизи от чугунной и шлаковой леток.

В предлагаемой нами системе аспирации (рис. 1), в отличие от [3], для обеспечения эффективного пылеподавления предлагается подавать в направлениях к чугунной и шлаковой леткам инертный газ при помощи направляющего устройства 10, за счет чего будет обеспечена нейтрализация окислительного компонента и предотвращено взаимодействие кислорода воздуха с поверхностью расплава, тем самым будет существенно снижено пылеобразование. Подачу инертного газа следует производить в зависимости от фазы выпуска чугуна и шлака. Кроме того, в предложенной схеме аспирации потоки инертного газа смещают образующиеся над расплавом частицы пыли в направлении к приемным устройствам местных боковых улавливателей, образуя устойчивый поток пылевидных частиц. В связи с тем, что расход воздуха аспирационной системы для работы местных улавливателей в значительной степени зависит от расстояния от них до источника пылевыделения, приближение зоны захвата пылевых частиц к местным улавливателям позволяет существенно уменьшить расход и энергопотребление системы аспирации.

Таким образом в предлагаемой схеме подача инертного газа в зону дымообразования на поверхность расплава обеспечивает своеобразное «укрытие», отделяющее расплав от кислорода воздуха и предотвращающее окисление металла. Это технологическое решение позволит: существенно снизить пылевыделение в зоне леток доменной печи; повысить экологическую безопасность для работающего персонала литейного двора; снизить пылевую нагрузку на установку пылеулавливания; уменьшить абразивный износ воздухопроводов (газоходов); снизить энергозатраты процесса аспирации, а также позволит использовать дымососы с меньшей установленной мощностью приводных электродвигателей. При этом целесообразно в качестве инертного газа использовать отбросный азот — побочный продукт получения кислорода в кислородных цехах металлургических заводов.

Список литературы

1. Харлашин, П. С. Математическая модель жизненного цикла стали как фактор оптимизации металлургического производства с целью улучшения экологических показателей / П. С. Харлашин, И. В. Буторина, А. В. Бендич // Вестник ПГТУ. Серия: Тех. науки. — 2012. — Вып. 24. — С. 25–37.
2. Литвиненко, А. В. Модернизация систем аспирации литейных дворов доменной печи / А. В. Литвиненко // Экология и промышленность. — 2014. — Вып. 1 (38). — С. 18–24.
3. Пат. № 2705753 С1 Российская Федерация, МПК С21В 7/22 (2006.01). Система аспирации литейного двора доменной печи / В. В. Капнин, С. М. Яковлев, Р. С. Мухаметдинов, К. В. Кулиш, Е. А. Балаева ; заявитель и патентообладатель ПАО «Челябинский металлургический комбинат». — № 2019109996 ; заявл. 04.04.19 ; опубл. 11.11.19. — 10 с.

*Сёмин Д. А.
д.т.н., профессор,
Левашов А. Н.
старший преподаватель,
Михайличенко А. А.
аспирант*

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОТСАДОЧНЫХ МАШИН

Одним из способов обогащения углей и руд является гравитационное обогащение, основанное на разделении исходного материала на минеральные примеси и обогащаемый материал за счет разницы плотностей компонентов. В качестве основного технологического аппарата для гравитационного обогащения на углеобогатительных фабриках применяются отсадочные машины [1–3].

В отсадочных машинах с пневматическим приводом для получения колебательных движений воды используют пульсаторы различных конструкций, основная задача которых попеременно впускать и выпускать воздух в воздушные отделения.

Поскольку пульсаторы представляют собой один из наиболее ответственных узлов отсадочной машины, обеспечивающих рабочий цикл, они в значительной степени влияют на качество процесса обогащения и поэтому постоянно подвергаются совершенствованию.

Основными задачами, решаемыми при модернизации пульсаторов, являются повышение их надежности и долговечности, улучшение характеристик, а также расширение их функциональных возможностей с целью регулирования процесса обогащения.

Использование элементов струйной техники для управления силовыми потоками текучих сред позволяет решить указанные задачи.

Промышленное применение вихревых клапанов в качестве базового элемента пульсаторов, вследствие отсутствия в них подвижных трущихся частей, позволило существенно повысить их надежность и долговечность по отношению к механическим [1, 3]. Вместе с тем, затраты воздуха и мощности на управление клапанами пульсатора по отношению к общим затратам на привод составляют значительную величину порядка 15 %, снижение которых определяет актуальную научную задачу.

Одним из путей повышения эффективности вихревых пульсаторов является снижение гидравлического сопротивления их проточной части, которое оценивается коэффициентом расхода. При этом пропорционально его увеличению снижаются затраты среды и мощности на запирающие вихревые клапаны входящих в состав пульсатора.

В наших предшествующих исследованиях установлены взаимосвязи между характеристиками вихревых клапанов и их конструктивными особенностями [4]. С учетом полученных данных, была разработана конструкция вихревого пульсатора, который состоит из двух симметрично расположенных вихревых клапанов с радиальными каналами питания, двусторонним выходом и установленными на выходе радиальными диффузорами (ВКР-2ДР). Коэффициент расхода вихревых клапанов типа ВКР-2ДР входящих в конструкцию модернизированного пульсатора в 1,8 раза выше, чем у вихревого пульсатора базовой конструкции. Таким образом расход и мощность на его управление уменьшаются пропорционально.

Для проверки работоспособности отсадочной машины с модернизированным пульсатором предложенной конструкции, была изготовлена её физическая модель масштабом 1:10 и реализован процесс отсадки в соответствии с параметрами, определяемыми на основе критериев моделирования [5].

Эффективность привода на основе модернизированного пульсатора в натуральных условиях оценивалась путём математического моделирования совместной работы привода и отсадочной машины.

В результате установлено, что вихревой пульсатор предложенной конструкции обеспечивает эффективный процесс разделения фракций в широком диапазоне его основных параметров и обеспечивает 15 % экономии энергии.

Список литературы

1. Вихрові виконавчі пристрої. В 2-х ч. Ч. 2. Однорідні робочі середовища : монографія / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев та ін. — Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. — 256 с.
2. Семин, Д. А. Исследование вихревых усилителей с диффузорами различных типов / Д. А. Семин, В. А. Павлюченко, Я. И. Мальцев // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. — 2002. — Том 2. — Вып. 42. — С. 54–56.
3. Сьомін, Д. О. Підвищення ефективності переміщення вантажів трубопровідним транспортом засобами струминної арматури : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.12 / Східноукраїнський національний ун-т ім. В. Даля. — Луганськ, 2004. — 381 с.
4. Семин, Д. А. Экспериментальные исследования рабочих характеристик вихревых клапанов различных модификаций / Д. А. Семин, Я. Н. Левашов, А. Н. Левашов // Вестник ЛНУ. — 2019. — № 11 (29). — С. 113–118.
5. Самылин, Н. А. Отсадка / Н. А. Самылин, А. А. Золотко, В. В. Починок — М. : Недра, 1976. — 320 с.

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ МИКРОСТРУКТУРНОЙ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ ГРАНИЦАМИ

Применение в науке и практике жидкостей с микроструктурой достаточно полно описано в [1]. Современные требования прикладных вопросов, связанных с использованием жидких сред с микроструктурой, диктуют необходимость теоретических исследований процессов теплопереноса.

Конвективные течения в жидкостях и газах, возникающие в поле тяжести из-за неоднородности температуры, при ее увеличении становятся неустойчивыми и приводят к турбулентности. К комбинированным конвективным течениям относят [2] суперпозицию конвективного течения и вынужденного течения, вызванного различными внешними воздействиями: градиентом давления, движением границ, вибрацией, вдуванием и отсосом через проницаемые границы и др.

Рассматривается течение микрополярной жидкости (МПЖ) в вертикальном слое между параллельными плоскостями $x = \mp h$ с температурами $T = \mp \Theta$. Границы слоя проницаемы: на плоскости $x = -h$ происходит однородное вдувание жидкости со скоростью U_0 , на плоскости $x = +h$ жидкость отсасывается с той же скоростью (рис. 1). На границах канала вертикальная составляющая скорости и скорость микровращения [1] принимаются равными нулю, а канал считается замкнутым сверху и снизу.

Задача имеет стационарное решение, в котором поперечная скорость $V_{0X}(x) = U_0$, продольная скорость $V_{0Z} = V_0(x)$, скорость микровращения $v_{0Y} = v_0(x)$, температура $T = T_0(x)$ и давление $p = p_0(z)$ находятся из уравнений

$$(1 + \varepsilon) \frac{d^2 V_0}{dx_1^2} + \frac{P_e}{P_r} \frac{dV_0}{dx_1} + \varepsilon \frac{dv_0}{dx} + T_0 \approx \frac{dp_0}{dz} = C, \quad (1)$$

$$\bar{\gamma} \frac{d^2 v_0}{dx^2} - \frac{2\bar{\gamma}}{(2 + \varepsilon)} \frac{P_e}{P_r} \frac{dv_0}{dx} - 2\varepsilon v_0 - 2\varepsilon \frac{dV_0}{dx} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 T_0}{dx^2} - P_e \frac{dT_0}{dx} = 0, \quad (3)$$

где P_r — число Прандтля; P_e — число Пекле (безразмерный параметр вдувания); G_r — число Грасгофа; $V_{0X} = \frac{P_e}{G_r P_r}$ — безразмерная скорость поперечного движения; $\varepsilon = \frac{k}{\mu}$ — вращательная вязкость; $\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{\mu h^2}$ (далее в записи черту над γ опускаем) и параметр j принят [1] как $j = \frac{2\gamma}{(\mu + 2k)}$.

В качестве единиц расстояния, времени, скорости, скорости микровращения, температуры и давления приняты соответственно h , $\rho h^2 / \mu$, $\rho h / \mu$, Θ , $\rho g \beta \Theta h^2 / \mu$, $\rho g \beta \Theta h$. Граничные условия для уравнений (1–3) и условие замкнутости потока запишутся в виде

$$V_0(\mp 1) = 0, v_0(\mp 1) = 0, T_0(\mp 1) = \mp 1, \int_{-1}^{+1} V_0(x) dx = 0. \quad (4)$$

Стационарное распределение температуры описывается нелинейной функцией

$$T_0 = \frac{\exp(P_e x) - \cosh(P_e)}{\sinh(P_e)}. \quad (5)$$

Уравнения (1), (2) сводятся к неоднородному дифференциальному уравнению третьего порядка вида

$$av_0''' + bv_0'' + cv_0' + d = C - T_0, \quad (6)$$

где коэффициенты a, b, c, d являются известными функциями параметров $f(P_e, R_e, \varepsilon, \gamma)$;

отношение $R_e = \frac{P_e}{P_r}$ есть число Рейнольдса, определенное по скорости вдувания.

Функции скорости микровращения $v_0(x)$ и продольной скорости $V_0(x)$ определялись для следующих значений: $P_e = 3, P_r = 2$; 1) $\varepsilon = 0,1, \gamma = 0,1$; 2) $\varepsilon = 0,05, \gamma = 0,1$; 3) $\varepsilon = 0,1, \gamma = 0,5$; 4) $\varepsilon = 0,1, \gamma = 1$.

Профили температуры и вертикальной скорости представлены на рисунках 1 и 2.

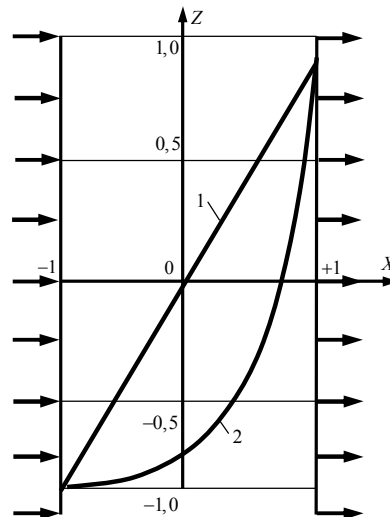


Рисунок 1 — Профили температуры: 1 — $P_e = 0$; 2 — $P_e = 3$

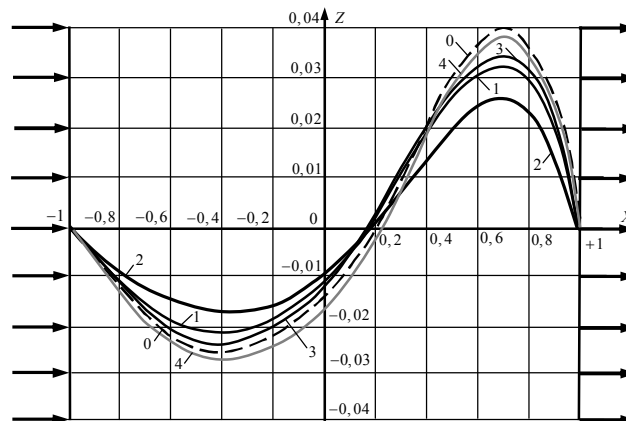


Рисунок 2 — Профили продольной скорости V_0 для значений $P_r = 2, P_e = 3$; 0 — $\varepsilon = 0, \gamma = 0$; 1 — $\varepsilon = 0,1, \gamma = 0,1$; 2 — $\varepsilon = 0,05, \gamma = 0,1$; 3 — $\varepsilon = 0,1, \gamma = 0,5$; 4 — $\varepsilon = 0,1, \gamma = 1$

Выводы:

1. На деформацию профиля продольной скорости, приводящую к формированию пограничных слоев [2] за счет нелинейности температуры и «сдувания» поперечным потоком, оказывают теперь влияние параметры МПЖ: вращательная вязкость k , коэффициент моментных напряжений γ и момент микроинерции j .

2. Частицы МПЖ в восходящем потоке имеют меньшую линейную скорость, чем находящиеся в тех же точках сечения слоя микроэлементы объема ньютоновской жидкости.

3. Зона разделения восходящего и нисходящего потоков зависит от соотношений между параметрами МПЖ. Так при $\varepsilon = 0,1$, $\gamma = 1$ зона восходящего потока сужается, а максимальная скорость в нисходящем потоке выше, чем в ньютоновской жидкости. Причиной такого свойства является влияние микроинерции структуры МПЖ.

4. При рассмотрении проблемы устойчивости найденного течения МПЖ методы, используемые в [2, 3], приводят к выводу, что наиболее опасными являются плоские возмущения.

Список литературы

1. Мигун, Н. П. Гидродинамика и теплообмен течений микроструктурной жидкости / Н. П. Мигун, П. П. Прохоренко. — Минск : Наука и техника, 1984. — 264 с.
2. Гершуни, Г. З. Устойчивость конвективных течений / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий, А. А. Непомнящий. — М. : Наука, 1989. — 320 с.
3. Listrov, A. T. On three — dimensional disturbances of convective microfluids flows / A. T. Listrov, V. I. Rubegzhansky // Lett. In Appl. and Eng. Sci., 1975. — Vol. 3. — No. 2. — P. 119–124.

О ВЛИЯНИИ ТРЕХФАКТОРНОГО ПАРАМЕТРА НА СКЗ ВИБРОУСКОРЕНИЕ ПРИ РАБОТЕ ГЕРМЕТИЧНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА

Задача повышения надежности и долговечности холодильного модуля пищевой промышленности, решается созданием принципиально новых моделей компрессорных агрегатов, а именно вертикальных герметичных винтовых компрессоров [1].

Применение герметичных вертикальных винтовых компрессоров позволяет, за счет своей конструктивной особенности, полностью отделить компрессорное масло от парагазовой смеси в рабочем объеме сжатия. Кроме того, данная конструкция обеспечивает более точную отцентровку винтовой пары в процессе сборки агрегата.

Вертикальный герметичный винтовой компрессор представлен на рисунке 1.

Установлено, что наиболее перспективным методом диагностики технического состояния герметичных вертикальных винтовых компрессоров является вибрационный метод [2].

Затухание вибрационного сигнала и определение фиксированных точек измерения вибрации требуют разработки индивидуального алгоритма диагностирования. Этот алгоритм должен включать решение вопросов:

- оценки технического состояния по общему уровню вибрации на основе моделирования развития повреждений;
- распознавания технического состояния по спектральным картинкам при потере масляного слоя между винтовой парой;
- учёт степени затухания вибрационного сигнала на информационных частотах в местах возможных повреждений.

На рисунке 2 предложена схема прохождения вибрационного сигнала от возможных источников ее возникновения.



Рисунок 1 — Вертикальный герметичный винтовой компрессор ACDX310R-SPN1

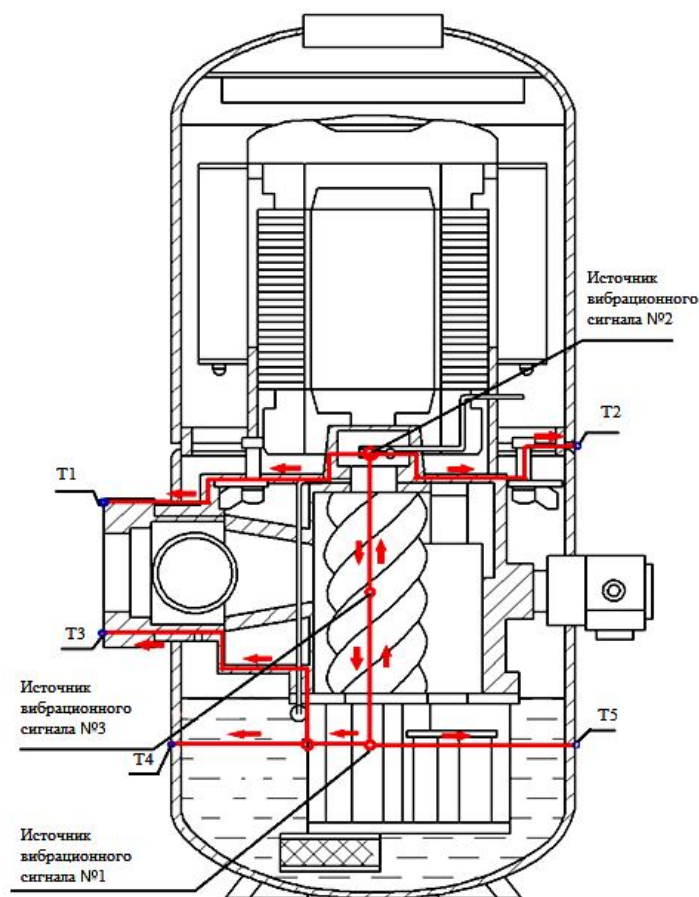


Рисунок 2 — Схема прохождения вибрационного сигнала

Источником вибрационного сигнала № 1 и № 2, являются подшипниковые узлы, сигнал которых проходит по жестко закрепленным конструкциям на корпус компрессора. Нарушение режима подачи смазки и отсутствие масляной пленки между роторами винтового компрессора приводит к схватыванию винтовых пар и появлению трения между роторами, что в свою очередь приводит к появлению вибрационного сигнала № 3. Фиксируемые точки измерения вибрационного сигнала T1, T2, T3 определяются в зависимости от пути прохождения сигнала и жесткости места установки датчика. Точки T4 и T5 принимают вибрационный сигнал от источника № 3, с учетом того, что на процесс затухания вибрационного сигнала начинает влиять масло в масляной ванне, которое до момента выхода на режим винтового компрессора, будет постоянно изменять свои теплофизические параметры.

Для определения степени затухания вибрационного сигнала от источника № 1 проходящего через масляную ванну, до контрольно-измерительных точек T4 и T5 был разработан экспериментальный стенд, который представлен на рисунке 3.

Разработанный стенд представляет собой цилиндрическую емкость, выполненную из оцинковочного металла высотой 0,4 м, и диаметром 0,15 м. Для повышения сопротивления теплопередачи нагретого масла с окружающей средой, емкость была утеплена самоклеющимся фольгированным пенофолом, толщиной теплоизоляционного слоя 0,005 м. Нижняя часть цилиндрической емкости имеет место для установки пьезоэлектрического вибропреобразователя AP40-01.

Емкость была заполнена минеральным компрессорным маслом VG-100, которое соответствует международным классификациям масел ISO VG DIN 51506. Компрессорное масло VG-100 относится к минеральным маслам и имеет широкую область применения при работе одноступенчатых и многоступенчатых поршневых компрессоров, а также винтовых компрессоров открытого и полугерметичного типа с рабочей температурой до 200 °С.

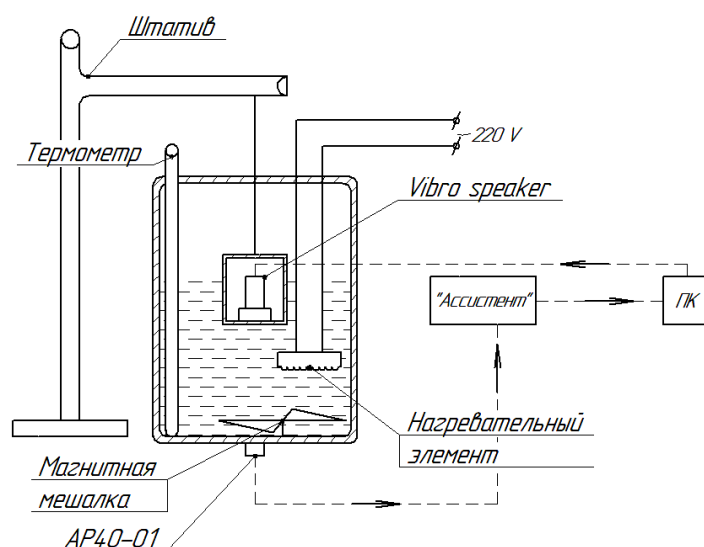


Рисунок 3 — Экспериментальный стенд для определения СКЗ виброускорения, проходящего через масляную ванну

Имитация вибрационного сигнала осуществляется с помощью Vibro speaker в частотном диапазоне 10–2523 Гц. Температура минерального компрессорного масла варьировалась в диапазоне 17,05–93,51 °С. Расстояние от источника вибрационного сигнала до основания оцинкованной емкости, где был установлен пьезоэлектрический вибропреобразователь AP40-01, изменялось в диапазоне 0,1–0,336 м.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран статистический метод Бокса — Уилсона с планом типа 2^3 . Уровни факторов и интервалы варьирования заданными параметрами приведены в таблице 1.

Результаты проведенных исследований приведены в таблице 2.

Проведем кодирование задействованных факторов z_1 , z_2 , z_3 , приведенных в таблице 3.

Таблица 1 — Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни		Факторы		
		Температура компрессорного масла, z_1 , °С	Частота воспроизведения вибрационного сигнала, z_2 , Гц	Расстояние от источника вибрации до вибропреобразователя, z_3 , м
Центральный	0	40,0	1000	0,15
Верхний	+1	55,0	1500	0,20
Нижний	-1	25,0	500	0,10

Таблица 2 — Результаты проведенных исследований

Значение фактора	Факторы			Результаты		
	z_1 , °С	z_2 , Гц	z_3 , м	$y_{1вых}$, м/с^2	$y_{2вых}$, м/с^2	$y_{3вых}$, м/с^2
1	55	1500	0,20	0,0045	0,0043	0,00465
2	25	1500	0,20	0,0105	0,0100	0,01080
3	55	500	0,20	0,1183	0,1120	0,12000
4	25	500	0,20	0,0807	0,0750	0,08100
5	55	1500	0,10	0,0072	0,0069	0,00700
6	25	1500	0,10	0,0052	0,0045	0,00470
7	55	500	0,10	0,1133	0,1160	0,11600
8	25	500	0,10	0,1895	0,1700	0,17700

Таблица 3 — Кодирование факторов варьирования

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
z_1	25	55	40	15
z_2	500	1500	1000	500
z_3	0,10	0,20	0,15	0,05
$x_1 = (z_1 - 40) / 15 ; x_2 = (z_2 - 1000) / 500 ; x_3 = (z_3 - 0,15) / 0,05$				

Обработка экспериментальных данных проходила с помощью статистического метода Бокса-Уилсона с планом типа 2^3 [3] результатом которой, является уравнение регрессии в кодированных переменных

$$y_{\text{вых}} = 0,0645 - 0,037x_1 - 0,0578x_2 - 0,0119x_3 + 0,0116x_1x_3 + 0,0126x_2x_3 - 0,0137x_1x_2x_3. \quad (1)$$

Анализ уравнения позволяет сделать ряд выводов. Наибольшее влияние на вибрационный сигнал, проходящий через компрессорное масло, оказывает x_2 частота его воспроизводимости и x_3 — расстояние пройденное сигналом от источника до места установки пьезоэлектрического преобразователя. Значение температуры масла, во время работы компрессорного агрегата оказывает несущественное влияние. Увеличение вибрационного сигнала происходит при уменьшении факторов x_1, x_2, x_3 .

Список литературы

1. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. — Введ. 2003-09-01. — М. : Изд-во стандартов, 2002. — 28 с.
2. Обзор методов вибрационного диагностирования винтовых компрессоров = Review of methods for vibration diagnostics of screw compressor / В. А. Сидоров, М. А. Пундик, В. В. Карнаух, Д. К. Кулешов // Вестник Международной академии холода. — 2019. — № 3. — С. 29–37.
3. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии : учеб. пособ. для химико-техн. вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. — М. : Высшая школа, 1978. — 319 с.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДА ДЛЯ МАЛОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Для изготовления большого ассортимента строительных и отделочных материалов (тротуарной плитки, композитных блоков, малых архитектурных форм, подоконников и т. д.) широко применяют вибростолы. Общий вид вибростола представлен на рисунке 1.

Вибростол состоит из специального подвижного стола с вибратором и панели управления. Все детали конструкции тщательно закреплены на станине. Виброизоляцией между рамой и площадкой вибростола служат специальные пружины большого диаметра, которые имеют винтовые зажимы. Использование винтовых зажимов силовых пружин вместе с виброплощадкой позволяет полностью исключить соударение металлических частей изделия, что в значительной степени снижает уровень шумового фона.

Самым главным показателем качества работы вибростола является равномерность вибрации рабочей поверхности. С помощью равномерной, не слишком сильной вибрации достигается правильное распределение и повышение плотности материала, в результате которых создается качественный во всех смыслах конечный продукт. При изготовлении бетонных изделий важно установить правильную амплитуду колебаний.

Источник вибраций в конструкции вибростола — так называемый эксцентрик. Благодаря совершению быстрых вращательных движений стол начинает вибрировать.

Перспективным направлением развития вибростолов является применение гидропривода для создания вынужденных колебаний. Применение гидропривода позволит получить вибростол со строго заданными параметрами вибрации — амплитудой и частотой вибрации. Именно эти показатели влияют на качество и долговечность получаемого изделия.

Применение гидропривода при изготовлении вибростолов ограничивается отсутствием апробированных гидравлических схем. Разработка универсальной гидравлической схемы, обеспечивающей работу вибростола с необходимыми параметрами, позволит сделать серьезный шаг по переходу от электрических вибраторов к гидравлическим.

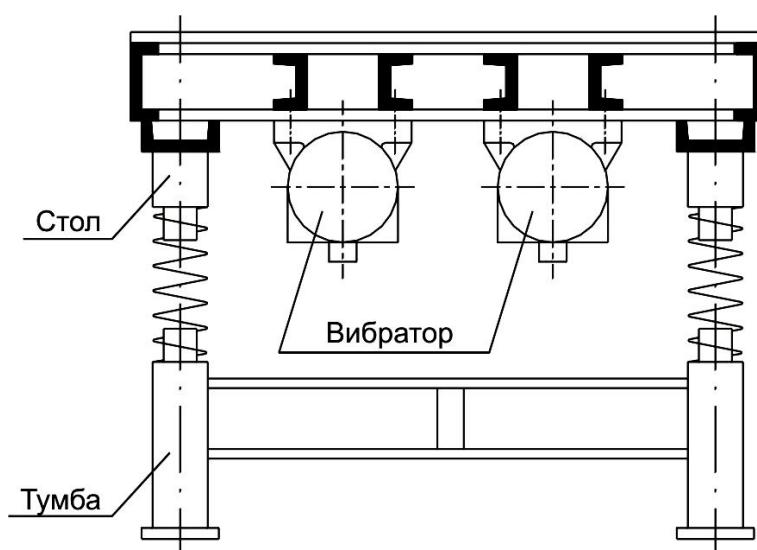


Рисунок 1 — Вибростол. Общий вид

Преимущества вибростола состоят в том, что за счет амортизирующих пружин чаще с раствором передается незначительная вибрация. За счет этой вибрации из бетона в чаше естественным путем удаляются все примеси воздуха. Это обеспечивает высокую прочность готовым железобетонным изделиям, продлевает их срок полезной эксплуатации.

Применение вибрирования позволяет применять более жесткие смеси, чем при ручном уплотнении. Практически могут быть обработаны чрезвычайно сухие и жесткие смеси, так что бетон требуемой прочности может быть получен при меньшем расходе цемента.

Улучшенная вибрация позволит получить более высокую плотность бетона, что приведет к значительному увеличению долговечности продукции и улучшению внешнего вида конечного изделия.

Исходные данные для проектирования гидропривода вибростола:

- средняя нагрузка вибростола m , кг;
- амплитуда колебаний Δ , мм;
- частота колебаний вибростола f , мин^{-1} ;
- время работы вибростола T , мин.

Определим основные параметры работы вибростола:

- продолжительность одного колебания вибростола:

$$t_1 = 1 / f, \text{ с}; \quad (1)$$

- продолжительность одного полупериода колебания вибростола:

$$t_{0,5} = t_1 / 2, \text{ с}; \quad (2)$$

- средняя скорость перемещения вибростола (при линейном изменении скорости):

$$u_{cp} = (u_n + u_k) / 2 = u_k / 2, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где $u_n = 0$ — начальная скорость перемещения вибростола; u_k — конечная скорость перемещения вибростола;

- максимальное горизонтальное смещение вибростола:

$$h_0 = u_{cp} \times t_{0,5} = u_k \times t_{0,5} / 2, \text{ м}. \quad (4)$$

Из (4) можно определить конечную скорость перемещения вибростола:

$$u_k = 2 \times h_0 / t_{0,5}, \text{ м/с}. \quad (5)$$

Необходимое ускорение вибростола:

$$a = (u_k - u_n) / t_{0,5} = u_k / t_{0,5}, \text{ м/с}^2. \quad (6)$$

Расчетное усилие гидроцилиндра (при отсутствии статической нагрузки):

$$F'_{cy} = m \times a, \text{ Н}. \quad (7)$$

Для возвратного хода вибростола будем использовать тарельчатые пружины [1].

Так как усилие, создаваемое пружинами, зависит от величины их деформации, то в конце хода усилие пружин будет равно нулю. Тогда для обеспечения необходимой продолжительности полупериода колебания усилие пружин должно быть в два раза больше.

Полное расчетное усилие силового гидроцилиндра:

$$F'_{cy} = c \times x + m \times a, \text{ Н}. \quad (8)$$

Предлагаемая гидравлическая схема вибростола представлена на рисунке 2.

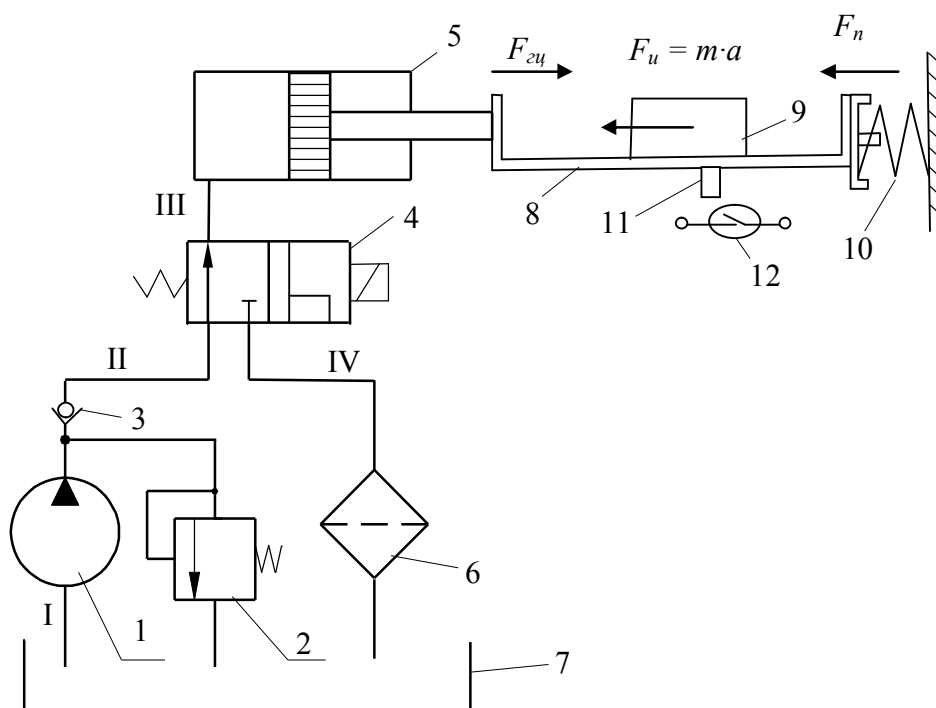


Рисунок 2 — Гидравлическая схема вибростола

Прямой ход вибростола осуществляется под действием мембранного гидроцилиндра 5, получающего питание от насоса 1. Обратный ход вибростола осуществляется под действием тарельчатых пружин 10. При смещении вибростола 8 вправо постоянный магнит 11, прикрепленный снизу вибростола, воздействует на электрический контакт (геркон) 12. Геркон 12 срабатывает и замыкает контакт в линии управления питанием электромагнита гидрораспределителя 4. Электромагнит срабатывает и переключает гидрораспределитель 4. При этом происходит разгрузка насоса и сброс рабочей жидкости из гидроцилиндра 5 в гидробак 7. При смещении стола влево геркон размыкается и процесс повторяется.

Список литературы

1. ГОСТ 3057-90. Пружины тарельчатые. Общие технические условия. — Введ. 1991-07-01. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 36 с.
2. Расчет, проектирование и эксплуатация объемного гидропривода : учеб. пособ. /
3. Л. Финкельштейн [и др.]. — К. : НТУУ «КПИ», 2006. — 216 с.

Панов В. А.
инженер,
Черкасов А. А.
магистрант

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

О ПРОЕКТИРОВАНИИ СОПЛА ГАЗОСТРУЙНЫХ АППАРАТОВ

Разработана компьютерная программа для проектирования осесимметричных сопел, используемых в газоструйных аппаратах. Сопло имеет непрерывную кривизну профиля и скорректировано с учётом роста пограничного слоя таким образом, чтобы можно ожидать равномерного параллельного потока на выходе из сопла. Непрерывная кривизна достигается за счёт задания распределения скорости (или числа Маха) по средней линии, которое имеет первую и вторую производные. Они выполняют следующие требования:

1. Совместимы с трансзвуковым решением вблизи горловины и с радиальным потоком вблизи точки перегиба.

2. Приближаются к нулю на расчётном числе Маха.

Рост пограничного слоя рассчитывается путём решения интегрального уравнения импульса методом численного интегрирования.

Представлен единый подход к проектированию сопла, при котором сначала определяется невязкий контур, а затем он корректируется с учётом роста турбулентного пограничного слоя вдоль контура. Невязкий контур получается осесимметричным методом характеристик по заданному распределению скорости вдоль оси сопла. Распределение скоростей соответствует теоретическим трансзвуковым условиям в горловине, условиям потока с коническим источником через промежуточную область и расчётным условиям потока на выходе из сопла. Вторая производная осевой скорости непрерывна на всём протяжении и равна нулю в точке выхода. Использована взаимозависимость некоторых параметров сопла. Представлен полуэмпирический метод расчёта пограничной поправки.

Бревнов А. А.
к.т.н., доцент,
Рязанова Ю. С.
магистрант

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ЛАМИНАРИЗАЦИИ ПОТОКА

Одним из основных условий для нормального функционирования и эффективной работы некоторых гидродинамических фильтров является формирование устойчивого однородного прямолинейного потока жидкости на входе в устройство очистки. Поэтому возникает необходимость в создании таких условий с помощью дополнительного элемента в общей гидравлической системе фильтрации.

Эффективный способ ламинаризации потока текучей среды заключается в образовании в потоке аэро- или гидродинамического хонейкомба (сотовой конструкции), представляющего собой систему ламинаризованных струй, прошедших перфорацию. Хонейкомб выравнивает поток по направлению, разбивая крупные вихри, а также уменьшает неравномерность распределения продольных скоростей.

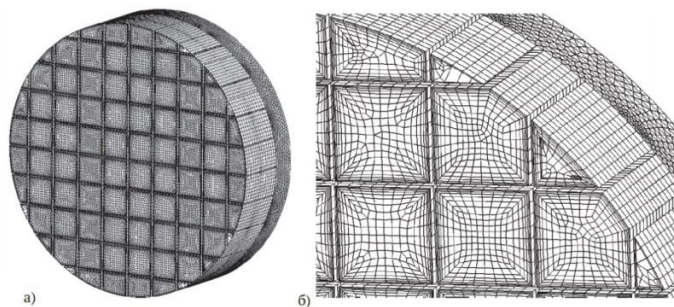
Уменьшение возмущений потока является необходимым условием для эффективной работы гидродинамических фильтров с закруткой потока, на входе которых необходимо сформировать устойчивый качественный однородный поток жидкости.

Седов Л. И. указывал на малоизученную проблему турбулентности в аэродинамических трубах [1]. По мнению автора от исследования потока, поступающего в аэродинамическую трубу, зависит все качество и ценность экспериментальных результатов, добываемых при этом.

Наглядным примером ламинарного потока может служить дугообразный поток воды в фонтане, например в Disney World, который создается путем принудительного движения без перемешивания отдельных слоев жидкости. При этом нет никаких брызг, когда вода приземляется на другом конце. Отсутствие всплесков и летящих во все стороны брызг, может служить дополнительным доводом в применении ламинарного потока в области промышленного клининга [2].

В работе [3] рассматривается задача исследования потока в круглой трубе за хонейкомбом с помощью математического моделирования для изучения гидродинамических характеристик потока после прохождения через это устройство. На рисунке 1 показан общий вид хонейкомба с расчетной сеткой для численного моделирования потока.

Расчет течения в длинной трубе показывает, что достаточное выравнивание потока происходит примерно на расстоянии в 15–20 раз превышающем поперечный размер потока. Это довольно громоздкая конструкция, габариты которой можно уменьшить за счет установки разделительных элементов (хонейкомба), по схеме на рисунке 2.



а — общий вид; б — вблизи перегородок хонейкомба

Рисунок 1 — Сетка хонейкомба

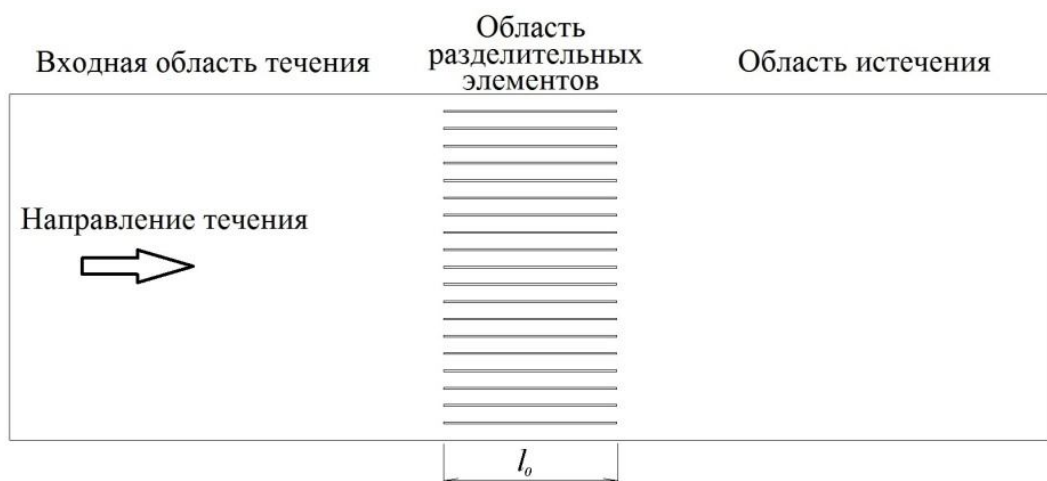


Рисунок 2 — Область течения

В результате расчета в прикладном пакете математических подпрограмм Fluent различных сочетаний количества разделительных элементов, их длины и поперечных размеров был получен наиболее рациональный вариант сочетания геометрических и гидродинамических характеристик ламинаризатора. Общий вид профилей скорости в таком случае подтверждает выравнивание потока в направлении основного течения. Характерный профиль скорости в одном из конечных сечений показан на рисунке 3.

Распределение чисел Рейнольдса в выходных сечениях хонейкомба представлено на рисунке 4. Числа Рейнольдса имеют более высокие значения при течении в разделительных элементах и составляют порядка двух десятков единиц, а после слияния отдельных струй образуется общее течение, число Рейнольдса которого приобретает значение около 1, что подтверждает ламинарный режим течения на выходе из хонейкомба.

Перепад давления в хонейкомбе зависит от поперечных и продольных размеров разделительных элементов. На рисунке 5 представлены графики изменения значений перепада давления от геометрических параметров хонейкомба в рассмотренном диапазоне.

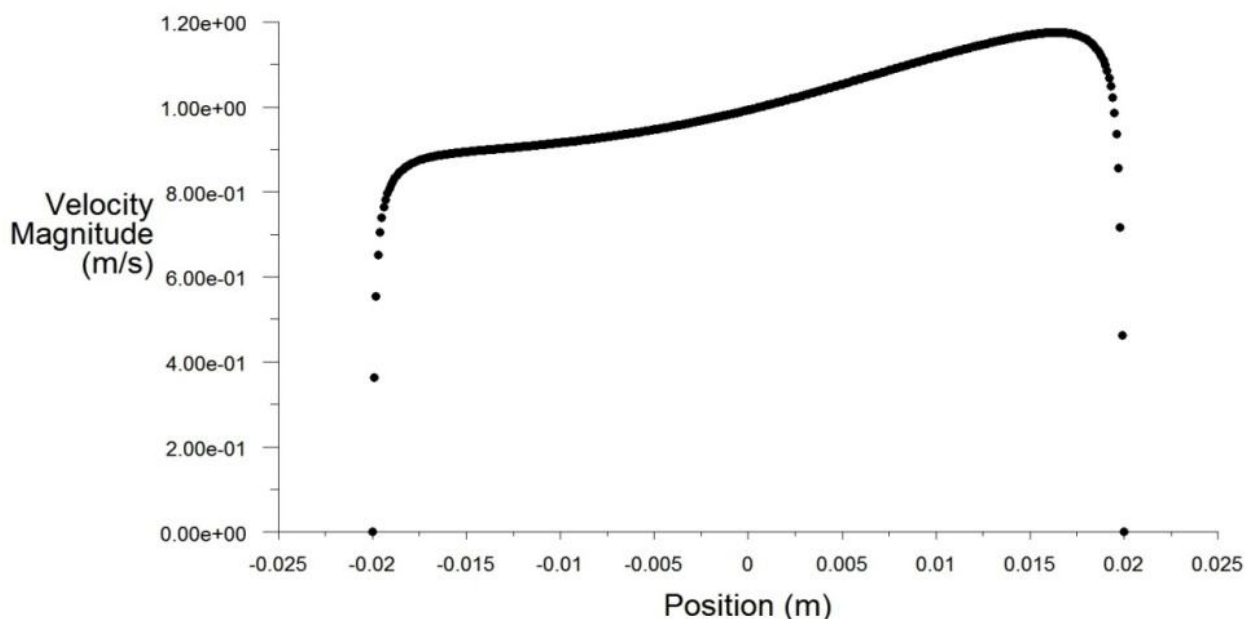


Рисунок 3 — Характерный профиль скорости в выходном сечении

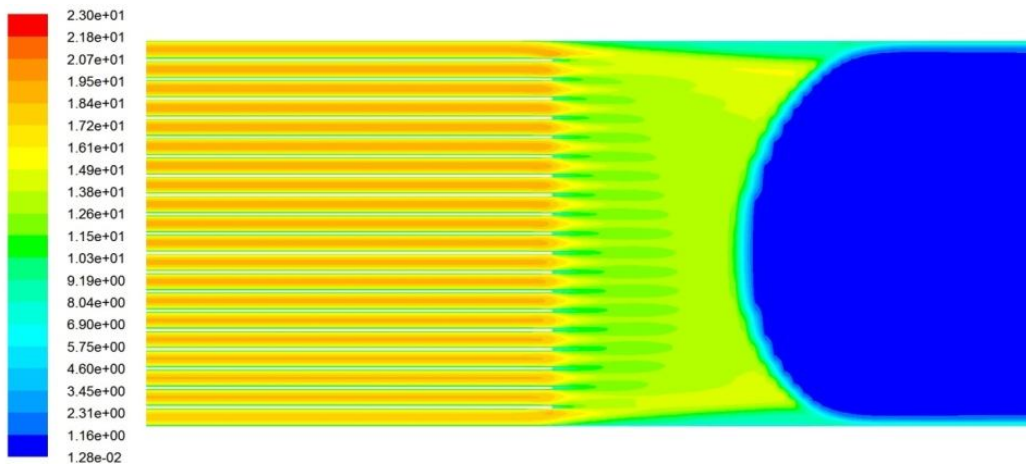
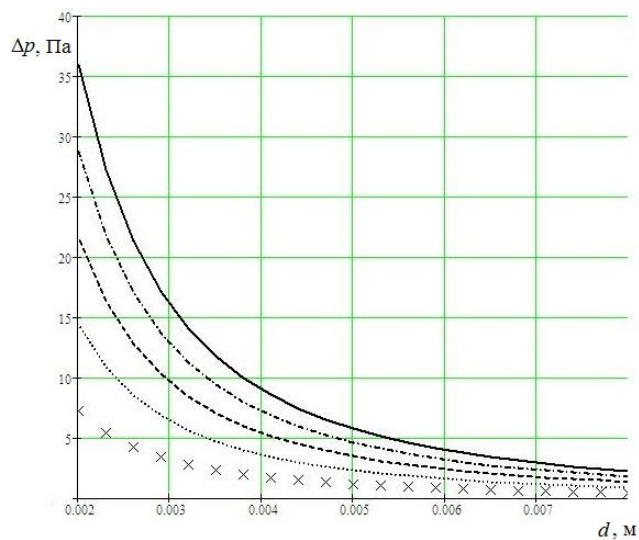


Рисунок 4 — Числа Рейнольдса на выходе из хонейкомба



××× $l_0 = 20\text{мм}$; ···· $l_0 = 40\text{мм}$; --- $l_0 = 60\text{мм}$; -·-·- $l_0 = 80\text{мм}$; — $l_0 = 100\text{мм}$

Рисунок 5 — Зависимость перепада давления от величины поперечного размера элементов хонейкомба

В результате проведенных расчетов было разработано устройство ламинаризации потока на входе в гидродинамический фильтр с закруткой потока, которое позволяет создать благоприятные условия для эффективной работы фильтра за счет формирования ламинарного течения в его входном сечении. Неравномерный характер профиля скорости, вызванный прохождением потока через решетки хонейкомба, выравнивается за счет внутреннего трения слоев вязкой жидкости. В результате формируется устойчивый качественный однородный прямолинейный поток жидкости, необходимый для обеспечения благоприятных начальных условий работы гидродинамического фильтра.

Список литературы

1. Седов, Л. И. Новые методы и новые направления механики сплошной среды / Л. И. Седов // Нерешенные задачи механики и прикладной математики. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1977. — С. 125–138.
2. Ламинарный поток [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bkpromcleaning.ru/laminarnyj-potok>.
3. Численное моделирование формирования потока в круглой трубе за хонейкомбом / И. Б. Александров, Е. И. Куркин, О. Е. Лукьянов, В. О. Садыкова, В. Г. Шахов. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2016. — Т. 18. — № 4. — С. 115–119.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ СНИЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Загрязнение дегазационных трубопроводов и образование накипи в водокольцевых вакуум-насосах снижают производительность дегазационной системы. Загрязненность трубопроводов проявляется наличием в них твердых отложений воды. Они состоят, в основном, из продуктов коррозии. Предотвращение коррозии требует материальных затрат и не окупается сохранением исходной пропускной способности трубопроводов, поэтому влияние твердых отложений компенсируется увеличением диаметром трубопроводов при проектировании [1].

Влияние воды проявляется увеличением гидравлического сопротивления трубопровода в месте ее накопления. При этом потери производительности системы могут достигать 50 %. Накопление воды происходит в пониженных местах трубопроводов, а также в местах сопряжения горизонтальных трубопроводов, а также в местах сопряжения горизонтальных трубопроводов с наклонными к вертикальным при восходящем движении в них газе. Источниками поступления воды являются: дегазационные скважины и участки трубопроводов с перепадами температур газа (за счет конденсации водяных паров, содержащихся в газе) [2].

Для предотвращения накопления воды в местах подключения дегазационных скважин, а также в местах накопления воды следует устанавливать водоулавливатели, снабженные водоотводчиками. Водоулавливатели должны обеспечивать удаление воды, двигающейся как в потоке газа, так и по поверхности труб. Для отвода воды из водоулавливателей, смонтированных у скважин, можно применять автоматические водоотводчики, работающие на принципе водяного затвора. Для удаления воды из водоулавливателей, установленных на участковых и магистральных трубопроводах, следует применять водоотводчики, работающие на принципе накопительного бака. Объем бака определяется по количеству воды, конденсирующейся в участках трубопроводной сети, имеющих сток к водоулавливателю [3].

Приток воды их каждого участка трубопровода определяется

$$q = 0,000002 \cdot \Delta t \cdot Q, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где Δt — разность температур газа на участке трубопровода, имеющего сток в водоулавливатель, °С; Q — расход газа в участке трубопровода, приведенный к нормальным условиям, м³/мин.

Объем накопительного бака определяются:

$$V = k \cdot 1440\tau \cdot \sum q, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где k — коэффициент, учитывающий колебания расхода газа в трубопроводе, принимается равным 1,3; τ — периодичность выпуска воды, сутки; $\sum q$ — суммарный приток воды из участков трубопроводной сети, м³/мин.

Образование накипи в водокольцевых вакуум-насосах обусловлено наличием в охлаждающей воде солей жесткости, а также условий для их кристаллизации. Накипь уменьшает рабочий объем насоса, снижает его производительность, создает опасность «заклинивания» ротора машины. Для предупреждения образования накипи могут применяться различные способы умягчения воды. Наиболее экономичными являются безреагентные (физически) способы, одним из которых является способ магнитной обработки. Сущность способа заключается в том, что под действием магнитного поля соли жесткости, растворенные в воде, изменяют свою структуру. При нагревании воды соли не образуют твердых отложений, а выпадают в рыхлый осадок. Для магнитной обработки воды, питающей вакуум-насосы,

можно применять противонакипные магнитные устройства типа ПМУ и ПМУ-2, предназначенные для предотвращения накипеобразования в системах водяного отопления [4].

Система охлаждения вакуум-насосов работает с замкнутым циклом использования воды. Потери воды на испарение в градирне и ее вынос с газом восполняются из водопроводной сети шахты. В связи с тем, что противонакипные свойства омагниченной воды кратковременны, магнитной обработки целесообразно подвергать как воду, циркулирующую в контуре обращения, так и воду, подаваемую из водопроводной сети. Поэтому существует необходимость подключения магнитных устройств к системе охлаждения вакуум-насосов поверхностной вакуум-насосной станции.

Список литературы

1. Абдрахманов, М. И. К задаче диагностики дегазационной сети шахты / М. И. Абдрахманов // Уральская горная школа регионам : Международная научно-практическая конференция. — 2011. — С. 33–38.
2. Малашкина, В. А. Дегазационные установки : учеб. пособ. / В. А. Малашкина. — М. : Изд-во МГГУ, 2000. — 190 с.
3. Инструкция по дегазации угольных шахт / Коллектив авторов. — М. : ЗАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2012. — 250 с.
4. Высоцкий, С. П. Снижение вредного воздействия горных предприятий на окружающую среду / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько // Респиратор: Научный вестник НИИГД. — 2017. — № 1 (54). — С. 65–74.

Тургенев И. А.
студент, техник научного центра «Цифровые технологии»,
Закрасовский Д. И.
магистрант, техник научного центра «Цифровые технологии»
Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, РФ

ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СМАЗКИ КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Добыча полезных ископаемых (ПИ) ведется подземным, открытым и комбинированным способом. Доля добычи открытым способом составляет более 70 % от всей добычи ПИ, а также ожидается увеличение этой доли в дальнейшем.

Для добычи ПИ применяют разнообразную технику. Основной техникой на карьерах являются экскаваторы, карьерные самосвалы (КС), буровые установки и т. д., которые эксплуатируются в тяжелых горно-геологических, климатических и других условиях.

В связи с этими условиями эксплуатации, ресурс техники быстро вырабатывается, что создает предпосылки к усовершенствованию, как самой техники, так и элементов ее обслуживания. Одним из способов увеличения ресурса техники является установка централизованной системы смазки.

Централизованная система смазки — это передовое оборудование, которое создано специально для подачи смазочных веществ на главную распределительную магистраль машины. Она проходит через производственные механизмы. От нее отходят второстепенные линии, которые направляют вещество к конечным потребителям. Все централизованные системы смазки имеют схожую комплектацию. Насос и резервуар обеспечивают стабильный поток смазочного материала. Блок управления необходим для включения и мониторинга работы системы. Дозирующие устройства обеспечивают подачу необходимого объема смазочного материала во все точки смазки. Дополнительные принадлежности улучшают производительность устройства.

Централизованные системы смазки подразделяются на несколько видов отличающихся по принципу работы:

1. Однолинейная параллельная (инжекторная) система — это система смазки, в которой насос нагнетает давление в основную линию подачи и заполняет несколько отдельных поршневых дозаторов или инжекторов. Каждый инжектор обслуживает одну точку смазки и может быть настроен на подачу необходимого количества смазки с высокой степенью точности (рис. 1, а). Инжекторы работают независимо друг от друга. Выход из строя отдельного инжектора или блокировка линии подачи не нарушает работу остальной системы.

2. Двухлинейная система — эта система смазки, в которой присутствует реверсивный механизм. В систему реализована подача смазки с одной линии на другую. Применяется, как правило, для пар трения, достаточно удаленных друг от друга (рис. 1, б).

3. В прогрессивной системе насос подает смазку к точкам смазки через главный дозирующий клапан и дополнительные вспомогательные дозирующие клапаны. Размер дозирующих клапанов подбирается для каждой точки смазки, чтобы подавать необходимое количество смазочного материала. Поршень внутри питателя зависит от потока предыдущего поршня. Таким образом, смазка подается в каждую точку смазки последовательно. Смазочный материал подается в каждую точку смазки в системе в точно заданном объеме (рис. 1, в).

4. Масляно-воздушная система смазки — это система, которая состоит из прогрессивной системы смазки с дополнительным блоком дозирования воздуха, который монтируется в прогрессивный питатель. Смазка, запитанная в систему, подается со сжатым воздухом. Смазка, прилипая к внутренней поверхности стенки трубопровода, двигается по направлению движения сжатого воздуха. Благодаря растяжению смазывающего материала, подаваемого вдоль трубопровода, пульсирующая подача превращается в практически непрерывную в точке смазки. Применяется для оборудования различных размеров и с различными требуемыми дозами смазки.

5. Комбинированная система смазки — заключается в том, что часть трущихся поверхностей смазывается под давлением, а часть — разбрызгиванием. Обычно под давлением смазываются коренные и кривошипные шейки, а иногда и шейки распределительного валика. Поршень же, пальцы поршня, а также все остальные трущиеся поверхности смазываются разбрызгиванием. Комбинированные системы смазки позволяют упростить конструкцию двигателя, так как часть трущихся поверхностей смазывается разбрызгиваемым маслом, а под давлением оно подводится только к наиболее напряженным узлам трения, главным образом к подшипникам коленчатого и распределительного валов (рис. 1, в).

Основными компонентами автоматической системы смазки являются: дозатор; насос; контроллер; трубки/шланги; фитинги для подключения к точкам смазки.

На рынке централизованные автоматические системы смазки представлены фирмами LINCOLN, Graco, Ciaroni, Nexoil, BEKA.

Системы смазки LINCOLN нашли широкое применение во всех отраслях производства. Основными элементами системы смазки являются: масляные насосы (гидравлические, пневматические или с электроприводом), распределители различных конструкций, оборудование контроля и соединительные элементы. Ассортимент продукции LINCOLN включает в себя как простые нагнетатели консистентной смазки, компактные смазочные системы для отдельных машин, так и большие производственные установки для подачи смазочного материала.

Компания Graco предлагает широкий выбор вариантов централизованных систем смазки, в состав которых входят все необходимые компоненты, широкая номенклатура компонентов систем позволяет формировать уникальные системы под самые разные механизмы. Системы оснащаются пневматическим, гидравлическим или электрическим приводом и подходят для промышленного применения, обслуживания различных видов транспорта.

Ciaroni специализируется на проектировании, изготовлении и монтаже централизованных систем смазки. Первоначально сосредоточившись исключительно на автомобильных системах смазки, компания постепенно приобрела обширный опыт и приступила к разработке серии продуктов, предназначенных для установки на землеройные машины и промышленное оборудование.

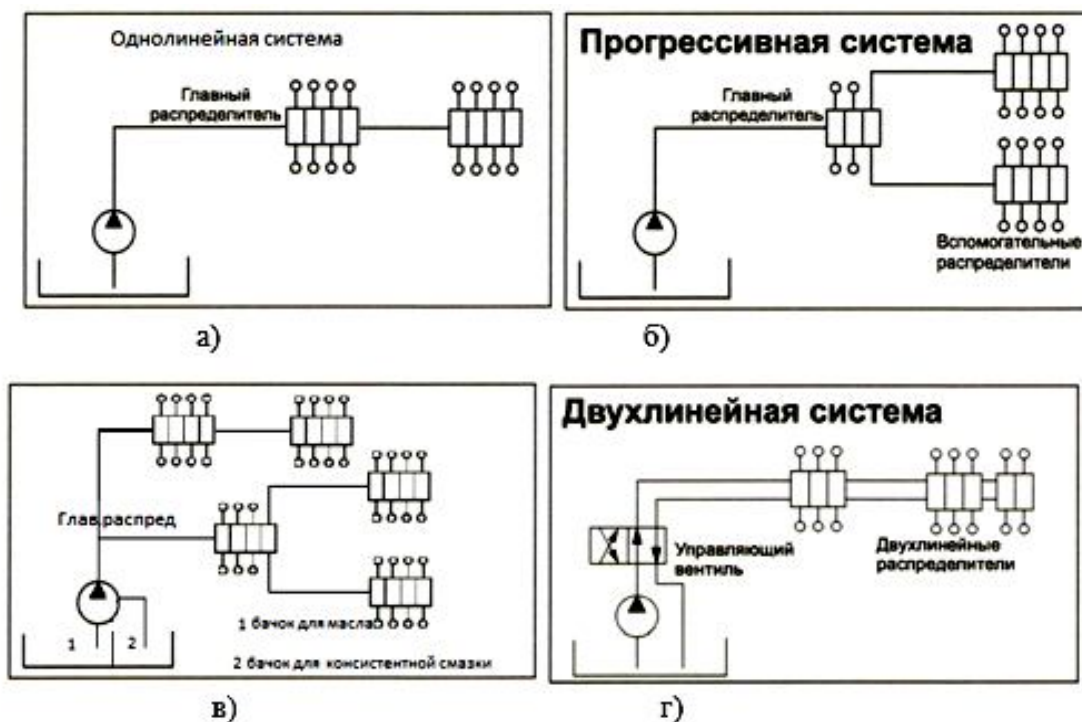


Рисунок 1 — Виды систем смазки

Смазочный сектор Nexoil занимается проектированием и производством промышленных систем смазки. Постоянно находясь в поиске самых современных технологических решений, Nexoil подвергает свою продукцию строгим испытаниям, которые обеспечивают неизменные соотношения потоков и правильное впрыскивание жидкости во все точки системы, частью которой будет являться компонент.

В продуктовую линейку ВЕКА входят все необходимые комплектующие для построения системы автоматизированной смазки, которая позволит существенно уменьшить износ в узлах трения, сократить затраты на обслуживание и расход смазки, а также обеспечить надежную работу оборудования и безопасность его обслуживания. Системы ВЕКА могут быть оснащены самыми различными, в том числе дистанционными, системами контроля, которые позволяют свести нарушения в работе оборудования к минимуму.

В заключении стоит отметить, что для увеличения ресурса работы карьерной техники необходимо устанавливать централизованную автоматическую систему смазки. Для разных условий эксплуатации и типов техники применяется определенный вид системы смазки. Выбором наиболее подходящей системы занимаются производители данных систем.

Байда Б. Ю.
старший преподаватель
Донецкий национальный университет экономики и торговли
им. Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, ДНР

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ БРОСОВОЙ ТЕПЛОТЫ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Дефицит энергии, глобальное потепление и загрязнение воздуха на данный момент являются наиболее значимыми глобальными проблемами, что в первую очередь связано с постоянным истощением источников ископаемого топлива. Для пищевой промышленности вопрос энергоэффективности является особо актуальным, ввиду наличия энергозатратных процессов. Одним из современных направлений в области повышения энергоэффективности технологических процессов является внедрение теплонасосных установок.

Существует множество возможностей утилизации отработанного тепла, генерируемого промышленными процессами. При оптимальном использовании теплонасосных установок (ТНУ) можно снизить потребление первичной энергии и выбросы CO_2 .

Парокомпрессионный тепловой насос (ПКТН) — это термодинамическая установка, в которой теплота за счет подвода внешней энергии или затраты работы передается от низкопотенциального источника потребителю при более высокой температуре.

Система рекуперации тепла включает в себя технологии интеграции процессов, начиная от пассивной рекуперации, такой как простых теплообменников до технологий утилизации отработанного тепла, таких как промышленные тепловые насосы. Установлено что пищевая промышленность является крупнейшим потребителем низкопотенциального промышленного тепла.

Пищевая промышленность включает в себя производство напитков, мясных продуктов, молочные заводы, производство сыра и сахара. На сегодняшний день известно, что потенциал внедрения ТНУ в пищевой промышленности ограничивается конкретным технологическим процессом, осуществляемым на предприятии. Это обуславливается тем, что эффективность работы ТНУ в большей степени зависит от температурного режима осуществляемого процесса и требуемой температуры для потребителя.

Цель работы — сравнительный термодинамический и эксергетический анализ эффективности теплонасосных систем для горячего водоснабжения предприятий пищевых производств.

Методология исследования заключается в проведении энергетического и эксергетического анализа работы парокомпрессионного теплового насоса (ПКТН), согласно методике [1].

На рисунке 1 представлено распределение потребностей в тепле до $80\text{ }^\circ\text{C}$ между различными отраслями промышленности.

Что касается уровня температур, рисунок 2 иллюстрирует распределение тепла на использование до $80\text{ }^\circ\text{C}$ и $100\text{ }^\circ\text{C}$ уровня температуры процесса между промышленными секторами. Заметно, что нагрев жидкостей и газов является преобладающей потребностью при температуре ниже $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Характер переработки пищевых продуктов предлагает множество возможностей для использования тепловых насосов в пищевой промышленности. Распространенными потоками отработанного тепла в пищевой промышленности являются сточные воды, канализационные стоки, влага и тепло конденсатора холодильных установок [2]. Средний уровень температуры отработанного тепла варьируется, как правило, между $30\text{ }^\circ\text{C}$ и $50\text{ }^\circ\text{C}$. Поток отходов и уровень температуры определяют количество доступного источника тепла для теплового насоса. Для проведения расчетов примем температуру отработанного тепла равного $35\text{ }^\circ\text{C}$.

Целью энергетического анализа является определение параметров эффективности работы исследуемой системы. Основными показателями энергетической эффективности выступают удельная тепловая нагрузка теплового насоса ($q_{\text{тн}}$), коэффициент преобразования теплоты (μ) [1].



Рисунок 1 — Диаграмма распределения потребностей в теплоте до 80 °С по отраслям промышленности

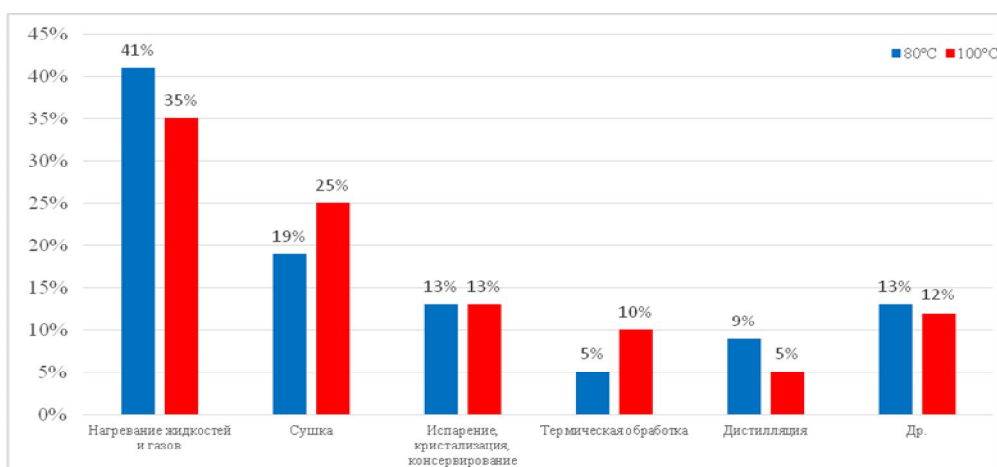


Рисунок 2 — Диаграмма распределения потребности в тепловой энергии

Таблица 1 — Исходные данные

Наименование параметра	Значение	
Тепловая нагрузка $Q_{тн}$	12	кВт
Температура низкопотенциального теплоносителя (воздуха) на входе в тепловой насос $t_{ч1}$	35	°С
Температура низкопотенциального теплоносителя после теплового насоса $t_{ч2}$	20	°С
Температура высокопотенциального теплоносителя (воды) на входе в тепловой насос $t_{в1}$	35	°С
Температура горячей воды после теплового насоса $t_{в2}$	65	°С
Температура окружающей среды t_0	-20...20	°С
Перепады температур на выходе из теплообменников $\Delta t_{и}, \Delta t_{к}, \Delta t_{по}$	5	°С
Температура перегрева пара в промежуточном теплообменнике $\Delta t_{п}$	20	°С

Удельная тепловая нагрузка теплового насоса:

– для схемы с регенеративным теплообменником:

$$q_{тн} = q_{к}, \text{ кДж/кг}; \quad (1)$$

– для схемы с регенеративным теплообменником и переохладителем:

$$q_{тн} = q_{к} + q_{по}, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где $q_{к}$ — удельная тепловая нагрузка конденсатора, кДж/кг; $q_{по}$ — удельная тепловая нагрузка переохладителя, кДж/кг.

Коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu = q_{\text{ТН}} / l_{\text{сж}} \cdot \quad (3)$$

Термодинамический метод основан на интегральных показателях и сводится к анализу вышеуказанных коэффициентов. Очевидно, что помимо интегральных показателей важна информация, касающаяся термодинамической эффективности отдельных узлов установки. Для этой цели применяется метод эксергетического анализа, позволяющего проанализировать эффективность каждого отдельно взятого элемента теплового насоса.

Эксергетический анализ позволяет качественно оценить тепловые потоки, протекающие в теплонасосной системе, степень несовершенства работы термодинамической системы. Основным показателем эксергетической эффективности системы является эксергетический КПД ($\eta_{\text{э}}$).

В рамках проведенного исследования были выполнены расчеты для двух схем подключения ПКТН: с регенеративным теплообменником (РТО), с РТО и переохладителем с варьированием температуры окружающей среды.

Результаты исследования представлены в виде диаграмм и графиков. На рисунке 3 представлена диаграмма зависимости схемы подключения ПКТН от коэффициента преобразования теплоты μ при температуре окружающей среды равной $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Проведя анализ полученных данных, изображенных на рисунке 3, делаем следующие выводы: наибольший коэффициент преобразования теплоты достигается в схеме с переохладителем и рекуперативным теплообменником (РТО); прирост относительно схемы с промежуточным теплообменником — 16 %; оптимальным для исследуемых условий является хладагент R1234ze.

Разница значений коэффициента μ между R1234ze и R1234yf составляет 23 % для схемы с РТО и 21 % для схемы с РТО и переохладителем. Также наблюдается существенный прирост коэффициента μ в случае перехода с традиционного хладагента R134a на ГФО хладагент R1234ze, в условиях схемы с РТО и переохладителем ПКТН с рабочим веществом R1234ze будет на 15 % эффективнее, чем аналогичная система на хладагенте R134a.

На рисунке 4 изображена аналогичная диаграмма зависимости схемы подключения ПКТН от эксергетического КПД ($\eta_{\text{э}}$), на которой видно, что наиболее эксергетически совершенны системы, работающие на хладагенте R1234ze.

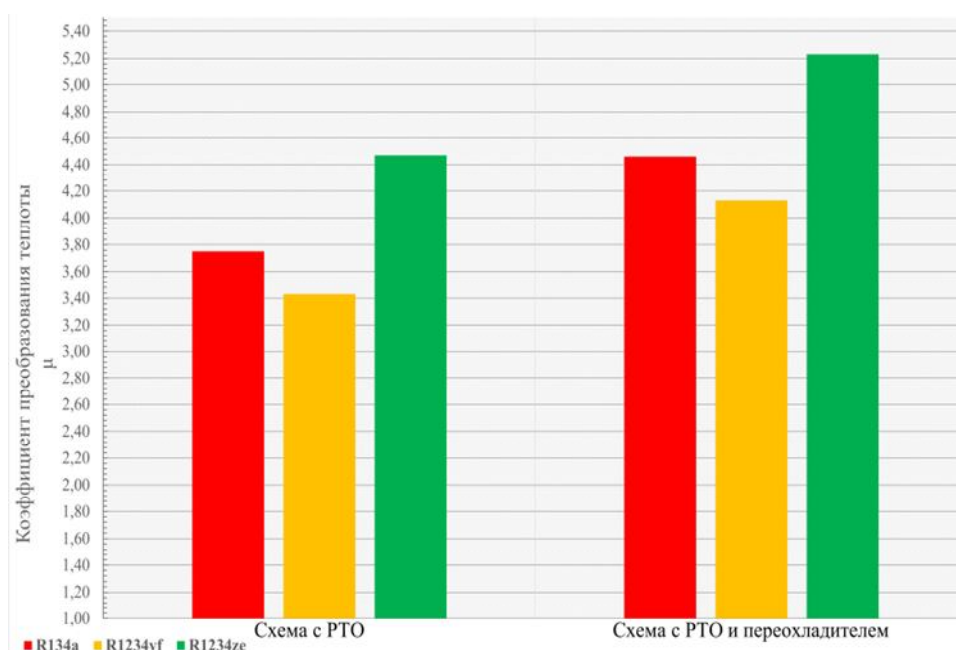


Рисунок 3 — Диаграмма зависимости коэффициента преобразования теплоты от ПКТН

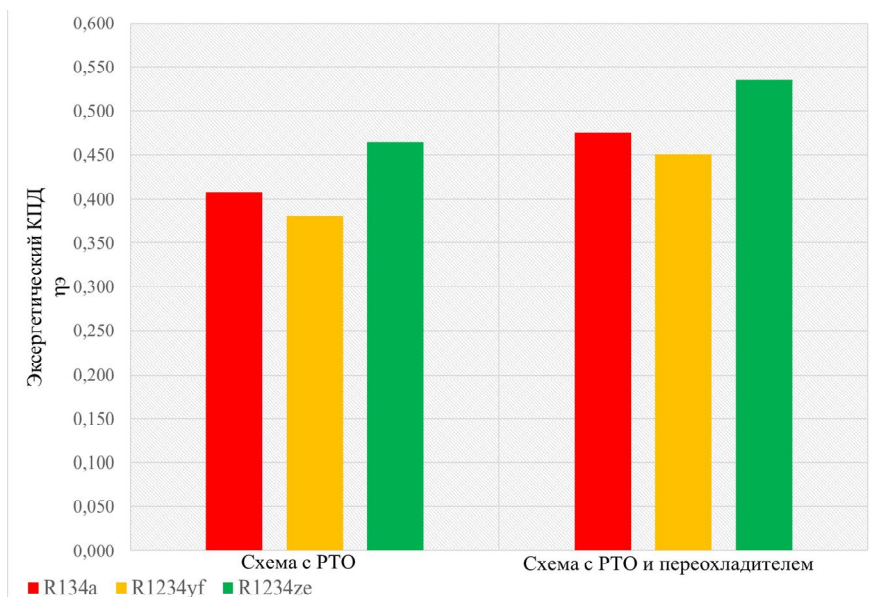


Рисунок 4 — Диаграмма зависимости эксергетического КПД от схемы работы ПКТН

Разница между R134a и R1234ze составляет 15 % в схеме с РТО и 11 % в схеме с РТО и переохладителем. Проанализировав представленные данные, можно сделать вывод — применение РТО и переохладителя увеличивает эксергетический КПД на 12 %.

Как показано в данной работе, существует много возможностей для технологий теплового насоса для рекуперации отработанного тепла, генерируемого промышленными процессами, особенно в пищевой промышленности. Значительные улучшения возможны при использовании неазеотропных смесей хладагентов, особенно когда необходимы большие температурные скользящие источники тепла, необходимые для рекуперации отработанного тепла.

Рабочая жидкость и технология должны быть изучены для выбора наиболее эффективного теплового насоса с рекуперацией тепла. ПКТН на хладагенте R1234ze демонстрируют наиболее высокие показатели термодинамической эффективности и имеют наименьшие эксергетические потери. При проектировании термотрансформаторных систем особое внимание стоит уделить конструкции конденсатора и компрессора. Приоритетной схемой подключения ПКТН является схема с промежуточным теплообменником и переохладителем.

В результате эксергетического анализа были определены наиболее несовершенные узлы ПКТН, степень совершенства характеризуется величиной эксергетических потерь в отдельно взятом узле термотрансформаторной системы. Согласно полученным данным, наименьшие эксергетические потери наблюдаются в системах с рабочим веществом R1234ze, самыми несовершенными узлами конденсатор и компрессор.

Список литературы

1. Трубаев, П. А. Тепловые насосы : учеб. пособ. / П. А. Трубаев, Б. М. Гришко. — Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. — 42 с.
2. Байда, Б. Ю. Анализ современного состояния вопроса применения тепловых насосов, работающих на CO₂, в пищевой промышленности / Б. Ю. Байда, В. В. Карнаух // Оборудование и технологии пищевых производств : темат. сб. науч. раб. — 2021. — № 13 (46). — С. 42–49.

*Гайда А. С.
к.т.н., доцент,
Лысенко С. Г.
к.б.н., доцент*

Луганский государственный аграрный университет, г. Луганск, ЛНР

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ШУМА ПРИ РАБОТЕ КОМБАЙНОВ

Из известных опасных и вредных производственных факторов комбайнеры постоянно подвергаются действию шума и вибрации. Шум выделяется как постоянно действующий фактор высокой интенсивности, воздействие которого приводит к ухудшению здоровья работающих. Создание мощных и производительных комбайнов неизбежно сопровождается увеличением уровня шума.

Шум стал одной из серьезных причин социальных и экономических потерь в нашем обществе. Снижение шума машин и оборудования сопровождается повышением производительности труда. Защита от шума — важная проблема. Для снижения шума применяется набор средств, но не все они эффективны для самоходных машин, в т. ч. комбайнов [1]. Применение индивидуальных средств защиты от шума менее эффективно, чем снижение шумовых характеристик самой машины. Общеизвестно, что при использовании индивидуальных средств, снижающих шум с 93 до 73 дБА, производительность труда комбайнеров возрастает на 6–7 %. Снижение уровня звука машины с 96 до 83 дБА приводит к увеличению производительности труда на 12 %. Кроме этого шум является одним из важнейших комплексных показателей качества оборудования, а в ряде случаев может быть и показателем технического уровня машины, поскольку объективно отображает неточности в изготовлении практически всех деталей. В связи с этим борьба с шумом является актуальной проблемой, имеющей социальное и экономическое значение. До настоящего времени работы по снижению шума в кабинах комбайнов проводились на уже созданных машинах. Но доводка акустических характеристик в кабинах до нормативных величин должна осуществляться с помощью некоторых конструктивных доработок [2].

Резервы уменьшения шума имеются и заложены они в акустических расчетах кабин зерноуборочных комбайнов на стадии проектирования. Конструкторы комбайнов до сих пор не имеют методов расчета ожидаемых уровней шума в кабинах на рабочих местах операторов, обеспечивающих прогнозирование акустических характеристик, а также выбор способов доведения их до нормативных величин. В связи с этим необходимо стремиться к улучшению условий труда комбайнеров путем снижения шума в кабинах зерноуборочных комбайнов до предельно допустимых уровней. Для этого необходимо изучить основные закономерности формирования звукового поля внутри кабины комбайна. Создать акустическую модель кабины и аналитические зависимости уровней шума на рабочем месте комбайнера. Провести натурные эксперименты.

Так же необходимо установить теоретически и подтвердить экспериментально соотношения между спектральными уровнями звукового давления в кабине комбайна, конструктивными параметрами кабины и виброакустическими характеристиками основных источников шума и вибрации. А результатом такой работы должна явиться методика инженерного расчета акустических характеристик в кабине комбайна на стадии проектирования при одновременном воздействии воздушного и структурного шума, а на этой основе можно будет совершить выбор способов по доведению шумовых характеристик до нормативных величин [3].

Научной новизной при таком подходе должно стать установление закономерностей формирования акустических характеристик в кабинах комбайнов при одновременном воздействии внешних и внутренних источников: воздушного и структурного шума. В результате должна быть разработана методика инженерного расчета шумовых характеристик в кабинах самоходных зерноуборочных комбайнов, позволяющая оценить вклад отдельных источников

в звуковое поле на рабочем месте оператора и выбрать способы доведения шума до нормативных значений. Так же должны быть предложены практические способы по снижению шума в кабинах за счет увеличения диссипативных и звукоизолирующих свойств отдельных элементов ограждения кабины.

Список литературы

1. Борьба с шумом на производстве : справочник / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн и др. ; под общ. ред. Е. Я. Юдина. — М. : Машиностроение, 1985. — 400 с.
2. Справочник по технической акустике : пер. с нем. / под ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера. — Л. : Судостроение, 1980. — 440 с.
3. Физическая акустика. Том 2. Часть Б. Свойства полимеров и нелинейная акустика : пер. с англ. / под ред. У. Мэзона. — М. : Мир, 1969. — 420 с.

Жижкина Н. А.
д.т.н., профессор,
Тесля А. В.
магистрант,
Тесля В. В.
аспирант,
Василенко М. П.
аспирант

Луганский государственный аграрный университет, г. Луганск, ЛНР

АНАЛИЗ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С РОТОРАМИ (ВАЛАМИ), ВОССТАНОВЛЕННЫМИ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Анализ современного рынка двигателей внутреннего сгорания показал, что требования, предъявляемые к двигателям дизельного типа, состоят в одновременно высоких показателях мощности, экономичности и экологичности. В настоящее время для обеспечения вышеперечисленных требований разработан и широко внедрён метод газотурбинного наддува. Известно, что для форсирования двигателей в условиях повышенных нагрузок, а именно в двигателях автобусов, тракторов грузовых автомобилей, используют турбокомпрессор ТКР-6.1. Турбокомпрессор данного типа состоит из упорного подшипника и системы вал-плавающая втулка-корпус подшипника.

Эксплуатация такого подшипникового узла показала [1], что его выход из строя происходит в результате изнашивания поверхностей его составляющих. Одной из наиболее существенных составляющих подшипникового узла, которая определяет его ресурс работоспособности, является пара трения ротор (вал) — подшипник. Установлено, что данная пара трения подвержена абразивному (в момент недостаточной подачи смазочного материала при пуске и т. п.) и гидроабразивному (при установившемся режиме работы) изнашиванию.

Поскольку производство нового ТКР-6.1 взамен вышедшему из строя по причине изнашивания пары трения ротор (вал) — подшипник достаточно дорого, применяют различные методы его ремонта.

Анализ современных методов ремонта [2] выше названной пары трения показал, что применение одних с использованием заготовки ротора (вала) имеет низкую стоимость, но высокую трудоемкость. А других — низкую трудоемкость ремонта при высокой стоимости (70 % стоимости ремонта) ротора (вала).

Роторы (валы) в настоящее время ремонтируются следующими методами [3]: шлифовка вала до ремонтного размера, замена изношенного вала приваркой заготовки к колесу турбины сваркой трением встык с последующей механической обработкой, нанесение гальванических покрытий с последующей чистовой обработкой, электроконтактное напекание смеси металлических порошков с последующей чистовой обработкой, электроискровая обработка и газопламенная порошковая наплавка.

Результаты работы [9] показали, что метод газопламенного напыления имеет ряд преимуществ:

- возможность применения различных по составу порошковых материалов для получения заданной твердости и износостойкости покрытия;
- простота используемой аппаратуры;
- не требуется высокая квалификация оператора;
- восстановленная деталь имеет ровную поверхность, что позволяет предусматривать небольшой припуск на механическую обработку покрытия.

Газопламенное напыление [4] является методом восстановления рабочей поверхности детали нанесением на нее специального покрытия, для которого применяют присадочные материалы в виде проволоки, прутков и порошка. Наиболее эффективным присадочными ма-

териалами являются металлические и полимерные порошки, которые позволяют сформировать равномерный наплавленный слой любой толщины и состава. Кроме этого данный метод имеет и другие преимущества: обрабатываемая заготовка не деформируется, не ограничены размеры восстанавливаемой поверхности, низкая себестоимость, реставрация реализуема в условиях любого ремонтного производства.

В связи с этим, важное и актуальное значение для промышленного внедрения разработок, касающихся ремонта ТКР-6.1 методом газопламенного напыления, представляет анализ эксплуатации роторов (валов) с восстановленной рабочей поверхностью.

Цель работы — анализ эксплуатационной стойкости восстановленных роторов турбин (валов) для автотракторных турбокомпрессоров.

Для достижения поставленной цели, были сформулированы следующие задачи:

– охарактеризовать параметры технологии восстановления вала ротора газопламенным напылением;

– провести сравнительный анализ эксплуатационной стойкости турбокомпрессоров с новым и восстановленным роторами (валами).

Технологический процесс газопламенного нанесения покрытий [7]:

– нагрев поверхности детали до 200–250 °С;

– нанесение подслоя, который дает основу, необходимую для наложения основных слоев;

– нанесение основных слоев, позволяющих получить покрытие с необходимыми физико-механическими свойствами.

На работу ротора (вала) в турбокомпрессоре влияют [10] количество, температура и давление поступающих от двигателя газов, а также центробежные силы. Наиболее нагруженным этапом работы ротора (вала) является пуск, особенно режим пуска при отрицательных температурах окружающей среды. Показано, что такой режим сопровождается недостаточной подачей смазочного материала при высокой частоте вращения ротора (вала), что приводит к потере его устойчивости и росту амплитуды колебаний, уменьшению демпфирования в подшипниках, а также интенсивному изнашиванию рабочей пары трения ротор (вал) – подшипник, так называемому «граничному трению». В связи с этим в технических условиях по эксплуатации турбокомпрессора рекомендовано проводить предварительную прокачку в системе смазки.

Эксплуатационные показатели ротора турбокомпрессора (вала) [6] (износ, прочность и другие), требуемый уровень которых рассчитывается, исходя из особенностей работы конкретного двигателя внутреннего сгорания при пуске и установившемся режиме работы, определяют выбор материала для восстановления рабочего слоя ротора турбокомпрессора (вала). Для повышения эксплуатационной стойкости ротора (вала) из стали 45 для турбокомпрессора ТКР-6.1 в работе [9] предложено нанесение на его изношенную рабочую поверхность флюсового порошка на никелевой основе путем газопламенного напыления.

Анализ стойкости [5] восстановленных по предложенной технологии роторов (валов), отработавших у потребителей, показал, что уровень твердости рабочего слоя восстановленного ротора (вала) выше в среднем на 20 %, чем у нового ротора(вала). В результате срок службы восстановленного ротора (вала) увеличивается на 2,5 месяца по сравнению с новым. Установлено, что восстановленные роторы (валы) характеризуются более высоким уровнем твердости по сравнению с новыми изделиями, что обеспечивает высокое содержание хрома (до 15 %) и никеля (более 70 %) в составе флюсового порошка, используемого для формирования газонапыленного слоя.

Вместе с тем анализ эксплуатации турбокомпрессоров [8], полностью отработавших свой ресурс, показал, что количество списанных по этой причине среди изделий с новым ротором (валом) выше, чем среди ТКР с восстановленным ротором (валом). Установлено, что меньшее количество турбокомпрессоров с восстановленными роторами (валами) по сравнению с новыми роторами обусловлено повышенным уровнем напряжений в наплавленном слое.

Выводы:

1. Показаны условия эксплуатации и факторы влияющие на долговечность важных узлов турбокомпрессора при его работе, а также актуальность разработки процесса восстановления ротора (вала) турбокомпрессора.

2. Произведен анализ методов восстановления роторов (валов) турбокомпрессоров. Установлено, что метод газопламенного напыления ротора (вала), в сравнении с другими методами восстановления, имеет более широкий спектр преимуществ.

3. Анализ эксплуатационной стойкости турбокомпрессоров с восстановленным ротором (валом) показал, что в результате внедрения разработанной технологии газопламенного напыления увеличивается срок их службы на 2,5 месяца по сравнению с изделиями с новыми роторами. Вместе с тем количество турбокомпрессоров с восстановленным ротором (валом), отработавших полностью свой ресурс, незначительно снижается. Это объясняется более высоким уровнем напряжений в наплавленном слое, что требует проведения дополнительных исследований по усовершенствованию технологии восстановления ротора (вала) газопламенным напылением. Поэтому работа в этом направлении продолжается.

Список литературы

1. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учебное пособие / [В. И. Черноиванов, В. В. Бледных, А. Э. Северный и др.] ; под ред. В. И. Черноиванова. — М. : ГОСНИТИ ; Челябинск : ЧГАУ, 2001. — 831 с.

2. Михалин, П. А. Восстановление валов роторов турбокомпрессора дизелей лесных машин и передвижных электростанций : дис. ... канд. техн. наук 05.21.01 / Михалин Павел Александрович ; Моск. гос. ун-т леса. — Москва, 2010. — 167 с.

3. Иванов, В. П. Выбор способа восстановления деталей / В. П. Иванов // Наука и техника. — 2016. — № 1. — С. 9–17.

4. Наплавка и напыление металлов [Электронный ресурс] // Информационная торговая система. — Режим доступа: https://eti.su/articles/over/over_1659.html.

5. Задорожная, Е. А. Результаты расчетов динамики ротора турбокомпрессора [Электронный ресурс] / Е. А. Задорожная, Н. А. Хозенюк, П. А. Тараненко // Машиностроение. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-rascheta-dinamiki-rotora-turbokompressora-tkr-8-5s/viewer>.

6. Обоснование применения ремонтно-восстановительных воздействий для деталей турбокомпрессоров / П. В. Сенин, В. А. Мачнев, В. А. Комаров, А. Ю. Овчинников, В. В. Власкин // Нива Поволжья. — 2017. — № 1 (42). — С. 91–98.

7. Жижкина, Н. А. Восстановление рабочей поверхности вала ротора для двигателей дизельного типа газопламенным напылением / Н. А. Жижкина, В. В. Тесля // Нові матеріали і технології в машинобудуванні — 2020 : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. — К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — С. 66–67.

8. Жижкина, Н. А. Основы научных исследований : учебное пособие / Н. А. Жижкина. — Луганск : ЛНАУ, 2019. — 109 с.

9. Изюмский, В. А. Анализ способов восстановления ротора турбокомпрессора / В. А. Изюмский, А. В. Тесля. — Луганск : ЛНАУ, 2019 — 5 с.

10. Причины поломки и выхода турбокомпрессора из строя [Электронный ресурс] // Турбомагазин.ру — Режим доступа: <https://turbo-magazin.ru/prichinyi-vyihoda-turbokompressora-iz-stroya.html>.

Бойко Н. З.
к.т.н., доцент,
Долгих В. П.
к.т.н.

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Обеспечение высокой эффективности процесса транспортировки насыпных грузов определяется четкостью и надежностью работы конвейерного транспорта [1]. В результате комплексной механизации, автоматизации управления и контроля работы конвейерных линий удается достичь поставленной задачи.

Производительность конвейеров определяется уровнем поступающего грузопотока. Однако из-за недоиспользования их как по производительности, так и по времени работы наблюдаются неоправданные затраты на потребление электроэнергии, снижение сроков службы тягового органа и металлических частей. В совокупности эти факторы приводят к повышению стоимости транспортирования грузов, что, несомненно, отражается и на снижении эффективности работы транспортной системы в целом.

С целью совершенствования эксплуатации конвейерного транспорта необходимо создавать системы, обеспечивающие рациональный режим их работы по критерию минимальных затрат на доставку грузов [2]. В условиях непостоянства грузопотоков следует обратить внимание на создание системы автоматизированного управления (САУ), способной обеспечивать стабилизацию погонной нагрузки конвейерной установки, например, как за счет регулирования скорости ленты, так и применения промежуточного бункер-конвейера (рис. 1).

Рассмотрим, как работает САУ, включающая бункер-конвейер. На вход САУ бункер-конвейера поступает скорость движения полотна v_6 , а на выходе — угловая скорость двигателя $\omega_{г.д.}$. В случае, когда величина поступления грузопотока q_2 больше заложенной в программе удельной нагрузки q_0 на тяговый орган главного конвейера № 1, скорость ленты v_k которого постоянна, превышающая часть поступившего грузопотока в результате выдвигания заслонки загрузочного лотка ЗЛ направляется на бункер-конвейер. Одновременно с этим САУ поддерживает установленную скорость полотна бункера v_6 и обеспечивает необходимый уровень заполнения его материалом. При достижении условия $q_2 < q_0$, бункер-конвейер разгружается и дозаполняет конвейер № 1. Количество материала составляет $q_6 = q_0 - q_2$. Изменение v_6 достигается путем регулирования $\omega_{г.д.}$ приводного двигателя Д. Для этого может быть использован тиристорный преобразователь частоты.

Передаточная функция звена ленты конвейера может быть представлена так:

$$W_{л}(p) = \frac{v_{загр}(p)}{v_{л}(p)} = \frac{e^{-p\tau}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (1)$$

где $\tau = \frac{L_k}{\sqrt{E/q_0}}$ — значение времени запаздывания; L_k — длина ленточного конвейера;

E — модуль упругости материала тягового органа; q_0 — приведенная нагрузка на единицу длины грузовой ленты.

Филатов М. А.
старший преподаватель,
Левченко Э. П.
к.т.н., доцент,
Филатова Н. А.
ведущий инженер,
Макаревич А. Г.
старший преподаватель
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Среди всех способов разрушения материалов наиболее распространенным можно считать обеспечение ударно-стирающего воздействия. Однако данный принцип, как правило, хоть и реализуется в широко применяемых и распространенных конструкция дробильно-измельчительных машин, но обладает некоторой повышенной энергоемкостью, ввиду того что некоторая часть энергии расходуется нерационально на приведение в действие рабочих органов посредством различного вида трансмиссионных механизмов [1].

При этом общий расход энергии на процесс измельчения отвечает схеме, представленной на рисунке 1.

Таким образом некоторая довольно существенная часть энергии, потребляемой приводом машины, расходуется на приведение в движение ее рабочих органов, которые зачастую обладают большой массой и габаритными размерами, что подразумевает под собой и преодоление существенных инерционных сил. Следовательно, логичным является разработка технического решения измельчительного устройства [2], позволяющего полностью или частично исключить потери в трансмиссии, что даст определенную возможность экономии энергозатрат на диспергирование материалов.



Рисунок 1 — Структура расхода энергии на измельчение

В качестве одного из таких устройств может применяться электромагнитный измельчитель (рис. 2), в котором элементы трансмиссии полностью отсутствуют, а энергия измельчения передается с помощью магнитного поля непосредственно ферромагнитным мелющими телам, которые могут иметь различную геометрическую форму и массогабаритные характеристики. Физическая модель устройства и обмотка электромагнитов показана на рисунке 2.



Рисунок 2 — Внешний вид физической модели электромагнитного измельчителя и устройство обмоток, создания магнитного поля

Положительным моментом можно считать непосредственное воздействие мелющих тел на измельчаемый материал, хорошее перемешивание, что не только сокращает затраты энергии на измельчение, а и приводит к ускорению процесса диспергирования материалов.

Список литературы

1. Еронько, С. П. Анализ расхода энергии на процессы диспергирования материалов в дробильно-измельчительных машинах / С. П. Еронько, Т. Н. Замота // Современные материалы, техника и технология : сборник научных статей 8-й международной научно-практической конференции. — Курск : Университетская книга, 2018. — С. 134–137.
2. Электромагнитный способ измельчения материалов и его применение для пробоприготовления в агломерационном производстве / М. А. Филатов, Э. П. Левченко, И. А. Карпук и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2019. — Вып. 16 (59). — С. 47–52.
3. Бестрансмиссионное обеспечение движения мелющей загрузки и его преимущества / М. А. Филатов, Э. П. Левченко, И. А. Карпук и др. // Современная металлургия нового тысячелетия, посвящается 10-летию Металлургического института ЛГТУ : сб. науч. тр. III всеросс. (с междунар. участием) науч.-практ. конф. — Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2020. — С. 194–190.
4. Филатов, М. А. Повышение эффективности дезинтеграции премиксов в электромагнитном измельчителе / М. А. Филатов, Э. П. Левченко, А. Г. Макаревич // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары : ФГБОУ ВО «Чувашский ГАУ», 2022. — С. 176–180.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Развитие генерации с использованием ВИЭ (возобновляемых источников энергии) является доминирующей мировой тенденцией в изменении структуры производства электрической энергии. Целевые показатели развития возобновляемых источников энергии приняты в 98 странах мира. Большинство целевых показателей относится к доле ВИЭ в производстве электроэнергии от 10 % до 30 %.

Развитие генерации ВИЭ определяется как основной фактор достижения стратегических целей развития энергетики, а именно снижение выбросов парниковых газов, обеспечение безопасности энергопоставок, снижение затрат и рост эффективности экономики.

Наиболее динамично развивающимися направлениями являются: солнечная энергетика, ветроэнергетика и энергетика малых ГЭС.

Если рассмотреть АСУ на малых ГЭС, то на этапе внедрения, решается ряд важнейших задач:

- дистанционное маневрирование ГЭС;
- автоматический контроль работоспособности механической части ГЭС;
- защита оборудования и недопущение аварийных ситуаций в случае достижения предельных значений по температуре и вибрации.
- контроль присутствия персонала и посторонних лиц на территории ГЭС.

Преимущества использования:

Управление ГЭС в режиме реального времени с визуализацией всех технологических процессов.

Сокращение времени поиска неисправности технологического оборудования.

Стабильное поддержание регулируемых технологических параметров.

Контроль деятельности обслуживающего персонала, в том числе удаленный мониторинг ситуации на ГЭС.

Сокращение обслуживающего персонала.

Внедрённые АСУ ТП на малых ГЭС уже много лет служат рациональному использованию энергоресурсов, бережному отношению к окружающей среде и повышению культуры обращения с энергоресурсами. В процессе эксплуатации, увеличивают экономию денежных средств от выработки альтернативной энергии.

В целом, АСУ является важнейшим техническим средством по оптимизации всех технологических и экономических процессов в энергетике. Большая капиталоемкость энергетического хозяйства страны делает особенно актуальной разработку вопросов рационального использования капитальных вложений в энергетическую инфраструктуру и повышения их эффективности. Проектирование и строительство энергетических систем, их важнейших элементов ТЭС, ГЭС, АЭС, ЛЭП и электроэнергетических объединений в целом, а также эксплуатация построенных систем и объектов — это сложнейшие технико-экономические задачи.

Если рассмотреть страны СНГ, то в настоящее время эксплуатируются 39 ГЭС общей мощностью 2900 МВт, проработавших 50 и более лет и 58 ГЭС мощностью 13800 МВт, проработавших 40 лет и более. В результате интенсивной эксплуатации основное энергетическое оборудование, электротехнические, коммутационные, радиорелейные системы и защиты физически изношены, морально устарели, требуют замены и модернизации.

Например, развитие гидроэнергетики Узбекистана до 2020 года базировалось в основном на использовании гидроэнергетического потенциала, предусмотренных «Программой развития малой гидроэнергетики Республики», которое предусматривает развитие гидро-

энергетики за счёт реализации потенциала малых рек, ирригационных каналов, водохранилищ водотоков на которых планируется построить 141 малых и микро ГЭС установленной мощности 1700 МВт, с выработкой электроэнергии до 8 млрд кВт·час в год. В настоящее время в Республике строится 8 малых ГЭС мощностью 340 МВт, проектируется 7 мощностью 96 МВт [1]. Модернизация систем управления как технологическими процессами, так и производством в целом гидроэнергетических объектов (ГЭО) Узбекистана является одной из актуальных задач технического перевооружения отрасли. Сегодня технический уровень систем контроля и учета, установленных на подавляющем большинстве гидроэлектростанций (Чирчикских ГЭС каскадов), не в состоянии удовлетворять современным требованиям к качеству технических средств, объему и функциональности.

Комплекс АСУ ТП ГЭС предназначен для использования как на реконструируемых, так и на вновь возводимых объектах гидроэнергетики. Система управления масштаба станции является единым комплексом высокой степени интеграции, объединяющим в себя все подсистемы выработки и распределения электроэнергии станции, и позволяет осуществлять управление всеми процессами из единого центра. Интеграция подсистем и ведение общей базы данных позволяет предоставить оператору единый комплексный интерфейс, учитывать взаимные связи и блокировки, производить общую обработку данных различных подсистем, синхронизированных по времени.

Введение данного комплекта повышает надежность и эффективность работы оборудования, а также уменьшает возможность ошибочных действий персонала и улучшает условия работы. АСУ ТП ГЭС построена как интегрированный информационно-управляющий комплекс по принципу распределения функций между подсистемами, способными автономно управлять объектом автоматизации [2].

Верхний уровень включает следующие программно-технические комплексы оперативно-диспетчерского управления нормального и аварийного режимов, средства интеграции с контрольно-измерительными системами и внешними информационными системами:

- средства преобразования и передачи цифровой информации;
- кабельно-коммуникационные средства приема и передачи информации (контроллеры интерфейсов, сетевые адаптеры, концентраторы, кабели и др.);
- средства обработки информации (процессорные платы, модули центральных процессоров);
- средства хранения информации (магнитные и оптические устройства хранения и съема информации);
- средства отображения информации (видеомониторы, мнемощит);
- средства ввода различных директив управления в систему;
- устройства бесперебойного электропитания;
- средства документирования информации;
- система единого времени.

Связь между компонентами системы и другими подсистемами осуществляется посредством высокоскоростной оптоволоконной сети Ethernet TCP/IP, имеющей отказоустойчивую топологию. Структура системы предусматривает возможность дальнейшего наращивания и расширения состава решаемых задач и выполняемых функций и может варьироваться применительно к особенностям технологического оборудования и составу уже введенных в эксплуатацию подсистем конкретного объекта (рис. 1).

Составными частями АСУ ТП могут быть отдельные системы автоматического управления (САУ) и автоматизированные устройства, связанные в единый комплекс. Такие как системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA), распределенные системы управления (DCS), и другие более мелкие системы управления (например, системы на программируемых логических контроллерах (PLC)). Как правило, АСУ ТП имеет единую систему операторского управления технологическим процессом в виде одного или нескольких пультов управления, средства обработки и архивирования информации о ходе процесса, типовые элементы автоматики: датчики, устройства управления, исполнительные устройства. Для информационной связи всех подсистем используются промышленные сети [3].

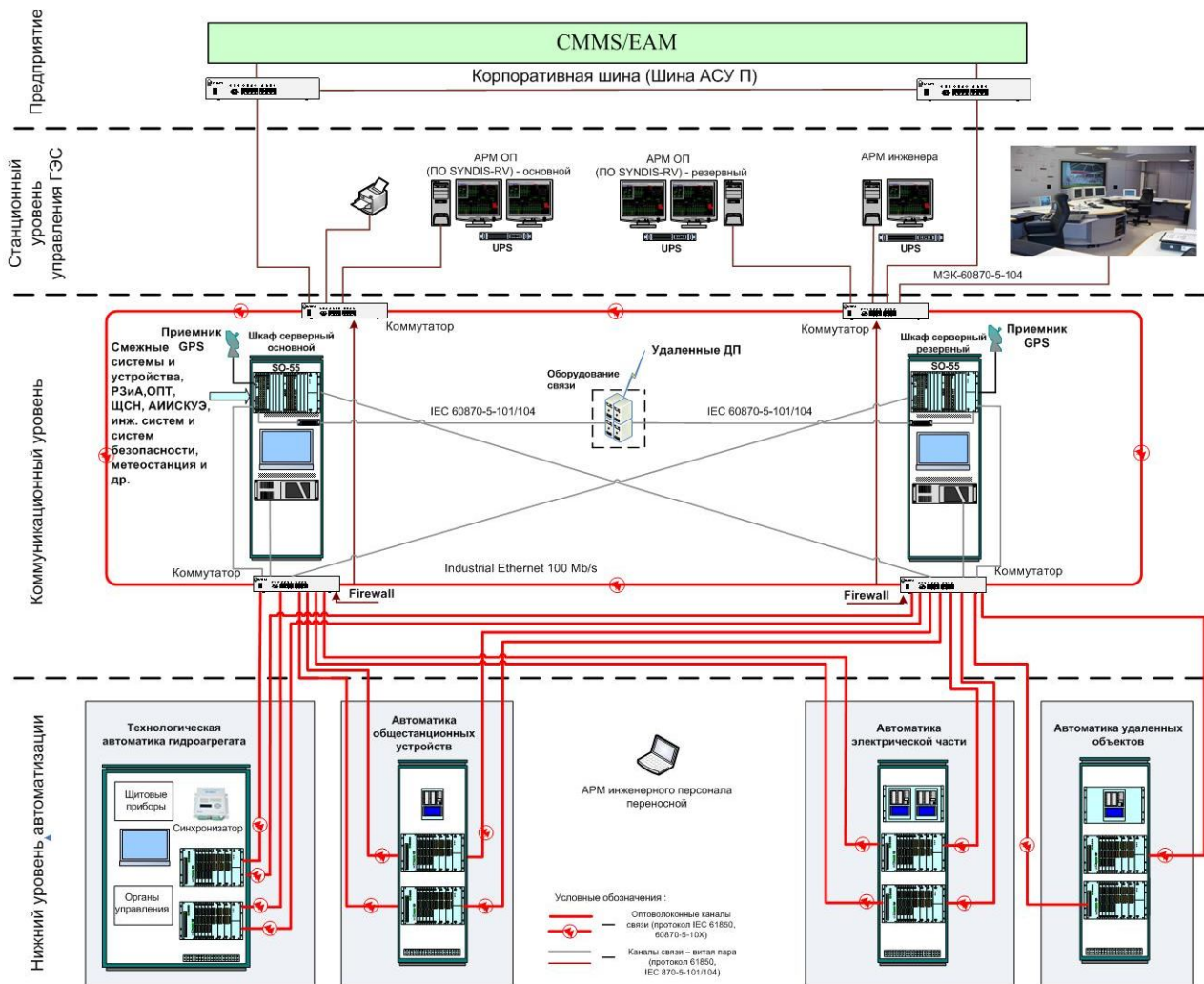


Рисунок 1 — Схема расположения АСУ ТП ГЭС

На гидроэнергетических объектах наибольшее распространение получили четыре типа датчиков для измерения расхода воды: индукционные; ультразвуковые; электромагнитные; с сужающими устройствами. Однако эти приборы имеют ряд недостатков: длительность измерения, большой расход дорогостоящих реактивов, сложность конструкции, субъективность результатов измерений и другие. Исследование и развитие теплового метода позволяет создать простые и надежные устройства для контроля расхода и уровня воды в гидротехнических системах.

Перспективность теплового метода для контроля основных параметров воды обусловлена высоким быстродействием, чувствительностью, помехозащищенностью и экономичностью. Датчики воды прошли испытания при проведении контроля и управления уровнем воды в Чирчикских ГЭС каскадов [4].

Список литературы

1. Использование водной энергии / Ю. С. Васильев и др. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 608 с.
2. Саркисян, Р. Е. Применение метода анализа иерархий к оцениванию эффективности АСУ ТП ТЭС и ГЭС : метод. пособ. / Р. Е. Саркисян, С. В. Мезин. — М. : Изд. МЭИ, 2004. — 24 с.
3. Плетнев, Г. П. Автоматизированные системы управления объектами гидроэлектростанций / Г. П. Плетнев. — М. : Изд. МЭИ, 2005.
4. Ташматов, Х. К. Тепловой преобразователь уровня воды / Х. К. Ташматов // Датчики и системы — 2006. — № 3. — С. 41–42.

СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМА ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ ПОЛЕВОГО УРОВНЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ

Технологические процессы металлургического производства в целом характеризуются большим количеством различных факторов, оказывающих влияние на качество и номенклатуру продукции, выпускаемой предприятиями черной металлургии, ведение технологических процессов в которых даже в сходных условиях родственных предприятий имеет отличия, обусловленные, например, различными условиями функционирования агрегатов [1].

С ростом предприятия, модернизацией технологического оборудования, увеличением номенклатуры продукции, ужесточением требований к ее качеству возрастает количество источников информации, данные которых необходимо и целесообразно хранить все время эксплуатации металлургического агрегата [2].

Указанный недостаток применяемых на производстве систем сбора данных требует нового подхода к процессу получения и обобщения технологических параметров.

Необходимо отметить следующие особенности существующих систем сбора данных:

– вся первичная информация о технологических процессах металлургического производства носит аналоговый характер и характеризует постоянные времени процессов и технологических агрегатов;

– для обеспечения преобразования аналоговых данных в цифровое представление необходимо прежде всего провести дискретизацию посредством вторичного преобразователя;

– период квантования потока информации возможно варьировать в пределах от времени преобразования аналого-цифрового интерфейса вторичного преобразователя до половины периода максимальной частоты полосы пропускания объекта измерения [3];

Таким образом, напрашивается вывод о том, что снижение количества избыточной информации в системах сбора данных, в первую очередь, целесообразно выполнять на этапе дискретизации, изменяя частоту предоставления информации.

С целью проверки выдвинутого утверждения была реализована программная обработка наиболее распространенного типа фрагмента числовых значений существующей системы сбора данных действующего предприятия.

Результат выполнения программного обеспечения с применением разработанного модифицированного метода наименьших модулей [4], адаптированного для обработки потоковой информации с сохранением допустимой метрологической точности представлен на рисунке 1.

Графическое представление и сравнение числовых значений исходного и редуцированного потока информации показывает значительное улучшение показателей эффективности процесса сбора данных:

– метрологическая точность удовлетворяет показателям систем металлургического производства и может быть задана в зависимости от требуемой в соответствии с нормативной документацией (для представленного показателя 1 %);

– количество опорных точек снижено с 1440 до 870;

– объем требуемой для хранения информации точно 4 байт/значение снижен в 1,655 раза с 5760 до 3480 байт.

Применение предложенного принципа и разработанного алгоритма снижения объема избыточной информации для других типов фрагментов данных в зависимости от характера изменения значений показало, что для системы в целом количество избыточной информации может быть снижено в 10 и более раз уже на этапе дискретизации сигнала первичного преобразователя.

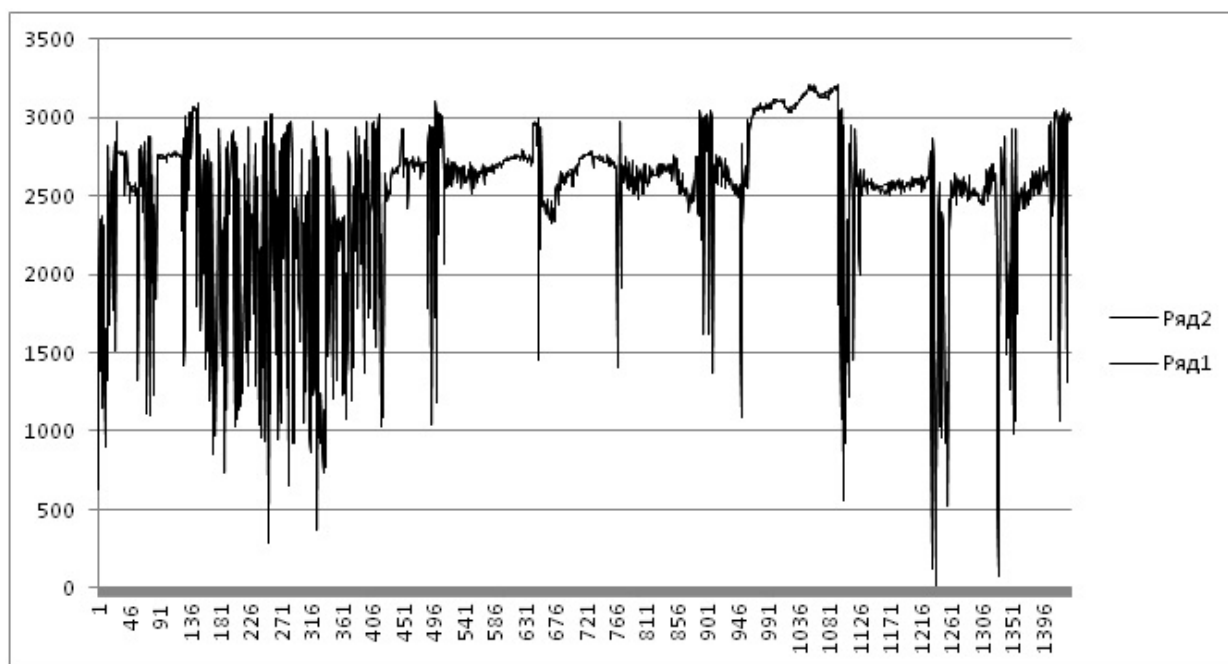


Рисунок 1 — Сравнение графиков опорных и эквивалентных им расчетных точек исходных (ряд 2) и редуцированных (ряд 1) данных

Использование предложенного подхода к повышению эффективности передачи данных повлечет за собой изменение технологии получения оцифрованной информации об объекте измерения, что в комбинации с уже существующими методами компрессии цифровых данных значительно снизит нагрузку информационных систем на транспортировку и хранение.

Список литературы

1. Автоматизация основных металлургических процессов / Ю. В. Липухин, Ю. И. Булатов, Г. Бок, М. Кнорр. — М. : Металлургия, 1990. — 278 с.
2. Об утверждении Перечня типовых архивных документов, образующихся в научно-технической и производственной деятельности организаций, с указанием сроков хранения : Приказ Росархива от 28.12.2021 N 142.
3. Шершень, С. А. разработка комплексного критерия оценки информации в одномастерной сети rs-485 / С. А. Шершень, С. Ю. Будков // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых : сборник тезисов. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С. 100–102.
4. Мудров, В. И. Методы обработки измерений: Квазиправдоподобные оценки / В. И. Мудров, В. Л. Кушко. — М. : Радио и связь, 1983. — 304 с.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМ ПЛАВИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ НА ГП «ЛНПВК»

Государственное предприятие «Лугутинский научно-производственный валковый комбинат» (ГП «ЛНПВК») — одно из ведущих вальцепроизводящих предприятий стран постсоветского пространства. Стойкость валков с маркой «ЛНПВК» обеспечивает работу прокатных станов с минимальным количеством перевалок, сокращая материальные и энергетические затраты металлургических комбинатов.

На предприятии выпускают чугунные и стальные листопрокатные и сортопрокатные валки для прокатных станов предприятий металлургической промышленности, мельничные шары и мукомольные валки для помола зерна, а также различные валки для предприятий резинотехнической, бумажной, лакокрасочной и других отраслей промышленности.

Для увеличения производства ГП «ЛНПВК» приобрели индукционный плавильный комплекс немецкой фирмы OTTO JUNKER [1] на базе тиристорного преобразователя частоты с двумя индукционными 16 тонными печами. Монтаж данного комплекса был начат в 2013 году и до конца не закончен. До настоящего времени комплекс так и не был запущен в эксплуатацию, т.к. немецкая фирма не укомплектовала его системой управления.

Лишь в 2020 году возникла необходимость в обновлении оборудования прокатных цехов металлургических заводов, в том числе прокатных валков, которые производятся на ГП «ЛНПВК». Для наращивания объемов производства и повышения качества выпускаемой продукции Министерством промышленности и торговли было принято решение о запуске данного индукционного комплекса. В связи с этим Луганскому государственному университету имени Владимира Даля была поставлена задача разработать и запустить систему управления внешним контуром охлаждения печей и ряд сопутствующих защит, а Донбасскому государственному техническому институту была поставлена основная задача разработать новую систему управления индукционным плавильным комплексом с мониторингом его работы на пульте сталевара, смонтировать, наладить и запустить этот комплекс с разработанной системой управления.

В связи с этим целью данной работы является разработка системы управления индукционным плавильным комплексом фирмы OTTO JUNKER с последующим внедрением её в г. Лугутино на ГП «ЛНПВК» для производства прокатных валков.

Для этого была изучена документация на данный комплекс, проанализирована структура и схема его силовой части и оценена возможность построения замкнутой системы управления силовой частью тиристорного преобразователя частоты и разработки алгоритма работы и регулирования преобразователем для питания двух независимых индукционных печей. После чего была составлена упрощенная схема силовой части преобразователя частоты, которая представлена на рисунке 1.

На схеме обозначены Т1 — силовой питающий трансформатор собранный по схеме Y/Y и Δ; VS1-VS12 — тиристоры 12-пульсного выпрямителя, образованные двумя трехфазными мостами; L1.1, L1.2, L2.1, L2.2 — фильтровые дроссели; VS14-VS17, VS19-VS22, VS23-VS26, VS28-VS31 — тиристоры 4-х мостовых параллельных инверторов тока, формирующие в диагоналях каждого моста прямоугольный переменный ток возбуждающий каждый свой нагрузочный контур, в которых формируются выходные напряжения; L3, C1, C2 и L4, C3, C4 — индуктор и конденсаторы нагрузочного контура 1-ой и 2-ой печи; VS13, VS18, VS27, VS32 —

переключающие тиристоры, определяющие порядок работы инверторов тока, ими подключается и отключается поочередно, то одна, то другая индукционную печь. Регулирование мощностью преобразователя от 0 до 4 МВт осуществляется 12-пульсным выпрямителем по датчикам обратной связи по входному току (трансформаторы тока ТА1, ТА2 и ТА3, ТА4) и по входному напряжению (трансформаторы напряжения Т2, Т3 и Т4, Т5), а формирование синусоидального выходного напряжения частотой 250 Гц от 0 до 2,6 кВ осуществляется инверторами тока по датчикам выходного напряжения (трансформаторы напряжения Т6 и Т7).

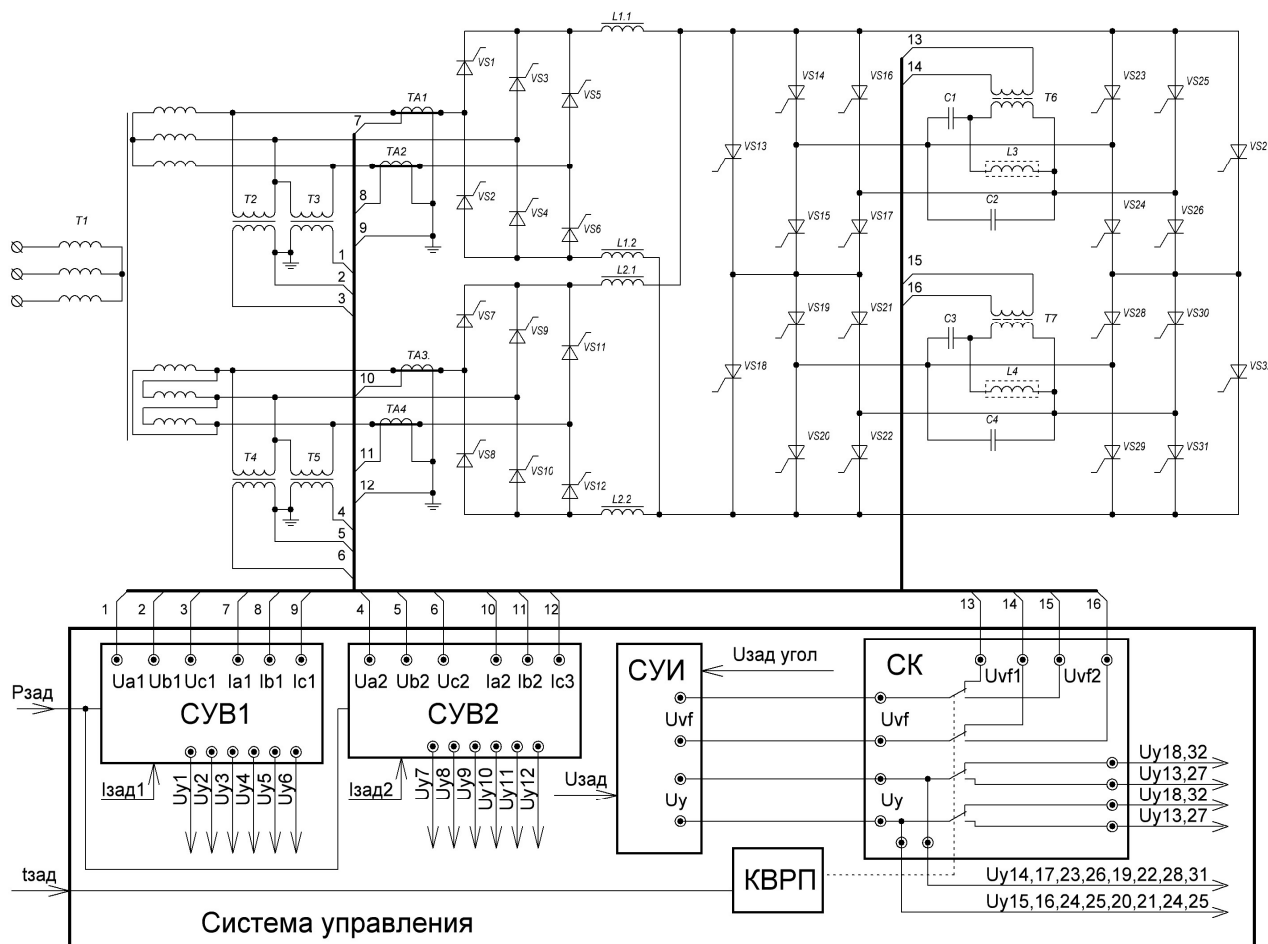


Рисунок 1 — Схема силовой части индукционного плавильного комплекса

По результатам анализа силовой схемы со штатными датчиками, была разработана замкнутая цифровая система управления, состоящая из схем управления выпрямителями (СУВ1 и СУВ2), схемы управления инвертором тока (СУИ). Разработанная система управления имеет характеристики высокой надежности, высокой импульсной симметрии, помехоустойчивости и быстрой скорости отклика.

СУВ1 и СУВ2 состоят из регулятора выпрямленного напряжения, регулятора баланса для обеспечения одинаковой загрузки выпрямителей, схемы управления фазовым сдвигом для двух выпрямителей в зависимости от сигнала задания (Рзад), схемы защиты, схемы плавного запуска и остановки, схемы формирования и усиления импульсов управления тиристорами выпрямителей (Uy1-Uy6 и Uy7-Uy12). Работают СУВ1 и СУВ2 от обратных связей по входному току (Ia1, Ib1, Ic1 и Ia2, Ib2, Ic2) и по входному напряжению (Ua1, Ub1, Uc1 и Ua2, Ub2, Uc2). Обратная связь по напряжению обеспечивает синхронизацию с сетью, обратная связь по току обеспечивает контроль загрузки каждого из выпрямителей, ограничение на заданной величине тока (Iзад1 и Iзад2) и защиту от перегрузки. Принцип построения системы управления трехфазным выпрямителем, алгоритм формирования импульсов управле-

ния тиристорами и способ регулирования угла управления для выпрямителей, который применен в данной СУВ подробно рассмотрен в работе [2].

СУИ состоит из схемы отслеживания частоты инвертора, схемы формирования и автоматического поддержания заданного угла опережения (20–40 град) ($U_{\text{зад.угол}}$) для управления инвертором, схемы запуска со стартовой частоты, схемы формирования и усиления импульсов управления тиристорами инвертора (U_y). Работает СУИ от обратной связи по выходному напряжению (U_{vf}), которая обеспечивает синхронизацию с собственной частотой нагрузочного контура, контроль загрузки инвертора, ограничение на заданной величине выходного напряжения ($U_{\text{зад}}$) и защиту от перенапряжения. Принцип и способ управления здесь применен как для классического инвертора тока и рассмотрен в работе [3].

Согласно эксплуатационной документации в течении периода плавки индукционный комплекс может работать с двумя печами в режиме поочередной работы с заданным процентным соотношением временного интервала ($t_{\text{зад}}$) в течении фиксированного времени (2 мин), например, 30 % работает первая печь, а 70 % работает вторая печь. Для переключения с одной печи на другую служат переключающие тиристоры VS13, VS18, VS27, VS32, включенные параллельно каждому инверторному мосту. Т. е. когда работают верхние мосты, включены переключающие нижние тиристоры VS18 и VS32, закоротив при этом нижние мосты, а когда работают нижние мосты включены переключающие верхние тиристоры VS13 и VS27, закоротив при этом верхние мосты. Для реализации режима поочередной работы двух печей был разработан и добавлен в систему управления контролер времени работы двух печей (КВПП) и схема коммутации (СК) обратных связей по выходному напряжению (U_{vf1} и U_{vf2}) и сигналов управления (U_{y13} , U_{y18} , U_{y27} , U_{y32}) для переключающих тиристоров. Автоматическое включение необходимых переключающих тиристоров для питания то одной печи, то другой с заданным временным интервалом ($t_{\text{зад}}$) осуществляется после того как преобразователь снизит мощность до нуля. Контролер времени настроен таким образом, что предельные временные соотношения от фиксированного (2 мин) временного интервала работы для первой печи составляет 10 %, соответственно для второй 90 % и наоборот. Если требуется работа только с одной любой печью, контроллер времени блокируется. Режим работы печей задается оператором с пульта сталевара.

Разработанная система управления в 2022 году была успешно введена в эксплуатацию в г. Лутугино на ГП «ЛНПК» в индукционный плавильный комплекс фирмы OTTO JUNKER. Испытания прошли в режиме плавки металла массой 16 тонн на одной печи. В конце плавки многофункциональными цифровыми счетчиками электроэнергии Acuvim II, установленными на входе обоих выпрямителей для мониторинга работы комплекса, были зафиксированы следующие показатели: питающие входные линейные напряжения 655 В, потребляемая мощность по каждому выпрямителю 1,92 МВт, суммарная 3,84 МВт, входной линейный ток обоих выпрямителей 1,98 кА. При этом инверторами тока на индукторе сформировалось напряжение 2600 В и частотой 250 Гц, что соответствует заявленным техническим показателям.

Выводы. Разработанная система управления реализована по принципу автоматической подстройки частоты, с функциями ограничения по входному току и выходному напряжению, с плавным пуском и остановкой преобразователя и контролем времени работы печей. Алгоритм работы системы управления позволяет работать комплексу в двух режимах: как с любой одной печью с регулированием мощности от 0 до 4 МВт, так и поочередно с двумя печами с регулируемым временным интервалом между работой двух печей с максимальной мощностью или с независимым регулированием мощности для каждой печи.

Список литературы

1. OTTO JUNKER [Электронный ресурс] . — Режим доступа: <https://www.otto-junker.com/ru/>.
2. Зайцев, А. И. Силовая промышленная электроника : учеб. пособ. Ч. 2 / А. И. Зайцев, А. С. Плехов. — Воронеж : Научная книга, 2007. — 124 с.
3. Силкин, Е. М. Реализация и способы управления вентилями в инверторах тока преобразователей частоты для установок индукционного нагрева и плавки металлов / Е. М. Силкин // Силовая электроника. — 2007. — № 3. — С. 108–114.

Сергиенко С. Н.
к.т.н., доцент,
Юрьев С. А.
к.т.н., доцент,
Малюта Е. Р.
аспирант

Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

ВОЗДУШНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РАЗРЯДНОГО КАНАЛА ПЛАЗМОТРОНА

В настоящее время в различных технологических процессах широкое применение находит дуговой разряд, реализуемый в электродуговых плазмотронах. Применение плазмотронов обусловлено их способностью создавать концентрированные потоки тепловой энергии. Одной из главных составляющих успеха практического применения плазменных технологий в производстве является создание надежного высокопроизводительного оборудования. Основными недостатками таких устройств, применяемых в различных технологических процессах, является малый ресурс работы электродов и низкий тепловой КПД.

Одним из направлений повышения КПД плазмотронов является использование межэлектродных вставок (МЭВ) [1]. Плазмотроны с межэлектродными вставками обладают достаточно высоким КПД (особенно при вдувании газа через пористую стенку), способствует повышению напряжения на дуге и позволяют сравнительно просто повышать мощность плазмотронов увеличением числа МЭВ и достигать более высокой температуры плазменной струи при одинаковых значениях силы тока, расхода и давления нагреваемого газа. Кроме того, снижаются крупномасштабные пульсации тока, напряжения и параметров плазменной струи [2, 3]. Конструктивно МЭВ может выполняться либо в виде удлиненной одиночной секции, либо состоящей из нескольких электроизолированных секций. Секционированная МЭВ в сочетании с распределенной подачей газа позволяет повысить эффективность нагрева газа (т.е. тепловой КПД плазмотрона) и дает возможность дополнительно управлять свойствами плазменной струи [2, 4].

Система охлаждения предназначена для отвода тепловых потоков на стенки элементов конструкции и обеспечения их работоспособности. Однако при большом количестве охлаждаемых элементов плазмотрон оказывается сложным из-за большого количества подводов к нему, например, плазмотроны с секционированной МЭВ [5].

В работе [6] представлен электродуговой плазмотрон с комбинированным охлаждением. Тепловой КПД данного плазмотрона составляет 70 %. Такой высокий КПД достигается за счёт использования в конструкции плазмотрона межэлектродной вставки. Температура дугового разряда этого плазмотрона достигает 4000 К.

Для того, чтобы не усложнять конструкцию плазмотрона с секционированной МЭВ целесообразно применить комбинированное охлаждение: водяное охлаждение для катода и воздушное для МЭВ.

Водяное охлаждение катода оправдано высокой температурой дугового разряда. Применение воздушного охлаждения МЭВ требует особого внимания, поскольку в данной конструкции она является наиболее уязвимым элементом, который может повлиять на ресурс работы плазмотрона.

Для того чтобы выявить влияние температуры дугового разряда на МЭВ плазмотрона, было проведено численное моделирование с помощью программного пакета ASYS. В основу моделирования были положены осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса (RANS), которые в векторной записи можно представить следующим равенством [7]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \nabla \cdot \mathbf{\Pi}, \quad (1)$$

где $\mathbf{\Pi}$ — тензор рейнольдсовых напряжений.

На рисунке 1 представлена расчётная схема канала плазмотрона с секционированной МЭВ.

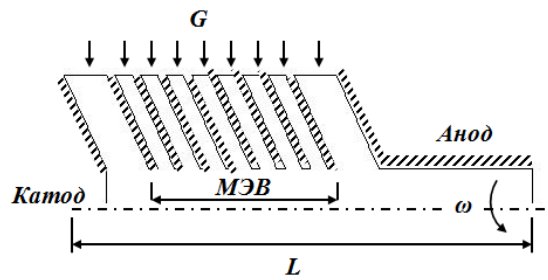


Рисунок 1 — Расчётная схема канала плазмотрона с секционированной МЭВ

Расчетная схема представляет собой двумерную область разрядного канала плазмотрона. В расчётную область подаётся рабочий газ (воздух) с расходом G . На оси разрядного канала задается тепловой поток Q . Газовихревая стабилизация плазменной дуги моделируется вращением расчётной области вокруг оси со скоростью ω .

По результатам численного моделирования были получены значения температуры поверхностей секций МЭВ в разрядном канале плазмотрона. Воздух, который подаётся между секциями, даёт возможность обеспечить температуру МЭВ ниже, чем температура разрядного канала плазмотрона.

Температура секций МЭВ изменяется вдоль её длины. По мере удаления секций от входного сечения прикатодного канала подачи рабочего газа температура поверхности увеличивается, за счет того, что диаметр канала подачи газа между секциями меньше, чем диаметр прикатодного канала. На рисунке 2 показано изменение температуры поверхностей секций МЭВ по длине разрядного канала.

Из рисунка 2 видно, что температура МЭВ снижается вдоль разрядного канала. Это связано с тем, что с увеличением длины растёт количество секций, между которыми находятся каналы подачи воздуха.

Однако, секции МЭВ, которые находятся вблизи анода, подвергаются воздействию дополнительного теплового потока. Анод имеет более высокую температуру, чем разрядная область канала плазмотрона, что вызвано привязкой к нему плазменной дуги.

Более интенсивного охлаждения МЭВ можно добиться увеличением расхода рабочего газа. С ростом расхода рабочего газа (рис. 3) происходит значительное снижение температуры поверхности секций МЭВ, что связано с увеличением скорости обдува секций.

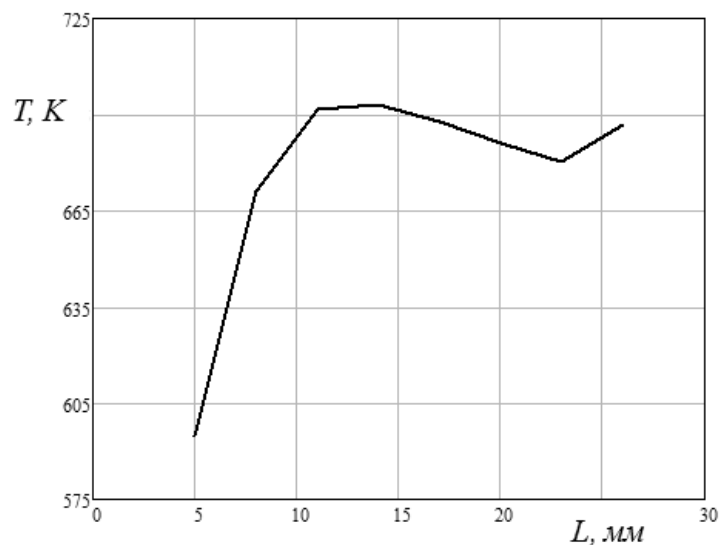


Рисунок 2 — Распределение температуры поверхностей секций МЭВ по её длине

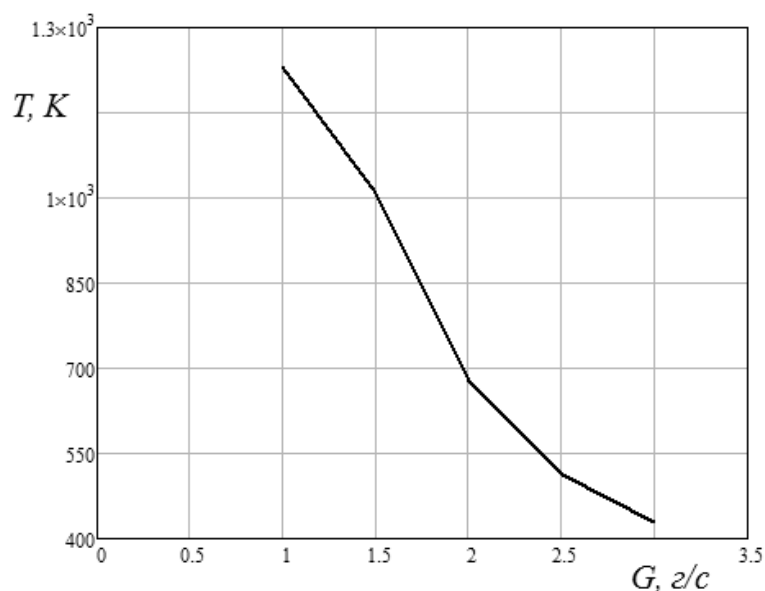


Рисунок 3 — Зависимость средней температуры секций МЭВ от расхода рабочего газа

Однако в дальнейшем необходимо провести трехмерное моделирование с учётом конструктивных особенностей секционированной МЭВ для более точного изучения влияния теплового потока электрической дуги на разрядный канал плазмотрона. Также необходимо установить, как изменение расхода рабочего газа будет влиять на технические параметры плазмотрона.

Список литературы

1. Жуков, М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. — М. : Наука, 1973. — 232 с.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский и др. — Новосибирск : Наука. Сиб. отдел. РАН, 1999. — 712 с.
3. Корсунов, К. А. Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов / К. А. Корсунов, Р. Н. Брошко // Успехи прикладной физики. — 2013. — Т. 1. — № 2. — С. 161–166.
4. Даутов, Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. — К. : Наук. думка, 1984. — 165 с.
5. Клименко, Г. К. Конструкции электродуговых плазмотронов / Г. К. Клименко, А. А. Ляпин. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 56 с.
6. Сергиенко, С. Н. Электродуговой плазмотрон с комбинированным охлаждением / С. Н. Сергиенко, С. А. Юрьев // Международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения». г. Луганск, 16–17 октября 2020. — Луганск : ЛГУ им. В. Даля, 2020. — С. 39–40.
7. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М. : Наука, 1987. — 840 с.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ТОЧЕК ЛИНЕАРИЗАЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ МОСТОВОГО КРАНА НА КАЧЕСТВО ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

При перемещении протяженных механических конструкций, в том числе мостовых кранов, неизменно возникают упругие гармонические деформации, амплитуда которых растет с увеличением протяженности конструкции. В результате влиянием этих деформаций на динамику перемещения механизма нельзя пренебрегать, а с учетом отрицательного влияния таких деформаций на срок службы отдельных механических узлов возникает необходимость разработки методов эффективного их демпфирования за счет совершенствования систем автоматического управления.

Основной сложностью при синтезе систем управления является сложность математической модели упругих деформаций протяженных конструкций, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Решением данной проблемы является условное представление упругой механической конструкции в виде многомассовой системы, количество элементов которой определяется количеством наиболее значимых частот упругих колебаний. Подобный подход используется, например, в [1] для анализа динамики козлового крана.

В [2] на основании подобного представления модели объекта регулирования приведен синтез системы управления движением протяженной механической конструкции, обеспечивающий демпфирование колебаний. Особенностью рассмотренной в указанной работе модели является постоянство ее параметров, однако в [3] путем конечно-элементного моделирования процесса перемещения конструкции мостового крана показано, что частотный спектр ее упругих колебаний зависит от расположения тележки, что необходимо учитывать при синтезе системы автоматического управления. Немало исследований в этой области сводятся к использованию линеаризации модели объекта в нескольких рабочих точках с последующим синтезом регуляторов для каждой из них и объединением всех регуляторов в единое целое за счет использования системы нечеткой логики типа Такаги-Сугено-Канга [4].

В [5] приведен пример синтеза системы модального управления для демпфирования упругих колебаний конструкции мостового крана при линеаризации модели объекта в нескольких точках и с использованием системы Такаги-Сугено-Канга. Точность предложенного метода напрямую зависит от количества точек линеаризации, однако слишком большое их количество приводит к усложнению процедуры синтеза регулятора.

Целью данной работы является анализ влияния количества точек линеаризации на качество демпфирования упругих колебаний путем анализа качества переходных процессов методами компьютерного моделирования.

Рассматриваемая линеаризованная модель объекта управления представлена трехмассовой механической системой, описанной в [3, 5]. На рисунке 1 приведена структурная схема синтезированной двухканальной системы модального управления.

На рисунке 1 обозначены: v^* — заданная скорость перемещения моста; k_{G_1} , k_{G_3} — коэффициенты, обеспечивающие единичный коэффициент передачи замкнутой системы; КРС1 и КРС3 — замкнутые оптимизированные контуры регулирования тяговых усилий приводов колес моста F_1 и F_2 с постоянной времени интегрирования T_T ; K_1 и K_2 — векторы коэффициентов модальных регуляторов; X_1 и X_2 — редуцированные векторы состояния системы; $m_1(l)$, $m_2(l)$ и $m_3(l)$ — значения сосредоточенных масс линеаризованной модели объекта регулирования, зависящие от положения тележки l ; v_1 , v_2 и v_3 — скорости движения сосредоточенных масс; c_{12} и c_{32} — коэффициенты жесткости упругих связей, зависящие от положения тележки; F_{12} и F_{32} — упругие силы.

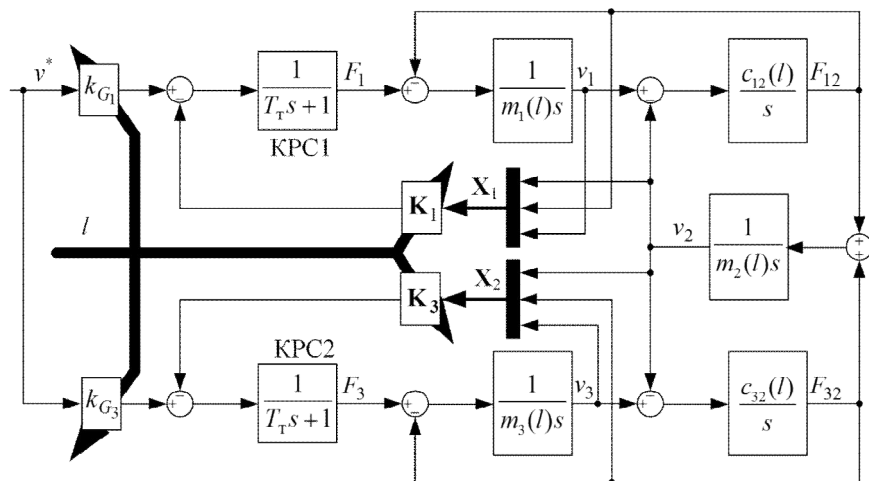


Рисунок 1 — Структурная схема исследуемой системы модального управления

Блоки, вычисляющие коэффициенты k_{G_1} , k_{G_3} , K_1 и K_2 представляют собой системы нечеткой логики типа Такаги-Сугено-Канга, работающие в функции положения тележки. В исходной работе [5] были проведены расчеты для мостового крана с длиной пролета 22,5 м и длиной опорных балок 20 м. Линеаризация была проведена при расположении тележки на расстоянии от 4 до 10 м от опорных балок с шагом 1 м. Показано, что при таком подходе для промежуточных расположений тележки эффективность демпфирования колебаний сохраняется. Нечеткий регулятор реализован с помощью треугольных функций принадлежности с равномерным заполнением всего диапазона изменения входной переменной l .

Исследуем влияние количества точек линеаризации на качество демпфирования упругих колебаний. Для этого рассмотрим два дополнительных случая: линеаризация в точках от 4 до 10 м с шагом 2 и 3 м, и сравним полученные результаты с изложенными в указанной работе. Для этого выполним моделирование трех исследуемых систем. В качестве критерия оценивания рассмотрим временные диаграммы приводных усилий двигателей, приведенные на рисунке 2.

Выбор данных величин обусловлен в том числе и требованиями к обеспечению отсутствия буксования за счет ограничения величины ускорения во всех режимах работы.

Разгон осуществлялся при $l=6$ м, а торможение — при $l=9$ м. Результаты моделирования показали, что система, синтезированная с шагом 3 м, показала значительное увеличение пиковых значений тяговых усилий, что недопустимо с точки зрения требований безопасности, а при линеаризации модели с шагом 2 м наблюдается незначительное ухудшение качества переходных процессов.

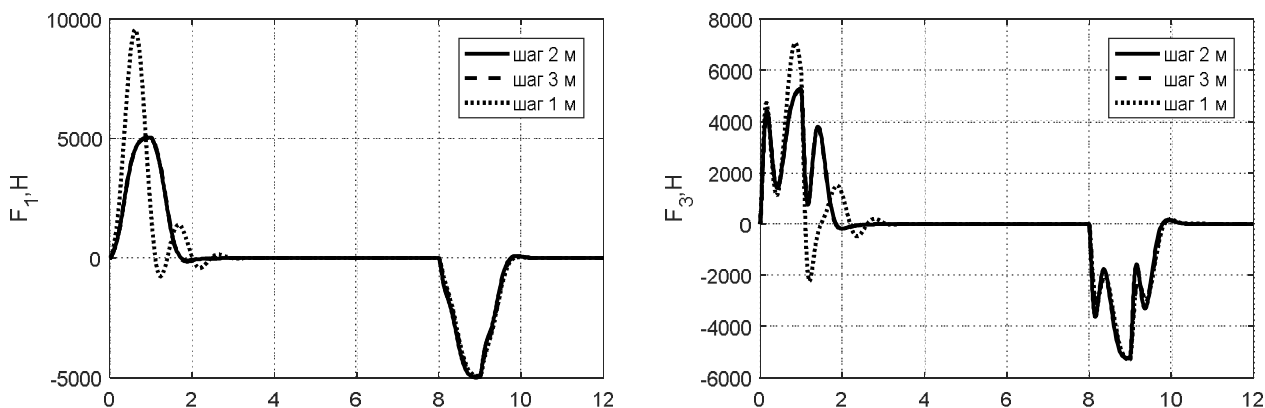


Рисунок 2 — Временные диаграммы тяговых усилий двигателей

Из полученных результатов можно сделать вывод, что система Такаги-Сугено-Канга сохраняет работоспособность и обеспечивает эффективное демпфирование колебаний даже при небольшом количестве точек линеаризации.

Выбор количества точек должен осуществляться на основании предварительного оценочного расчета и анализа характера изменения коэффициентов модального регулятора в функции положения тележки. В дальнейшем планируется расширить полученные результаты на краны с большей длиной пролета и оценить возможности использования рассмотренной структуры системы модального управления для управления объектом с переменной структурой.

Список литературы

1. Xing, X. PDE Modelling and Vibration Control of Overhead Crane Bridge with Unknown Control Directions and Parametric Uncertainties / X. Xing, J. Liu // *IET Control Theory & Applications*. — 2020. — Vol. 14. — Iss. 1. — P. 116–126.
2. Model Based Decoupling Control Method for dual Drive Gantry Stages: A case study with Experimental Validations / I. Garcia-Herreros, X. Kestelyn, J. Gomand, R. Coleman, and P.-J. Barre // *Control Engineering Practice Publ.* — 2013. — Vol. 21. — P. 298–307.
3. Палис, Ф. Анализ поперечных колебаний мостового крана при изменении положения тележки / Ф. Палис, О. И. Толочко, Д. В. Бажутин // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : збірник наукових праць. Серія : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика.* — Х. : НТУ «ХПІ». — 2013. — № 36 (1009). — С. 36–39.
4. Liu, H. Partial-State-Feedback Controller Design for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems Using Homotopy Method / H. Liu, F. Sun, Z. Sun, C. Li // *Proceedings of 2004 American Control Conference*. — P. 447–452.
5. Tolochko, O. Suppression of Structural Vibrations of an Overhead Crane Using Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Controller / O. Tolochko, D. Bazhutin // *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. — Saint Petersburg, 2020. — P. 1–6.

РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, УПРАВЛЯЕМЫЙ ПО РОТОРУ, С ПОВЫШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Регулируемые электроприводы (ЭП) завоевывают области применения нерегулируемых как для обеспечения технологических характеристик, так и с целью энергосбережения. При этом предпочтение отдается асинхронным ЭП, поскольку асинхронные машины (АМ) имеют лучшие массогабаритные показатели, более высокую надежность и срок службы, проще в обслуживании и ремонте [1].

В настоящее время целый ряд механизмов (механизм главного подъема шахтных подъемных установок, манипуляторы прокатных станов и др.) оборудованы ЭП на базе АМ с фазным ротором (ФР). Обеспечивая высокую надежность работы, приемлемые динамические показатели, такие ЭП зачастую имеют или малый диапазон регулирования скорости, или низкие энергетические показатели, или высокую чувствительны к различного рода возмущениям.

Учитывая вышесказанное, актуальной представляется задача разработки ЭП на базе АМ с ФР, лишенного вышеуказанных недостатков [2]. Кроме того, использование современных достижений в области силовой электроники (мощные IGBT-транзисторы в качестве ключей для регулируемого источника тока в роторной цепи) позволяет повысить энергетические показатели работы ЭП.

На рисунке 1 приведен внешний вид лабораторного стенда для исследования разработанного регулируемого ЭП.

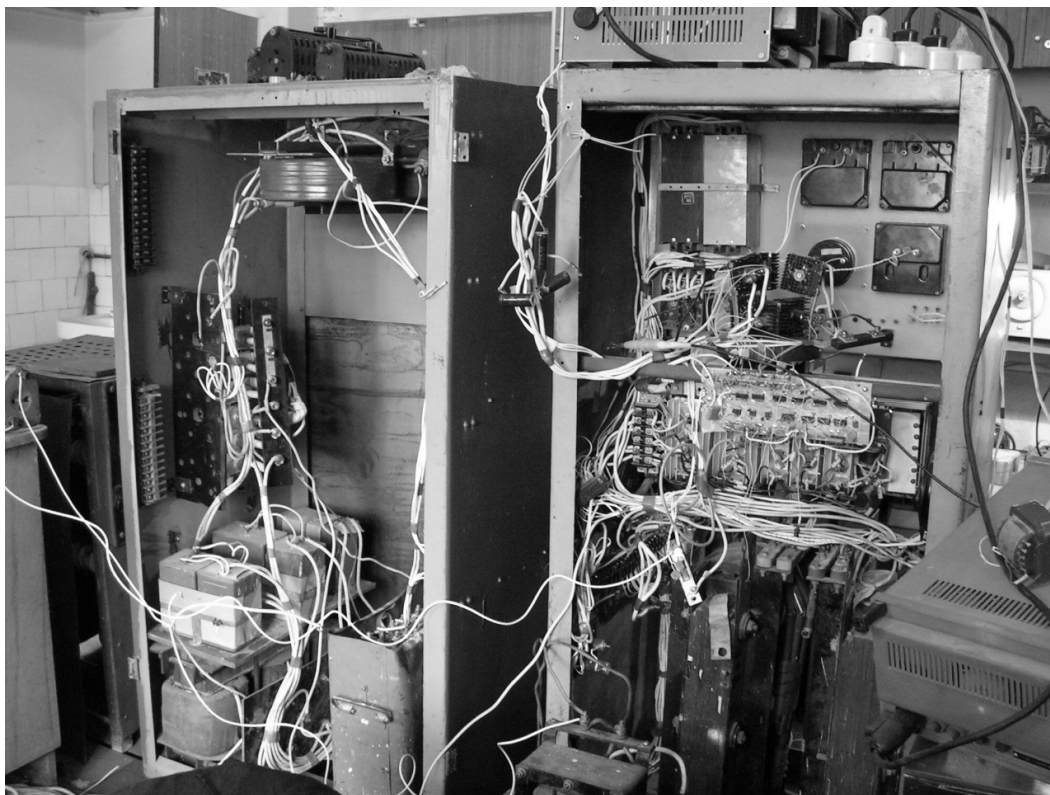


Рисунок 1 — Внешний вид лабораторного стенда для исследования разработанного ЭП

На рисунке 2 представлена функциональная схема лабораторного стенда. В состав стенда входят двигатель М1 (машина АК-52-6), машина М3 для формирования момента сопротивления на валу установки, соединенная с машиной М1 через муфту, в качестве датчика синхронизации (датчика э. д. с.) выступает микромашина М2.

Для формирования сигналов обратных связей применяются датчики тока, напряжения преобразователя и скорости. В качестве датчика скорости используется тахогенератор BR, датчики токов ротора UA1, датчик выпрямленного тока ротора UA2, датчик линейных напряжений ротора UV3, датчик напряжения цепи выпрямленного тока UV4.

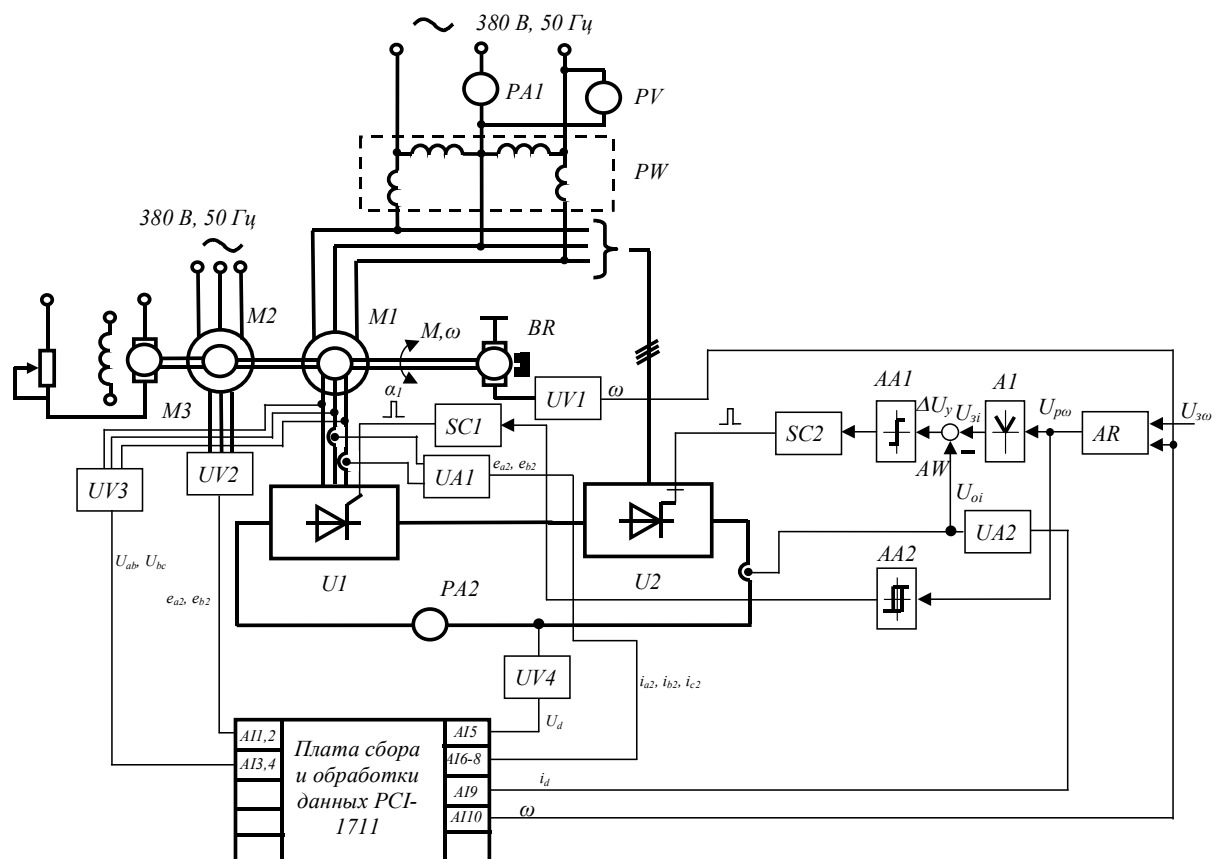


Рисунок 2 — Функциональная схема лабораторного стенда для исследования разработанного ЭП

Проведенные экспериментальные исследования позволяют говорить о том, что разработанный асинхронный ЭП позволяет получить высокие энергетические (коэффициенты мощности сетевого и роторного преобразователя могут достигать единицы, привод электромагнитно совместим с питающей сетью) и динамические показатели (предельное быстродействие контура тока благодаря РИТ).

Список литературы

1. Зеленев, А. Б. Асинхронный электропривод на базе машины двойного питания / А. Б. Зеленев, И. С. Шевченко, И. А. Карпук // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2000. — № 1 (6). — С. 57–64.
2. Карпук, И. А. Асинхронный вентильный каскад, управляемый по ротору, с повышенными динамическими и энергетическими показателями / И. А. Карпук, А. Г. Щелоков // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2016. — Вып. 46. — С. 96–101.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ФИКСИРОВАННОЙ ЧАСТОТЕ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Как известно, действующая система регулирования в процессе эксплуатации может подвергаться свойственным изменениям в динамике, что влечет за собой потерю качества управления. В подобной ситуации для сохранения эффективности функционирования системы необходимо по заданному критерию качества проводить повторный расчет оптимального закона управления. Однако проводить каждый раз подобные процедуры достаточно громоздко и не целесообразно в случае, если известна закономерность в изменении динамики объекта.

В [1] был рассмотрен случай с расходом потока вещества через трубопровод в качестве объекта управления. Данный технологический параметр зависит от степени открытия регулирующего органа: чем больше степень открытия, тем больше вещества можно транспортировать за единицу времени через данный участок, а значит, и скорость потока будет больше. Недостаток работы [1] заключается в графическом определении параметра изменения, который при разных зависимостях между изменениями параметров объекта будет отличаться. В результате каждый раз необходимо иметь под рукой графики и затрачивать время на определения поправочного коэффициента. Цель же данного труда в обобщении процедуры коррекции параметров ПИ-регулятора по методу вспомогательной функции [2] для всевозможных значений поправочных коэффициентов.

Рассмотрим предлагаемый алгоритм на примере из [1], где в качестве модели объекта управления предлагается следующая непрерывная передаточная функция

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}}{(T_{об} \cdot s + 1)^2}, \quad (1)$$

где $K_{об}$ — коэффициент пропорциональности объекта управления; $T_{об}$ — постоянная времени объекта управления, с; s — оператор Лапласа.

В качестве управляющего устройства используется ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{ПИ}(s) = \frac{K_n \cdot T_u \cdot s + K_n}{T_u \cdot s}, \quad (2)$$

где K_n — коэффициент пропорциональности регулятора; T_u — время интегрирования регулятора, с.

Процесс оптимизации разделен на два основных этапа.

На первом этапе проводится проверка фиксированной частоты ω_0 , являющейся резонансной при первоначальной оптимизации системы. Для этого на вход системы подается генератор синусоидальных колебаний круговой частоты ω_0 . После прохождения переходного процесса рассчитывают частотные характеристики замкнутой системы на этой частоте. Если выполняется условие оптимальности

$$A_{зс}^*(\omega_0) = M, \quad (3)$$

где $A_{зс}^*(\omega_0)$ — значение амплитудо-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы на частоте ω_0 ; ω_0 — фиксированная частота, рад/с; M — заданный частотный показа-

тель колебательности, то система настроена оптимально и подстройки параметров регулятора не требуется. В противном случае проводится определение коэффициентов изменения объекта управления по следующим выражениям

$$D_{Ko} = \frac{A_{3c}^*(\omega_0)}{A_{3c}(\omega_0)} \cdot \sqrt{\frac{1 - A_{3c}(\omega_0) \cdot [2 \cdot \cos(\varphi_{3c}(\omega_0)) + A_{3c}(\omega_0)]}{1 - A_{3c}^*(\omega_0) \cdot [2 \cdot \cos(\varphi_{3c}^*(\omega_0)) + A_{3c}^*(\omega_0)]}}, \quad (4)$$

$$K_1 = \arctg\left(\frac{\sin(\varphi_{3c}(\omega_0))}{\cos(\varphi_{3c}(\omega_0)) - A_{3c}(\omega_0)}\right) + \arctg\left(\frac{1}{T_u \cdot \omega_0}\right), \quad (5)$$

$$K_2 = \arctg\left(\frac{\sin(\varphi_{3c}^*(\omega_0))}{\cos(\varphi_{3c}^*(\omega_0)) - A_{3c}^*(\omega_0)}\right) + \arctg\left(\frac{1}{T_u \cdot \omega_0}\right), \quad (6)$$

$$D_{To} = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{-K_2}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{-K_1}{2}\right)}, \quad (7)$$

где $A_{3c}(\omega_0)$ — значение АЧХ замкнутой системы на частоте ω_0 при первоначальной оптимизации; $\varphi_{3c}(\omega_0)$ — значение фазо-частотной характеристики (ФЧХ) замкнутой системы на частоте ω_0 при первоначальной оптимизации; $\varphi_{3c}^*(\omega_0)$ — значение ФЧХ замкнутой системы на частоте ω_0 ; D_{Ko}, D_{To} — меры изменения коэффициента пропорциональности и постоянной времени объекта соответственно; K_1, K_2 — вспомогательные коэффициенты для расчета D_{To} .

На втором этапе проводится расчет новой частоты резонанса и коррекция параметров настройки при постоянном М. Частота резонанса определяется по формуле

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{D_{To}}, \quad (8)$$

после чего происходит коррекция параметров регулятора структуры (2)

$$K_n^{onm} = \frac{K_n}{D_{Ko}}, \quad (9)$$

$$T_u^{onm} = T_u \cdot D_{To}. \quad (10)$$

Предлагаемый метод оптимизации позволяет обобщить идеи метода фиксированной частоты [1] на случай отсутствия информации о функциональной зависимости изменений параметров объекта структуры (1). В качестве дальнейших исследований предполагается поиск упрощенных вычислительных алгоритмов для объектов более сложной структуры с применением идей, изложенных в данной работе.

Список литературы

1. Коцемир, И. А. Параметрическая оптимизация действующих локальных систем регулирования по данным о системе на фиксированной частоте / И. А. Коцемир, В. С. Овдей // Донбасс будущего глазами молодых ученых : сборник материалов научно-технической конференции (19 ноября 2019 г.). — Донецк : ДонНТУ, 2019. — С. 32–35.
2. Ротач, В. С. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / В. Я. Ротач. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с.

О НЕКОТОРОМ ПРИКЛАДНОМ ПОДХОДЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА SP-ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

Стремление к расширению применимости любого вычислительного аппарата в пределах поставленных задач порождает новые проблемы и вопросы, на которые необходимо найти ответы. Уменьшение ограничений, упрощение алгоритма вычислений или сокращение его количества расчетов, модификация и более удобная интерпретация на практике. Все эти нововведения в исходный метод позволяют приобрести вычислительному аппарату новых или усовершенствованных в наличии функций, которые используются в практических расчетах исследователями.

Основная цель метода SP-идентификации [1, 2] заключается в отыскании линейной структуры модели объекта идентификации в форме дискретной или, при необходимости, непрерывной передаточных функций. При этом определяются, параллельно структуре, и численные величины параметров модели. Несмотря на нелинейность большинства окружающих нас динамических процессов, описание динамики теплоэнергетических и ряда др. объектов управления возможно в терминах линейных систем управления. Выбор, павший именно на рассматриваемый метод SP-идентификации, как уже было отмечено в работах [1, 2], позволяет получить достаточно точный, не затратный в плане вычислений метод экспериментальной идентификации, как параметрической, так и структурной.

Ранее считалось, что метод SP-идентификации работоспособен при эксперименте с идеальными входными сигналами рода функций Хевисайда и Дирака, подаваемых напрямую на объект идентификации, т. е. в разомкнутом контуре. Данный подход значительно ограничивает метод и не позволяет его использовать для многих задач, в том числе для внедрения в систему с целью последующей адаптации или оптимизации закона управления.

Позже, в работах [3, 4] были рассмотрены другие классы сигналов и их применимость как в получении линейной модели объекта управления, так и для проведения технической диагностики гидроаппаратуры. Данные результаты подводят к вопросу реализации процедуры идентификации в замкнутом контуре, где входной сигнал является криволинейным.

В качестве простого примера рассмотрим идентификацию в замкнутом контуре апериодического звена первого порядка, модель которого в общем случае представляется непрерывной передаточной функцией (НПФ) вида

$$W_{ob}(s) = \frac{K_{ob}}{T_{ob} \cdot s + 1}, \quad (1)$$

где K_{ob} , T_{ob} — коэффициент передачи и постоянная времени передаточной функции объекта идентификации (параметры модели апериодической структуры первого порядка); s — оператор Лапласа.

В качестве закона управления возьмем усилитель с коэффициентом K_p , алгоритм аппроксимации — общее разложение Вискватова в правильную С-дробь. Ниже приводится пошаговое описание алгоритма инженерного расчета модели (1).

Шаг 1. Измерение вход-выходных данных объекта идентификации на протяжении переходного процесса.

На протяжении переходного процесса с постоянным шагом дискретизации регистрируются численные значения выходных сигналов регулятора и объекта. В результате получаем две числовые последовательности

$$X = \{x(0 \cdot \Delta t), x(1 \cdot \Delta t), \dots, x(n \cdot \Delta t)\}, \quad (2)$$

$$Y = \{y(0 \cdot \Delta t), y(1 \cdot \Delta t), \dots, y(n \cdot \Delta t)\}, \quad (3)$$

где X, Y — отсчеты входного и выходного сигналов идентифицируемого объекта в моменты времени переходного процесса $i \cdot \Delta t$, $i = 0, 1 \dots n$; Δt — шаг дискретизации, с.

Количество необходимых отсчетов данных сигналов (длина числовых последовательностей) определяется экспериментально. Регистрация останавливается при успешном определении установившегося значения выходного сигнала по окончании переходного процесса.

Шаг 2. Проверка соответствия сходящейся модели виду (1).

После регистрации экспериментальных данных (2) и (3) ведется просчет структуры линейной модели объекта. Для этого рассчитывается идентифицирующая матрица M согласно методу SP-идентификации [1]. Условие сходимости линейной модели объекта к апериодическому звену первого порядка может быть представлена следующими равенствами

$$N = 2 \text{ или } M(5,1) \approx 0, \quad (4)$$

где N — количество расчетных элементов первого столбца идентифицирующей матрицы M ; $M(5,1)$ — элемент идентифицирующей матрицы M , стоящий в ее пятой строке и первом столбце.

В случае выполнения равенств (4) переходят к шагу 3. Если же (4) не выполняется, то структура линеаризованной модели другая и необходимо использовать другие расчетные формулы для параметрической части идентификации. Также возможен ошибочный выбор величины шага дискретизации или области переходного процесса, используемой алгоритмом в процессе аппроксимации. Наконец, исследуемый объект может быть существенно нелинейным, что ставит под сомнение уместность выбора метода идентификации.

Шаг 3. Определение параметров модели.

Для определения коэффициента передачи объекта воспользуемся выражением

$$K_o = \frac{y(\infty)}{K_p \cdot (1 - y(\infty))}, \quad (5)$$

где $y(\infty)$ — установившееся значение на выходе объекта после окончания переходного процесса.

Определение постоянной времени модели (1) производится по формуле

$$T_o = \frac{-\Delta t}{\ln(|z_n|)}, \quad (6)$$

где z_n — полюс дискретной передаточной функции, получаемой при свертке сходящейся цепной дроби.

Параметры, определяемые в замкнутом контуре, подвергаются искажениям, причиной которых является наличие обратной связи. Поэтому для достаточно точного определения инерционной части модели необходимо проводить коррекцию полученного результата по (6).

Для рассматриваемой структуры замкнутой системы и объекта конечная формула для определения постоянной времени (1) будет иметь следующий вид

$$T_o = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{z_n - y(\infty)}{1 - y(\infty)}\right) \cdot (1 - y(\infty))}. \quad (7)$$

Детальный анализ процедуры SP-идентификации позволяет разработать инженерные методы для идентификации объектов, сходящихся в процессе аппроксимации к простым ли-

нейным структурам. В свою очередь, данный подход можно использовать в дальнейшем для синтеза систем управления, алгоритмов оптимизации и адаптации. Однако при сложной структуре объекта управления найти корректирующие формулы намного сложнее в связи с большим количеством неизвестных.

Список литературы

1. Карташов, В. Я. Структурно-параметрическая идентификация динамических объектов в режиме реального времени / В. Я. Карташов, Л. В. Карташова, С. С. Самойленко // Вестник Кемеровского государственного университета. — Кемерово : Изд-во КемГУ, 2015. — № 1. — С. 13–18.
2. Овдей, В. С. SP-идентификация объектов управления при линейно нарастающем входном воздействии / В. С. Овдей, Р. Ю. Ткачев // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых : сборник научных трудов XX международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (26–28 мая 2020 г.). Донецк : ДонНТУ, 2020. — С. 161–164.
3. Ткачев, Р. Ю. Применение алгоритма SP-идентификации для диагностики состояния объемного гидропривода / Р. Ю. Ткачев, В. С. Овдей // Вестник ЛГУ им. В. Даля. — 2020. — № 11 (41). — С. 195–200.
4. Ткачев, Р. Ю. Диагностика технического состояния объемного гидропривода на основе дискретных данных при изменении нагружающего воздействия / Р. Ю. Ткачев, В. С. Овдей // Инновационные перспективы Донбасса (24–26 мая 2021 г.). — 2021. — Т. 3. — С. 48–52.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В настоящее время повышаются требования к энергетической эффективности и экологической безопасности транспортных средств (ТС). Одним из возможных решений данных проблем является применение на ТС топливных элементов (ТЭ). Задачей настоящего исследования является оценка положительных и отрицательных сторон при использовании ТС на водородных ТЭ.

Перспективы развития

ТЭ представляют собой электрохимические устройства, вырабатывающие электроэнергию химическим путём. Для этого используются такие химические элементы как кислород и водород. Побочным продуктом при этом является вода.

Перспективы развития ТС на водородных ТЭ существенны. Из них следует выделить следующие [1]:

1. Повышение экологической и энергетической безопасности

Использование водорода ведёт к снижению выбросов углерода, серы и азота за счёт того, что при использовании топливного элемента выделяются только вода, тепло и электроэнергия.

Уменьшается негативное влияние на окружающую среду — в отличие от добычи ископаемых видов топлива, таких как каменный уголь, нефть, сланец, водород может быть получен с использованием возобновляемых источников энергии [2].

На данный момент существуют технологии, которые позволяют менее чем за миллисекунду синтезировать различные фото- и электрокатализаторы для получения водорода: карбиды вольфрама, молибдена, хрома и другие [3].

2. Технические преимущества

ТЭ могут работать на водороде, который получается из различных видов углеводородного топлива. Эффективность в работе ТЭ может быть увеличена путём использования тепла, которое выделяется при сгорании водорода. Примером такого использования является отопление салона ТС в холодное время года.

Поскольку водородная установка обладает практически нулевыми выбросами вредных веществ, а также является бесшумной — это даёт дополнительные возможности применения на ТС.

Отдельно следует отметить более высокую теоретическую удельную энергию водорода ($33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$ [4]) в сравнении с традиционным углеводородным топливом (около $12 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$) и современными литий-ионными аккумуляторами (в среднем $0,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$). Этот потенциал делает водород особенно привлекательным энергоносителем для ТС.

Проблемы развития

1. Выбросы от скважины до колеса

В отчёте компании IDTechEx, осуществляющей аналитические исследования применительно к различным отраслям промышленности, приводятся сведения о выбросах парниковых газов от источника первичного топлива до колес ТС на ТЭ [5]. Результаты анализа показывают, что наиболее привлекательный, с точки зрения экологической чистоты, процесс производства 1 кг водорода путём электролиза воды достаточно энергозатратен и требует около $50 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии. То есть экологическая безопасность применения такого топлива будет определяться, главным образом, технологией получения электроэнергии для такого производства. В этой связи использование возобновляемых источников электроэнергии для решения указанной задачи способно минимизировать выбросы парниковых газов. Однако процесс получения такого «зелёного» водорода сегодня является дорогостоящим.

В настоящее время широко применяется способ получения водорода путем паровой конверсии метана. Этот процесс дешевле, но связан со значительными выбросами CO₂.

2. Стоимость водородного топлива

На данный момент стоимость одного километра пути транспортного средства, использующего водородные ТЭ, выше аналогичного показателя для автомобиля с литий-ионной аккумуляторной батареей. Поэтому источник дешёвого «зелёного» водорода будет иметь решающее значение в развитии ТС на водородных ТЭ. Особенно на фоне того, что для всех случаев требуется создание специализированной инфраструктуры [6].

Использование водорода в качестве основного энергоносителя приведёт к созданию принципиально новой водородной экономики, станет научно-техническим прорывом, но для того, чтобы его внедрение было оправдано, потребуется преодолеть проблемы, связанные с возобновляемыми источниками энергии.

Список литературы

1. Беляев, С. В. Перспективы применения водородных топливных элементов на автомобилях / С. В. Беляев // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. — 2005. — № 5. — С. 6–9.
2. Перспективы и проблемы развития водородной энергетики и топливных элементов [Электронный ресурс] // ОАО ГМК «Норильский никель». — Режим доступа: http://www.ngfr.ru/article/pdf/031110_Presentation_cells_1.pdf (дата обращения: 13.04.2022).
3. Поедем на водороде? Как обстоят дела с самыми экологически чистыми автомобилями [Электронный ресурс] // Национальная ассоциация нефтегазового сервиса : сайт. — Режим доступа: <https://nangs.org/news/renewables/ev/poedem-na-vodorode-kak-obstoyat-dela-s-samymi-ekologicheski-chistymi-elektromobilyami> (дата обращения: 13.04.2022).
4. Handwerker, M. Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy / M. Handwerker, J. Wellnitz, H. Marzbani // Hydrogen. — 2021. — No. 2 (1). — P. 76–100.
5. Fuel Cells Are Not the Problem, the Hydrogen Fuel Is [Electronic resource] // Idtechex. — Access mode: <https://www.idtechex.com/en/research-article/fuel-cells-are-not-the-problem-the-hydrogen-fuel-is/25913> (дата обращения: 13.04.2022).
6. Водородная экономика — путь к низкоуглеродному развитию [Электронный ресурс] / Т. Митрова, Ю. Мельников, Д. Чугунов, А. Глаголева // Центр энергетики Московской школы управления «Сколково». Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Rus.pdf (дата обращения: 13.04.2022).

Динкель О. А.
старший преподаватель
Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, РФ

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ДОПУСТИМЫХ НОРМ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Вследствие технического прогресса у электроприемников городских потребителей стремительно меняются технические характеристики.

Качество электрической энергии на шинах электростанции не гарантирует ее качество в точке присоединения потребителя. Оно может быть различно до и после включения потребителя, изменяться в зависимости от режима как СЭС в целом, так и технологического процесса потребителя.

Электрические нагрузки в жилом секторе ежегодно возрастают, причем этот рост происходит неравномерно. За счет неравномерности загрузки фаз в сетях до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью возникает несимметрия напряжения, а также неуравновешенность напряжения как в аварийных, так и в нормальных режимах работы.

Анализ электропотребления показал, что за 20 лет потребляемая электрическая энергия кВт·ч/чел вырос в 2,5 раза, а также значительно увеличилось число нелинейной нагрузки, вызывающей в системе электроснабжения искажения синусоидальности кривой напряжения и высшие гармоники.

Были произведены замеры показателей качества электрической энергии тремя измерительными приборами: Ресурс-UF2(М), Ресурс-ПКЭ и Энергомонитор. В качестве объектов исследования были выбраны общественные и жилые здания Центрального района г. Кемерово с различными электроприемниками.

Центральный район г. Кемерово в первую очередь характеризуется старым жилым и административно-хозяйственным фондом насыщенным огромным количеством современных электроприемников. Распределительные электрические сети центрального района в среднем были проложены в 50–60-х годах прошлого столетия и на сегодняшний день морально и технически устарели.

Полученные результаты обработаны с помощью математической статистики для выявления числа превышений по каждому измеряемому показателю качества электрической энергии за период измерения. В ходе обработки выявили, что наибольшее число отклонений от нормируемых значений имеет: отклонение напряжения; коэффициент несимметрии нулевой последовательности, что характеризует несимметрию напряжения; несинусоидальность напряжения; колебания напряжения.

На рисунке 1 приведен график отклонения фазных напряжений Училища культуры г. Кемерово.

По графику видно, что процесс изменения параметров рабочего режима в СЭС является случайным. Это связано со случайным характером изменения нагрузок и соответствующим случайным характером изменения показателей качества электрической энергии. В этом случае для оценки соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 32144-2013 применяется вероятностно-статистический метод контроля качества электрической энергии. Все нормируемые значения были представлены последовательностью случайных величин.

При использовании вероятностных методов рассматривают кривые распределения нормируемых случайных величин. Они устанавливают связь между возможными значениями случайной величины и вероятностью их появления.

На рисунке 2 приведем пример построения кривых распределения нормируемых случайных величин для одного ввода Училища культуры г. Кемерово, так как исходя из статистического анализа отклонений напряжения было выявлено, что наибольшее число отклонений напряжения от допустимых норм на обоих вводах зафиксировано у Училища культуры.

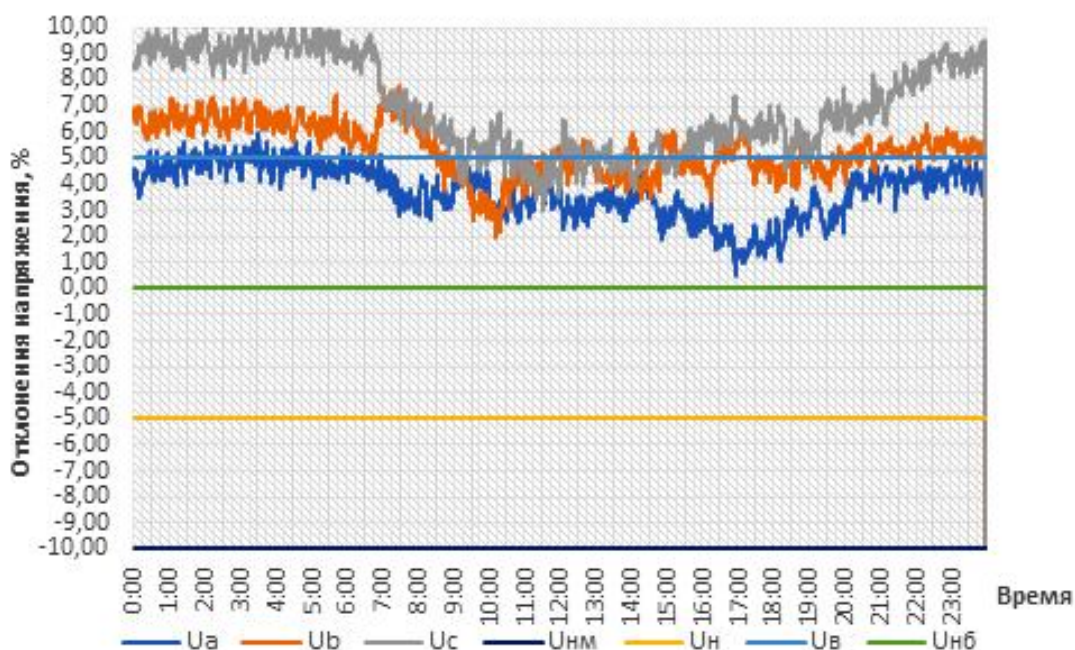


Рисунок 1 — Графики отклонений фазных напряжений на вводе Училища культуры

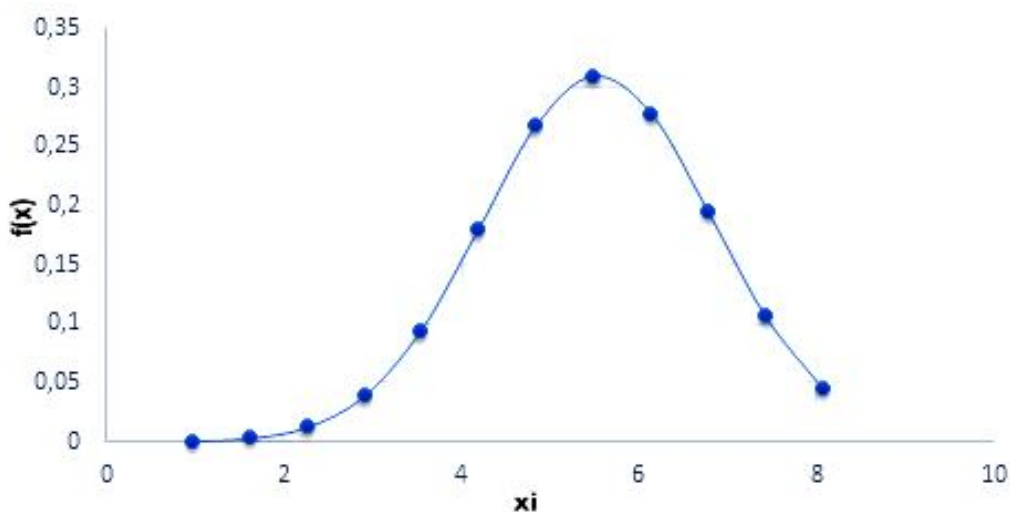


Рисунок 2 — Кривая нормального закона распределения $f(x_i)$ отклонения напряжения для одной фазы

Аналогично был произведен статистический анализ по всем показателям качества электрической энергии для шести потребителей электрической энергии. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Одной из основных проблем у всех потребителей является неравномерность нагрузки фаз, что влечет за собой появления несимметрии токов и напряжений в электрических сетях в нормальном режиме работы.

В следствии увеличения в городской электрической сети потребителей с нелинейными нагрузками, в процессе анализа результатов замеров были выявлены несинусоидальности тока на некоторых объектах. Несинусоидальность характеризуется коэффициентами несинусоидальности фазных и междуфазных напряжений, коэффициентами n -ых гармонических составляющих напряжений.

Таблица 1 — Сводные результаты статистического анализа отклонения показателей качества электроэнергии от норм, установленных ГОСТ 32144-2013

п/п	Объект исследования	δ_U	k_{2U}	K_{0U}	K_U	P_{st}	Провал напряжения	Перенапряжение
1	Училище культуры. Ввод № 1	+	-	+	+	-	-	+
	Училище культуры. Ввод № 2	+	-	+	-	+	-	+
2	МОУ «Средняя общеобразовательная школа № 35». Ввод № 1	+	-	+	-	-	-	+
	МОУ «Средняя общеобразовательная школа № 35». Ввод № 2	+	-	+	-	-	-	+
3	Многоквартирный жилой дом (28 квартир)	+	-	+	+	+	+	-
4	Театр драмы Кузбасса им. А. В. Луначарского. Ввод № 1	+	-	+	-	-	-	-
	Театр драмы Кузбасса им. А.В. Луначарского. Ввод № 2	+	-	+	+	+	-	-
5	Центральная детская школа искусств. Ввод №1	+	-	+	+	-	-	-
	Центральная детская школа искусств. Ввод №2	+	-	+	-	-	-	-
6	Индивидуальный жилой дом	+	-	-	+	+	+	+

При работе электроприемников с резкопеременной ударной нагрузкой в электрической сети возникают резкие толчки потребляемой мощности. Это вызывает резкие изменения напряжения в электрической сети, размахи которых могут достигнуть существенных значений.

Поддержание качества электроэнергии в допустимых пределах у всех приемников электроэнергии представляет чрезвычайно сложную задачу, так как на него влияет множество факторов как местного, так и общесистемного характера. Эти факторы имеют различную длительность воздействия и отличаются по степени влияния. Кроме того, все показатели связаны с общим количеством энергии, потребляемой за отчетный период.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2013–22–07. — М. : Стандартинформ, 2014. — 19 с.
2. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. правила проектирования и монтажа. — Введ. 2017-03-02. — М. : Стандартинформ, 2015. — 92 с.

Захаров А. В.
аспирант,
Розкаряка П. И.
к.т.н., доцент,
Мирошник Д. Н.
к.т.н., доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГИБРИДНОГО ИСТОЧНИКА «АККУМУЛЯТОРНАЯ БАТАРЕЯ-СУПЕРКОНДЕНСАТОР» ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Согласно распоряжению правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р была принята концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта. В документе описаны основные цели и задачи для развития электротранспортной инфраструктуры в РФ. Основными задачами являются запуск собственного производства транспортных средств и введение в эксплуатацию зарядных станций, в том числе быстрой зарядки, и производство отечественных тяговых аккумуляторных батарей и компонентов к ним и сопутствующих систем на период до 2030 года.

Электрические автомобили в основном используют в качестве источника энергии Li-ion ячейки. Использование таких ячеек обусловлено высокой удельной емкостью электроэнергии порядка 150–180 Вт·ч/кг, что является одним из самых высоких показателей среди конкурентов. Такие ячейки имеют невысокую удельную мощность, порядка 370 Вт/кг, что вносит ограничения по допустимому значению ускорения электромобиля при малых габаритах источника питания. Для решения этой проблемы используется гибридная связка суперконденсатора (СК) и li-ion батареи [1–5]. СК в данной связке используется как источник высокой удельной мощности, которая достигает 10 кВт/кг, что позволяет уменьшить массогабаритные параметры источника питания электромобиля, улучшив при этом параметры его пиковой мощности.

Помимо улучшения допустимых значений ускорения использование СК позволяет увеличить срок службы батареи электромобиля за счёт снижения величины зарядного/разрядного тока АКБ, а также снижения его пульсаций. Также СК имеет КПД около 98 % против 91 % у li-ion батареи, что позволяет использовать его как более эффективный буфер для энергии рекуперации и дальнейшей её отдачи двигателю.

Использование СК имеет свои особенности, например, необходимость использовать балансировку и систему контроля перезаряда для защиты СК от преждевременного выхода из строя.

Стоит отметить, что использование СК имеет и недостатки, в частности — это высокая стоимость самого СК и необходимость дополнительного оборудования для работы с ним. Помимо стоимости можно отметить, что СК имеет линейный график разрядки и для полноценного использования всей ёмкости СК необходимо исследовать вопрос его глубокого разряда, что позволит устанавливать СК меньшей ёмкости и хорошо скажется на массогабаритных показателях устройства.

Уменьшение массогабаритных показателей является важной задачей, поэтому важно выбрать правильную топологию источника питания электромобиля для оптимизации данных показателей.

Выделяют различные топологии гибридных источников [6], они разделяются на активные и пассивные. В пассивных связках АКБ устанавливается параллельно с СК и таким образом увеличивается допустимое ускорение (временное) и улучшается срок службы АКБ за счёт уменьшения пульсаций тока АКБ. Также можно отметить простоту реализации, однако такой подход не использует весь потенциал мощности СК из-за его линейной характеристики разряда, также отсутствие повышающего преобразователя на выходе не позволяет регулировать напряжение на входе инвертора, что негативно сказывается на работе устройства.

Активные топологии используют в своём составе один или несколько повышающих DC/DC преобразователей. Наиболее перспективной является топология с преобразователями в обоих цепях (отдельные преобразователи для АКБ и для СК) из-за высокой функциональности и возможности регулировать напряжение в звене постоянного тока перед инвертором. Также данная топология позволяет использовать различные сценарии работы связки АКБ и СК.

Повышающие преобразователи бывают различных видов [7], в электромобилях разумным выбором являются двунаправленные преобразователи, так как они позволяют не только отдавать энергию из источника в нагрузку, но и принимать её обратно, тем самым осуществляя режим рекуперации, что является одним из важнейших преимуществ электромобилей перед автомобилями с ДВС.

Как было отмечено выше, в электромобилях активно используют двунаправленные топологии повышающих преобразователей, которых существует множество видов [4], они разделяются на изолированные и неизолированные. Изолированные топологии имеют больший коэффициент усиления по напряжению, чем неизолированные, и гальваническую развязку так как имеют в своём составе трансформаторы. КПД таких преобразователей достигает 91,5 % при нагрузке в 30 кВт. Главным недостатком данных топологий является использование трансформатора, который ухудшает массогабаритные показатели устройства и КПД в целом.

Изолированные топологии имеют лучшие массогабаритные показатели и более высокую надёжность так как состоят из меньшего количества компонентов.

В настоящее время исследования в области энергоэффективности преобразователей для питания двигателя от источника постоянного напряжения показали очевидные достоинства чередующегося двунаправленного DC / DC преобразователя (Interleaved Boost Converter — IBC). Также отмечается компактный размер, многофункциональность, высокий КПД (до 92 % при нагрузке 30 кВт) и высокая надёжность.

Для гибридного электромобиля с СК лучшей топологией повышающего преобразователя является составной чередующийся повышающий преобразователь (Multidevice Interleaved DC-DC Bidirectional Converter — MDIBC) [4] (рис. 1).

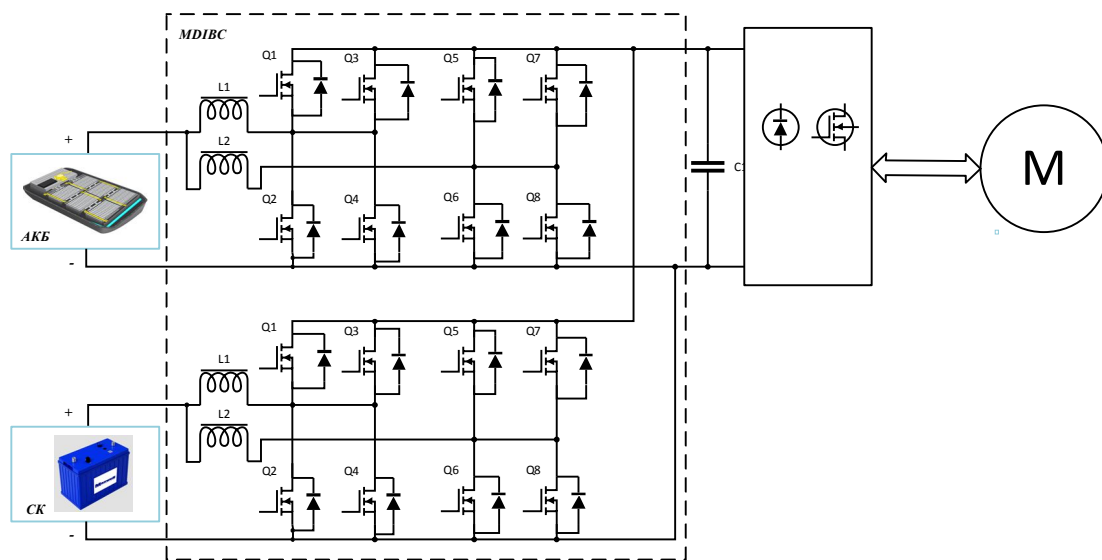


Рисунок 1 — Составной чередующийся повышающий преобразователь (MDIBC)

Данный тип преобразователя имеет КПД до 98 % при нагрузке 30 кВт. Главной особенностью MDIBC является разделение тока между несколькими фазами, что уменьшает пульсации тока на входах и выходе, и тем самым позволяет уменьшить емкость выходного конденсатора, установленного перед инвертором. Также MDIBC позволяют масштабировать нагрузку, эквивалентно параллельному включению преобразователей. Подобная возможность распараллелить токовую нагрузку каждой фазы преобразователя сопровождается уд-

воением фактической рабочей частоты коммутации индуктора, или улучшением его массогабаритных показателей. Также преимуществом является уменьшение зоны работы преобразователя в режиме прерывистых токов. MDIBC, являясь двунаправленным преобразователем, позволяет использовать энергию рекуперации, также он может применяться для совместного и отдельного использования энергии рекуперации АКБ и СК.

Повышение рабочей частоты повышающего преобразователя также возможно за счёт применения современных полупроводников на базе SiC ключей вместо Si [4]. Полупроводники на основе SiC имеют рабочие частоты выше аналогов на Si и малое падение напряжения в открытом состоянии, что может повысить КПД установки в целом.

Проведенный анализ позволяет выделить перспективные цели для дальнейших исследований:

1. Исследование механизма глубокого разряда СК. Это позволит более эффективно использовать ёмкость СК и уменьшить её базовое значение при той же производительности, а, следовательно, улучшит массогабаритные показатели системы питания электромобиля.

2. Исследование и разработка алгоритмов управления преобразователем напряжения (MDIBC) для реализации различных сценариев их совместной/раздельной работы. Применение качественных алгоритмов управления может обеспечить прирост запаса хода при прочих равных условиях эксплуатации электромобиля, а также увеличить срок службы АКБ за счёт снижения величины зарядного/разрядного тока АКБ и его уровня пульсаций.

Список литературы

1. Состояние и перспективы развития городского гибридного и электрического тягового электропривода в России / А. С. Анучин [и др.] // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по АЭП-2014. — Саранск : Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, 2014. — С. 24–28.

2. Are the electric vehicles more sustainable than the conventional ones? Influences of the assumptions and modeling approaches in the case of typical cars in China [Electronic resource] / Dan Zeng, Yan Dong, Huajun Cao, Yuke Li, Jia Wang, Zhenbiao Li, Michael Zwicky Hauschild // Resources, Conservation and Recycling. — 2021. — Vol. 167. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105210>.

3. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies [Electronic resource] / D-D. Tran, M. Vafaiepour, M. El Baghdadi, R. Barrero Fernandez, J. Van Mierlo, O. Hegazy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2020. — Vol. 119. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109596>.

4. DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends [Electronic resource] / Sajib Chakraborty, Hai-Nam Vu, Mohammed Mahedi Hasan, Dai-Duong Tra, Mohamed El Baghdadi and Omar Hegazy // Energies. — 2019. — Vol. 12. — Iss. 8. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.3390/en12081569>.

5. Li, Sh. Energy management for hybrid energy storage system in electric vehicle: A cyber-physical system perspective [Electronic resource] / Shuangqi Li, Hongwen He, Pengfei Zhao // Energy. — 2021. — Vol. 230. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120890>.

6. Electrical Double-Layer Capacitors in Hybrid Topologies — Assessment and Evaluation of Their Performance [Electronic resource] / Noshin Omar, Mohamed Daowd, Omar Hegazy, Peter Van den Bossche, Thierry Coosemans and Joeri Van Mierlo // Energies. — 2012. — Vol. 5. — Iss. 11. — Access mode: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/11/4533/>

7. Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview [Electronic resource] / Saman A. Gorji, Hosein G. Sahebi, Mehran Ektesabi et al. // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8811451>.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ КОЛЕБАНИЙ ОСНОВНОСТИ АГЛОМЕРАТА

На основании данных о перешихтовках доменной печи разработано веб-приложение структуры доменной шихты, которое в совокупности с алгоритмическим обеспечением для анализа эффективности технологического ведения печи на базе системы охлаждения Danieli Corus и реализованной в составе АСУ ТП доменной печи в виде подсистемы АССОД, позволяет связывать комплексную информацию о составе загруженной шихты с внешними тепловыми потерями, оценивать рациональность теплового режима работы печи и выявить оптимальный расход кокса в условиях колебаний основности агломерата.

Слои железорудных материалов определяют в целом газопроницаемость столба доменной шихты по сечению и в значительной мере определяется объемным содержанием мелочи в шихте [1].

При основности 1,2–2 прочность агломерата самая низкая [2]. В рамках производственной реальности агломерат с основностью в этих пределах является нормой (рис. 1). Таким образом, хрупкий агломерат способствует ухудшению газодинамики доменного процесса с повышенной вероятностью нарушений нормального схода шихты, что в свою очередь проявляется неравномерностью распределения тепловой нагрузки по поверхности шахты доменной печи.

Особенностью системы охлаждения доменной печи (ДП) является то, что на нее приходится 90–95 % внешних тепловых потерь ее рабочего пространства. Тепловая нагрузка на охлаждаемые элементы является одним из интегральных параметров работы как ДП в целом, так и отдельных ее периферийных зон [3]. Рассматриваемая в работе ДП работает с применением технологии вдувания угольной пыли, что является дополнительным фактором увеличения уровня внешних тепловых потерь [4].

Для обработки параметров и выявления факторов неравномерности тепловой нагрузки требуется применение специальной аналитической системы сбора и обработки данных (АССОД), учитывающей особенности доменного производства [5]. Разработанная на базе системы охлаждения Danieli Corus и реализованная в составе АСУ ТП ДП подсистема АССОД позволяет получать информацию о внешних тепловых потерях, определять степень перегрева по каждому из семи уровней охлаждения, оценивать рациональность теплового режима работы печи и рассчитывать относительную величину перерасхода кокса [6].

Целью данной работы является анализ тепловой неравномерности доменной печи с помощью системы сбора и обработки данных доменной печи и технологии 3D-моделирования в условиях колебаний основности агломерата.

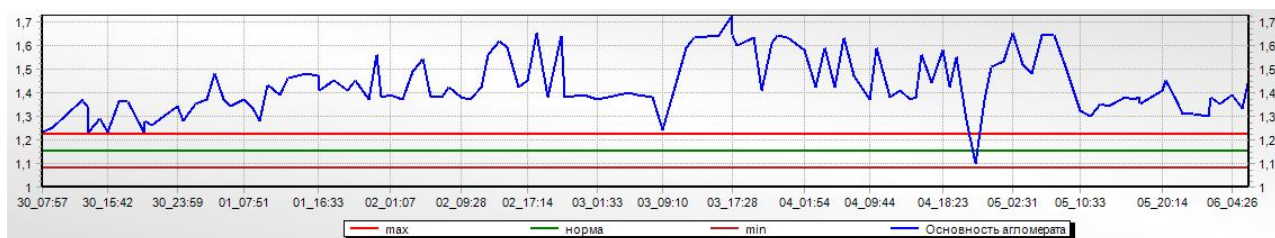


Рисунок 1 — Колебания основности агломерата за 7 суток

Колебания основности агломерата являются причиной перешихтовки, в результате чего меняется химический состав и соотношение загружаемых сырьевых компонентов доменного процесса. Это влечет изменение характера тепловых процессов внутри и снаружи ДП.

Разработанное программное веб-приложение «Шихтовая загрузка ДП», как показано на рисунке 2, позволяет оценить распределение подач шихты внутри объема печи с подробным анализом составных компонентов перешихтовок.

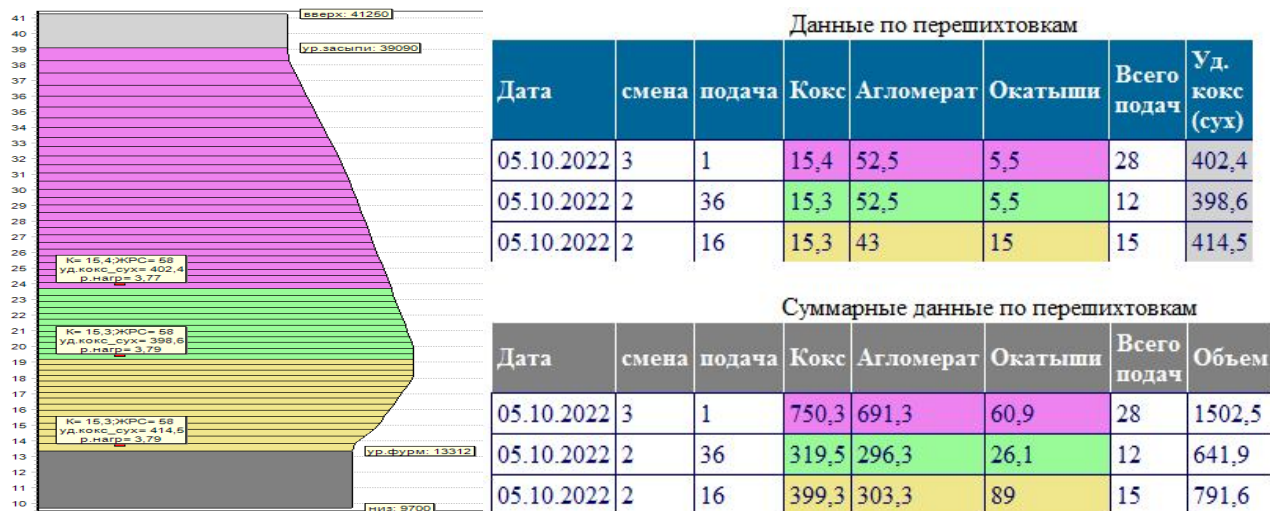


Рисунок 2 — Шихтовая загрузка доменной печи

Эти данные дают возможность сопоставления перешихтовок с разным количественным и качественным составом с детальными данными аналитической подсистемы АССОД по распределению тепловой нагрузки ДП и оценить рациональность теплового хода с учетом относительной величины перерасхода кокса. В перспективе есть вероятность создания комплексного многофакторного анализа распределения тепловой нагрузки с учетом параметров газодинамики доменного процесса, что является приоритетным направлением и связыванием технологии с экономической оценкой эффективности процесса в режиме реального времени. Если до этого в рамках АССОД была разработана методика анализа эффективности технологического ведения доменной печи, основанная на обработке годовых данных по системе охлаждения печи, где учитываются высокая суточная производительность, кондиция чугуна по содержанию фосфора и сере, суммарная удельная тепловая нагрузка, расход кокса, процент применения окатышей, то сейчас возникла перспектива оценки эффективности работы печи в суточный период.

Разработанное ПО веб-приложение «Шихтовая загрузка» в совокупности с ПО АССОД позволяет провести сравнительный анализ тепловой неравномерности доменной печи за сутки, позволяет оценить уровень технологического ведения домны и определять зоны перегревов, их величину и время динамической активности с учетом колебаний основности шихты и использования низкокачественного агломерата. Однако есть необходимость в дальнейших исследованиях.

Список литературы

1. Geerdes, M. Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction / Maarten Geerdes, HiskoToxopeus, Cor van der Vliet. — Second Edition. — Amsterdam : IOS Press, 2009. — 164 p.
2. Ефименко, Г. Г. Металлургия чугуна / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. — К. : Вища шк., 1981. — 295 с.
3. Контроль суммарной величины тепловых потерь с охлаждающей водой на печах доменного цеха и их практическое приложение / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, В. С. Листопадов и др. //

Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло: прошлое, современное состояние, будущее : сборник докладов международной научно-практической конференции (27–29 марта 2014 г., г. Екатеринбург). — Екатеринбург : УрФУ, 2014. — Ч. 1. — С. 96–103.

4. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий // *Металл и литье Украины*. — 2013. — № 10. — С. 5–10.

5. Чаговец, А. В. Анализ распределения тепловых потерь доменной печи с помощью аналитической системы обработки данных / А. В. Чаговец, А. Н. Баранов // *Сборник научных работ студентов Донбасского государственного технического института*. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — Вып. 14. — С.121–124.

6. Чаговец, А. В. Анализ тепловой неравномерности доменной печи с помощью 3D-модели / А. В. Чаговец, Р. Ю. Ткачев // *Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сб. тез. докл. VI междунар. науч.-техн. конф. (г. Алчевск, 14–15 окт. 2021 г.) / под ред. Д. А. Вишневого*. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 118–121.

СПОСОБ БАЙПАСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ УСТК

Одним из важнейших параметров, характеризующих работу котлоагрегата, является температура перегретого пара. Повышение либо понижение ее вышеустановленных пределов может вызвать некорректную работу котла, повреждения и даже аварии. Поэтому очень важно поддерживать ее на заданном уровне.

В большинстве случаев регулирование температуры перегретого пара происходит за счет изменения расхода воды, однако также применяется вариант регулирования температуры за счет изменения расхода пара через пароохладитель. Осуществляется это с помощью байпаса, установленного в обход пароохладителя. Такая схема применяется, например, в котле-утилизаторе КСТК-35/40-100 установки сухого тушения кокса коксохимического завода «АМК» филиала № 1 ООО «ЮГМК». При таком проектном решении температура перегретого пара зависит от расхода пара, идущего через поверхностный пароохладитель и пара, идущего по байпасу в обход пароохладителя [1].

Насыщенный пар из барабана поступает в первую ступень пароперегревателя, а затем направляется в поверхностный пароохладитель. Далее пар из пароохладителя поступает во вторую ступень пароперегревателя, откуда направляется к потребителю. При такой схеме регулирования, как правило, дополнительный клапан, установленный на линии пароохладителя, фиксируют в одном положении согласно режимной карте, а регулирование температуры перегретого пара осуществляется байпасным перепуском перегретого пара мимо поверхностного пароохладителя (рис. 1). При этом давление и температура воды, поступающей на пароохладитель, остаются постоянными.

Установленный на байпасе клапан позволяет изменять диапазон регулирования расхода и температуры пара. Особенностью такого регулирования является изменение тепловосприятия промперегревателя при очень слабом влиянии на тракт первичного пара. В этом отношении регулирование температуры пара вторичного перегрева практически является автономным.

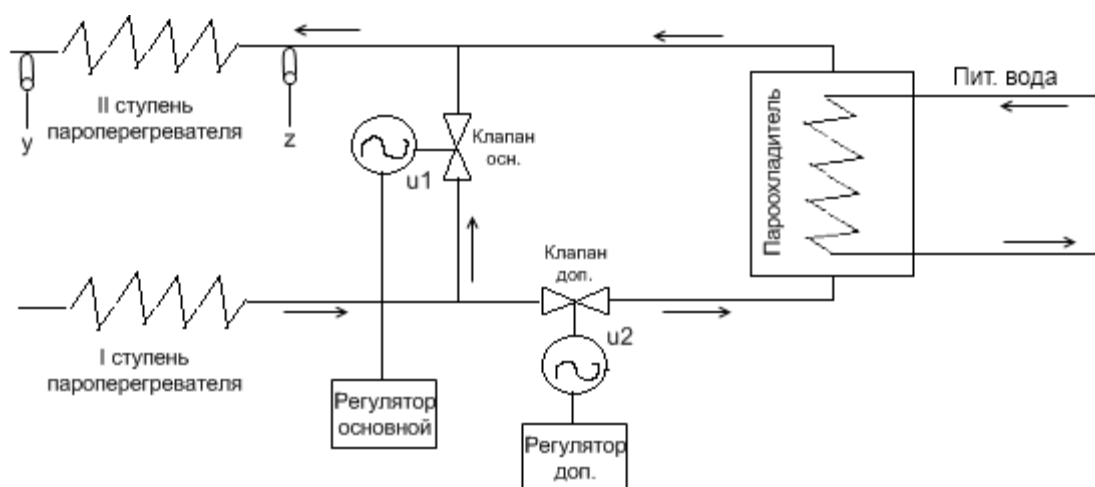


Рисунок 1 — Схема байпасного регулирования температуры перегретого пара

Благодаря низкому значению температурного напора в холодном пакете, изменение расхода пара через него существенно сказывается на тепловосприятии пакета. Даже небольшая доля байпасирования уже заметно влияет на изменение температуры пара на выходе из пакета.

Горячая (II) ступень перегревателя находится в зоне высоких температур газов и работает с высоким температурным напором. Поэтому здесь температурный напор и тепловосприятие относительно мало изменяются при изменении температуры пара на входе. Таким образом, эта ступень перегревателя мало чувствительна к изменению температуры пара, и глубина регулирования конечной температуры пара в основном определяется изменением теплосъёма в «холодном» пакете.

С увеличением пропуска пара по байпасной линии тепловосприятие первой ступени (холодного пакета) уменьшается и температура на входе во вторую ступень (горячий пакет) будет снижаться. Это вызывает рост тепловосприятия в горячем пакете. При этом произойдёт явление некоторой «тепловой самокомпенсации», направленной в сторону стабилизации температуры пара.

Важной проблемой является регулирование температуры во второй ступени, так как при наличии возмущений система может выйти за допустимый диапазон регулирования температуры и в связи с этим процесс отработки возмущения затянется.

Для решения данной проблемы предлагается реализация системы с двумя регуляторами, структурная схема которой представлена на рисунке 2. Особенностью предлагаемой системы является наличие двух независимых в настройке регуляторов [2]. Каждый автономный регулятор управляет своим клапаном, а структура системы позволяет перераспределить суммарное управляющее воздействие между регулируемыми потоками за счет непрерывно определяемого в вычислительном устройстве коэффициента долевого участия регуляторов λ .

Исходя из схемы предполагается, что датчики температуры должны быть установлены на выходе второй ступени пароперегревателя, а также перед второй ступенью пароперегревателя — после соединения охлаждаемого и байпасного потоков. На данной схеме под W_{yu} и W_{zu} обозначены передаточные функции второй ступени пароперегревателя и пароохладителя. Под W_{yt} и W_{zt} обозначены передаточные функции соответствующих термопар, а под W_{ry} и W_{rz} — регуляторы основной и промежуточной величины. Также на схеме учтено наличие ограничений управляющих воздействий по скорости и по уровню.

Данная схема предполагает, что регулирование основной величины осуществляется клапаном, установленным на байпасе, а регулирование промежуточной величины осуществляется клапаном, установленным перед пароохладителем.

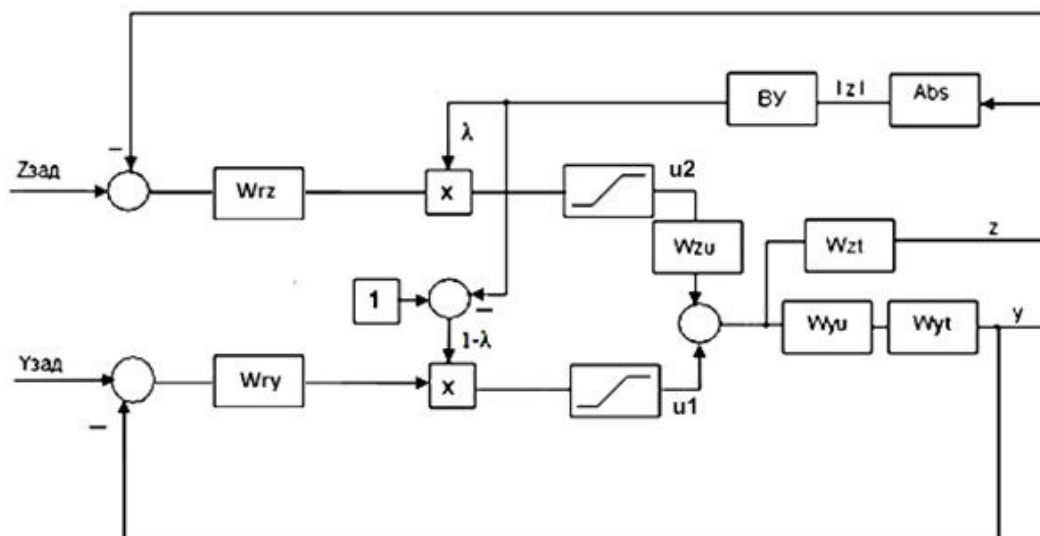


Рисунок 2 — Структурная схема АСР с двумя независимыми регуляторами

Особенностью схемы регулирования является определение коэффициента участия регуляторов λ . Введение данной величины связано с тем, что в системе байпасного регулирования температурой перегретого пара открытие либо закрытие двух клапанов взаимосвязано, когда открывается один — прикрывается другой и наоборот.

Коэффициент долевого участия регуляторов рассчитывается в вычислительном устройстве ВУ по модулю промежуточной величины температуры перегретого пара и определяется по формуле (1).

$$\lambda = \begin{cases} 0, & \text{при } \rightarrow |z(t)| < z_{lo} \\ \frac{|z(t) - z_{lo}|}{z_{hi} - z_{lo}}, & \text{при } \rightarrow z_{hi} > |z(t)| \geq z_{lo} \\ 1, & \text{при } \rightarrow |z(t)| > z_{hi}, \end{cases} \quad (1)$$

где z_{lo} и z_{hi} — соответственно нижний и верхний задаваемые пределы отклонения модуля величины z_t .

Таким образом, согласно структурной схеме на рисунке 2, сигнал с выхода регулятора будет умножаться на коэффициент участия, который находится в пределах от 0 до 1, и только тогда будет открывать или закрывать клапан.

В работе был произведен синтез системы байпасного регулирования температуры перегретого пара, была рассчитана математическая модель объекта и проведено моделирование работы всей системы.

Анализ результатов моделирования показал, что разработанная система с двумя независимыми регуляторами при управлении одновременно двумя клапанами обеспечивает высокое быстродействие, по сравнению с традиционным способом регулирования. В разработанной системе происходит быстрое подавление возмущающих воздействий, практически отсутствует перерегулирование и колебательность переходного процесса. Это делает ее пригодной для регулирования температуры перегретого пара на КСТК-35/40-100, а также дает возможность развивать данную схему и внедрять на других агрегатах с подобной схемой байпасного регулирования.

Список литературы

1. Котел-утилизатор КСТК-35/40-100 : руководство по эксплуатации. — Белгород : Энергомаш. — 26 с.
2. Ткачев, Р. Ю. Метод синтеза систем управления с двумя регуляторами / Р. Ю. Ткачев, В. Г. Дрючин // Современные проблемы математики, механики и информатики / под ред. Н. Н. Кизиловой, Г. Н. Жолткевича. — Харьков : Апостроф, 2012. — № 2. — С. 400–408.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ РЕАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Для большинства экологически опасных объектов (объектов металлургической, химической, углеобогащательной промышленности) в целях предотвращения экологических катастроф, уменьшения выбросов и экономических потерь ставится задача создания высокоэффективных автоматических систем управления, которые бы сводили к минимуму недостатки эксплуатируемых до настоящего времени систем регулирования (управление связано с большими перерегулированиями и длительными процессами при отработке внешних возмущений) [1, 2].

Достаточно высокое качество регулирования обеспечивается применением методов оптимального управления при синтезе замкнутых систем управления [2, 3]. Однако данные методы предполагают возможность измерения всех фазовых координат объекта. Реально же, как правило, в таких промышленных объектах, доступна измерению лишь выходная координата. В этом случае вместо неизмеряемых координат в управлении используют производные регулируемой величины. А поскольку в технике невозможно получать идеальные производные, возникает необходимость синтеза закона управления на базе реальных производных.

Эта задача решается введением в качестве критерия оптимальности квадратичного функционала и его экстремали по выходной координате. Для формирования реальных производных, используя опыт введения в квадратичный функционал производной от управления [2], дополнительно вводятся также старшие производные до $(n-1)$ включительно, где n — порядок объекта. Это позволяет решить задачу параметрической и структурной оптимизации из условия обеспечения заданного качества регулирования. Упрощение процедуры синтеза достигается разделением проблемы оптимизации на две задачи. Первая задача — это синтез оптимального управления, реализующего движение объекта управления по заданной экстремали. Вторая заключается в синтезе реального дифференциатора, параметры которого всегда могут быть выбраны из условия технической реализуемости.

Рассмотрим в качестве примера задачу синтеза закона управления тепловым режимом промышленного объекта (трубчатая печь), используемого на химических и нефтехимических производствах [4].

Технология получения сырого бензола, одного из основных высококорентабельных продуктов химических цехов, основана на строгом соблюдении температурных режимов, одним из которых является нагрев в трубчатых печах насыщенного бензолом поглотителя (каменноугольной смолы).

Математическая модель трубчатой печи (с пламенными горелками) по прямому каналу, выходной величиной которого является температура каменноугольного масла после печи, представлена в виде передаточной функции

$$W_{об}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^2}, \quad (1)$$

с коэффициентом усиления $k = 1$ и постоянными времени $T_1 = 165$ с, $T_2 = 70$ с. И по малоинерционному каналу (вводится с целью увеличения быстродействия создаваемой системы при парировании внешних возмущений), выходной величиной которого является температура уходящих газов, в виде передаточной функции

$$W_{\text{мин}}(p) = \frac{k}{T_3 p + 1},$$

где $k = 1$, $T_3 = 30$ с.

С целью увеличения быстродействия системы вначале необходимо осуществить синтез системы управления объектом по малоинерционному каналу.

Движение объекта описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^* &= -b_{11}y_1^* + b_{12}y_2^*, \\ \dot{y}_2^* &= \frac{1}{T_u}U, \end{aligned} \quad (2)$$

где $b_{11} = b_{12} = 1/T_3$, при этом к объекту отнесен исполнительный механизм постоянной скорости.

Требуется найти закон управления такой, чтобы на движениях замкнутой этим управлением системы минимизировался квадратичный функционал

$$I = \int_0^{\infty} (a_1 y_1^{*2} + a_2 y_2^{*2} + U^2) dt, \quad (3)$$

на желаемой экстремали $y_1^*(t)$ по выходной координате малоинерционного контура.

Используя метод динамического программирования, находится управление

$$U^* = -n_1 y_1^* - n_2 y_2^*, \quad (4)$$

решающее задачу структурной оптимизации.

Для решения задачи параметрической оптимизации, то есть отыскания коэффициентов n_1 , n_2 управления (4), используются уравнения замкнутой системы (2), (4) и уравнение экстремали квадратичного функционала (3).

Однако, желая сохранить интегрирующие свойства исполнительного механизма для малоинерционного контура, необходимо исключить координату $y_2^*(t)$ из закона управления (4). В результате управление примет вид

$$U_1^* = -(m_1 + m_2 p) y_1^*,$$

где $m_1 = n_1 + n_2 b_{11}/b_{12}$, $m_2 = n_2/b_{12}$.

Так как внутренний контур имеет второй порядок, то допустимо значительное увеличение коэффициента k_p регулятора, а потому передаточную функцию внутреннего малоинерционного контура можно принять равной единице. Подобные структурные преобразования дают возможность рассматривать теперь объект третьего порядка с передаточной функцией (1). Но, даже понизив порядок объекта до третьего, при формировании реальных производных системы управления возникнут трудности с параметрической оптимизацией.

Эта проблема разрешается разделением задачи параметрической оптимизации на две самостоятельные: задачу оптимизации в пространстве идеальных производных и задачу оптимизации реального дифференциатора.

Движение рассматриваемого объекта третьего порядка описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= y_3; \\ \dot{y}_3 &= c_4 U - c_3 y_3 - c_2 y_2 - c_1 y_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Задаваясь квадратичным функционалом вида

$$I = \int_0^{\infty} (a_1 y_1^2 + a_2 y_2^2 + a_3 y_3^2 + U^2) dt \quad (6)$$

как критерием оптимальности, находится оптимальное управление

$$U = -n_1 y_1 - n_2 y_2 - n_3 y_3, \quad (7)$$

обеспечивающее минимум функционала.

Составляя характеристический определитель по (5), (7) и, раскрывая его, определяется характеристическое уравнение замкнутой системы

$$p^3 + p^2 (c_4 n_3 + c_3) + p (c_4 n_2 + c_2) + (c_4 n_1 + c_1) = 0,$$

обеспечивающее желаемый переходный процесс при условии воспроизведения заданной экстремали квадратичного функционала (6).

В результате искомые коэффициенты управления (7) определяются как

$$n_1 = (\gamma_1 - c_1) \frac{1}{c_4}; \quad n_2 = (\gamma_2 - c_2) \frac{1}{c_4}; \quad n_3 = (\gamma_3 - c_3) \frac{1}{c_4}.$$

Для решения второй задачи (реализации реальных производных) в качестве объекта рассматривается последовательное соединение идеальных интеграторов, движение которых определяется уравнением

$$\dot{y}_1 = y_2; \quad \dot{y}_2 = y_3; \quad \dot{y}_3 = U. \quad (8)$$

Вводя квадратичный функционал (6) и его экстремаль $y_1(t)$, обеспечивающую желаемый вид переходного процесса, методом динамического программирования определяется оптимальное управление

$$U_1 = -A_{13} y_1 - A_{23} y_2 - A_{33} y_3. \quad (9)$$

Используя уравнение (9) в системе (8), получается характеристическое уравнение

$$p^3 + A_{33} p^2 + A_{23} p + A_{13} = 0,$$

определяющее переходный процесс в системе, и находятся искомые коэффициенты оптимального управления (9) $A_{i3} = \gamma_i, (i = \overline{1 \div 3})$.

Можно видеть, что разделение задачи параметрической оптимизации на две самостоятельные позволило упростить процедуру параметрического синтеза.

Выводы. Введение реальных производных регулируемой величины при доступности измерения лишь выходной координаты в решении задачи аналитического синтеза закона управления тепловым режимом промышленного объекта позволяет решить задачу параметрической и структурной оптимизации из условия обеспечения заданного качества регулирования.

Список литературы

1. Дрючин, В. Г. Использование симметрии в автоматических системах управления экологически опасными объектами / В. Г. Дрючин, В. И. Жилияков // Вестник МАНЭБ. — 1992. — № 3. — С. 28–30.
2. Жилияков, В. И. Синтез систем управления режимами электроэнергетических систем / В. И. Жилияков, В. Г. Дрючин // Изв. ВУЗов. Электричество. — 1992. — № 12. — С. 6–10.
3. Андреев, Ю. Н. Управление конечномерными линейными объектами / Ю. Н. Андреев. — М. : Наука, 1976. — 424 с.
4. Технология коксохимического производства / Лейбович Р. Е. и др. — М. : Metallургия, 1982. — 360 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК ПИ-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С БЛОКОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Изменения в динамических свойствах объекта управления в процессе его технологической эксплуатации могут быть кардинальными или незначительными. В последнем случае можно говорить об изменениях численных значений параметров математической модели объекта, подвергаемого регулированию, которые не касаются структуры. В свою очередь, первоначально настроенная система регулирования перестает работать по заданным условиям оптимальности, что понижает качество ее функционирования. Такой нежелательный эффект от изменений динамики объекта может быть устранен различными способами.

В [1, 2] предлагается оптимизация по частотным характеристикам замкнутой системы с применением активной идентификации динамических изменений (параметров модели) объекта. Алгоритмом оптимизации выступает метод вспомогательной функции [3], в котором критерием качества управления принят частотный показатель колебательности M . Однако анализ изменений в параметрах объекта проводился косвенно, что в свою очередь требовало либо знаний о функциональной зависимости между параметрами модели объекта [2], либо предполагал поиск рабочей частоты эксперимента и тем самым увеличивал время и затраты на экспериментальную часть оптимизации [1]. Данная работа предлагает заменить неопределенность в аналитической части оптимизации, а также значительно упростить и сократить расчет требуемых параметров регулятора.

Процесс оптимизации разделен на три основных блока: фиксация, идентификация и оптимизация. Рассмотрим каждый блок на примере объекта управления со структурой

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}}{(T_{об} \cdot s + 1)^2}, \quad (1)$$

где $K_{об}$ — коэффициент пропорциональности объекта управления; $T_{об}$ — постоянная времени объекта управления, с; s — оператор Лапласа.

В качестве закона управления используется ПИ-структура

$$W_{ПИ}(s) = \frac{K_n \cdot T_u \cdot s + K_n}{T_u \cdot s}, \quad (2)$$

где K_n — коэффициент пропорциональности регулятора; T_u — время интегрирования регулятора, с.

В первом блоке проводится проверка фиксированной частоты ω_0 , являющейся резонансной при первоначальной оптимизации системы. Для этого на вход системы подается генератор синусоидальных колебаний круговой частоты ω_0 . После прохождения переходного процесса рассчитывают частотные характеристики замкнутой системы на этой частоте. Если выполняется условие оптимальности, то система настроена оптимально и подстройки параметров регулятора не требуется.

$$A_{зс}(\omega_0) = M, \quad (3)$$

где $A_{зс}(\omega_0)$ — значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы на частоте ω_0 ; ω_0 — фиксированная частота, рад/с.

В противном случае приступают ко второму блоку — параметрической идентификации объекта управления для учета изменения динамических свойств.

Для этого новые параметры модели объекта структуры (1) определяются по следующим выражениям

$$\varphi_{o\delta}(\omega_0) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin[\varphi_{3c}(\omega_0)]}{\cos[\varphi_{3c}(\omega_0)] - A_{3c}(\omega_0)} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{T_u \cdot \omega_0} \right), \quad (4)$$

$$T_o^* = \frac{1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{o\delta}(\omega_0))}}{\omega_0 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{o\delta}(\omega_0))}, \quad (5)$$

$$A_{o\delta}(\omega_0) = \frac{A_{3c}(\omega_0) \cdot T_u \cdot \omega_0}{K_n \cdot \sqrt{(T_u^2 \cdot \omega_0^2 + 1) \cdot (A_{3c}^2(\omega_0) - 2 \cdot A_{3c}(\omega_0) \cdot \cos[\varphi_{3c}(\omega_0)] + 1)}}, \quad (6)$$

$$K_o^* = A_{o\delta}(\omega_0) + A_{o\delta}(\omega_0) \cdot (T_o^* \cdot \omega_0)^2, \quad (7)$$

где $\varphi_{3c}(\omega_0)$ — значение фазо-частотной характеристики (ФЧХ) замкнутой системы на частоте ω_0 ; $\varphi_{o\delta}(\omega_0)$ — значение ФЧХ объекта на частоте ω_0 ; $A_{o\delta}(\omega_0)$ — значение АЧХ объекта на частоте ω_0 .

Выражения (5, 7) определяют новые численные значения параметров модели (1), необходимые для дальнейшей подстройки регулятора.

В третьем блоке проводится оптимизация закона регулирования по методу вспомогательной функции. Приводимая ниже его интерпретация не нуждается в построении графиков частотных характеристик и их дальнейшем анализе. Вместо этого предлагаются аналитические вычисления. Резонансная частота для заданного показателя колебательности M определяется по формуле

$$\omega_p = \frac{2 \cdot M + \sqrt{4 \cdot M^2 - 3}}{3 \cdot T_o^*}, \quad (8)$$

после чего происходит параметрическая настройка параметров регулятора структуры (2)

$$K_n^{onm} = \frac{-M^2 \cdot \left(1 - (T_o^* \cdot \omega_p)^2\right)}{K_o^* \cdot (M^2 - 1)}, \quad (9)$$

$$T_u^{onm} = \frac{K_n^{onm} \cdot K_o^* \cdot (M^2 - 1)}{M \cdot \omega_p \left(-(\omega_p \cdot T_o^*)^2 + 2 \cdot M \cdot \omega_p \cdot T_o^* - 1 \right)}. \quad (10)$$

Предлагаемый метод оптимизации позволяет использовать эффективно экспериментальную часть процедуры оптимизации и значительно выигрывает в точности по сравнению с алгоритмами [1, 2] из-за наличия в нем блока идентификации. Также было сокращено количество необходимых вычислений метода вспомогательной функции, а графоаналитическая часть вообще была исключена из алгоритма.

В качестве дальнейших исследований предполагается разработка аналогичных расчетных схем для объектов с другими структурами их математических моделей. Это позволит собрать целый набор алгоритмов для инженерной оптимизации локальных систем регулирования, которые могут быть использованы на практике в промышленных контроллерах.

Список литературы

1. Овдей, В. С. Оптимизация действующих систем с использованием косвенных неэкстремальных показателей оптимальности / В. С. Овдей, И. А. Коцемир // Сб. науч. трудов студентов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 11. — Ч. I. — С. 83–87.
2. Коцемир, И. А. Параметрическая оптимизация действующих локальных систем регулирования по данным о системе на фиксированной частоте / И. А. Коцемир, В. С. Овдей // Донбасс будущего глазами молодых ученых : сборник материалов научно-технической конференции (19 ноября 2019 г.). — Донецк : ДонНТУ, 2019. — С. 32–35.
3. Ротач, В. С. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / В. Я. Ротач. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с.

Верхола А. В.
старший преподаватель
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,
Коновалов С. А.
с.н.с.
НИПКИ «Параметр», Донбасский государственный технический институт,
г. Алчевск, ЛНР

ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ВАКУУМНЫХ КОНТАКТОРОВ

Рост объёма электронных компонентов в системах управления электромеханическими системами является одной из устойчивых тенденций последних лет. Электронные компоненты применяются как в виде силовых коммутационных аппаратов в цепях передачи энергии, так и в виде управляющих элементов в оперативных цепях. Другой устойчивой тенденцией в электроэнергетике и электротехнике является переход от коммутационных электрических аппаратов с открытым гашением дуги в воздухе к вакуумным электрическим аппаратам, в которых дуга гасится внутри герметичной вакуумной дугогасительной камеры. Вакуумные коммутационные аппараты являются энергоресурсосберегающими и имеют несомненные преимущества перед традиционными по таким показателям, как эксплуатационный ресурс, экономия контактных материалов (медь, серебро) и экономия электроэнергии. Кроме того, вакуумные коммутационные аппараты не загрязняют продуктами горения дуги окружающую среду, и поэтому являются более экологичными, чем традиционные.

Недостатком вакуумных коммутационных аппаратов является то, что при работе они создают большой уровень перенапряжений, опасных для электрической изоляции электрооборудования, размещённого в коммутируемой ими цепи. Кроме того, генерируемые вакуумными аппаратами коммутационные перенапряжения являются источником электромагнитных помех для управляющих электронных компонентов.

Причиной появления перенапряжений в контуре, содержащем в качестве коммутационного элемента вакуумный контактор, являются процессы преобразования энергии. При протекании тока i по контуру, содержащему индуктивность L , в нём накапливается электромагнитная энергия

$$W_{ЭМ} = \frac{L \cdot i^2}{2}. \quad (1)$$

Чем быстрее при коммутации обрывается ток, тем бóльшая часть накопленной электромагнитной энергии преобразуется в энергию электростатического поля

$$W_{ЭС} = \frac{C \cdot U^2}{2}. \quad (2)$$

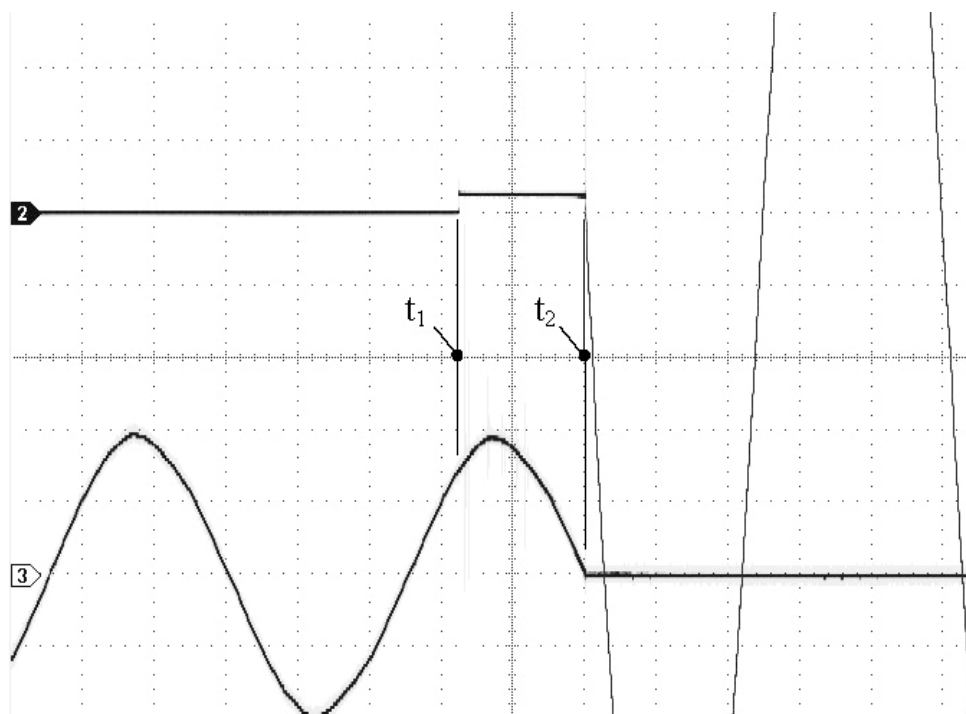
В результате ёмкость контура C , образованная проводниками и разделяющей их электрической изоляцией, оказывается под воздействием напряжения U , которое тем больше, чем бóльшая часть электромагнитной энергии $W_{ЭМ}$ оказалась преобразованной в электростатическую энергию $W_{ЭС}$ [1].

Борьбе с коммутационными перенапряжениями, создаваемыми вакуумными контакторами, посвящено большое количество исследований и предложено большое количество способов и устройств, предназначенных для реализации полученных результатов [2–4]. Однако все они направлены на борьбу с уже возникшими перенапряжениями, и, как правило, предназначены для защиты конкретного устройства. В то же время существует возможность решить проблему кардинально: не допустить появления перенапряжений. Как было показано

ранее [5], с такой задачей способны справиться устройства, осуществляющие синхронное отключение. Синхронное отключение является частным случаем управляемой коммутации и заключается в размыкании контактов электрического аппарата синхронно с нулём синусоиды отключаемого тока. В соответствии с (1), в момент времени, когда ток в отключаемом контуре становится равным нулю вследствие изменения по синусоидальному закону, запасённая в контуре электромагнитная энергия $W_{ЭМ}$ также принимает нулевое значение. Как следует из выражения (2), в этом случае нулю будут равны энергия электростатического поля $W_{ЭС}$ и напряжение U , прикладываемое к изоляции контура. Преимущество предложенного способа заключается в том, что он борется не с последствиями перенапряжений, а предупреждает их появление. Таким образом, устраняется воздействие коммутационных перенапряжений не только на элементы отключаемого контура, но и на устройства, гальванически не связанные с ним, но подверженные воздействию электромагнитных помех, возникающих при коммутации. В этом смысле управляемая коммутация является средством, которое может улучшить электромагнитную совместимость низковольтных вакуумных контакторов.

Для создания адекватной математической модели, моделирующей процессы преобразования энергии при коммутации цепи низковольтным вакуумным контактором, недостаточно приведенных выше выражений. Отчасти это связано с тем, что формулы (1) и (2) не учитывают всего многообразия процессов, протекающих при коммутации. Например, они не отражают выделение энергии в дуге отключения.

С целью установления зависимости количества энергии, выделяющейся в дуге отключения низковольтного вакуумного контактора, ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» совместно с НИПКИ «Параметр» были проведены исследования. Исследования проводились на низковольтном вакуумном контакторе при разных отключаемых токах, разном сдвиге фаз между током и напряжением и разных фазах размыкания контактов. С помощью цифрового осциллографа Micsig STO 1104C фиксировались кривые тока и напряжения дуги отключения (рис. 1).



маркер 2 — нулевой уровень напряжения; маркер 3 — нулевой уровень тока

Рисунок 1 — Осциллограммы напряжения и тока дуги отключения низковольтного вакуумного контактора

Значения энергии, выделяющейся в дуге, были определены интегрированием по осциллограммам:

$$W_{Д} = \int_{t_1}^{t_2} U_{Д} \cdot i_{Д} dt, \quad (3)$$

где $U_{Д}$ — напряжение на дуге; $i_{Д}$ — ток в дуге; t_1 — момент размыкания контактов и зажигания дуги (рис. 1); t_2 — момент погасания дуги (рис. 1).

В результате проведенных исследований установлены зависимости количества энергии, выделяющейся в дуге отключения, от величины тока, индуктивности отключаемой цепи и фазы размыкания контактов.

Выводы:

– электромагнитная совместимость низковольтных вакуумных контакторов может быть улучшена путём применения управляемой коммутации;

– результаты проведенных исследований позволят создать более адекватную модель преобразования энергии при коммутации цепей низковольтными вакуумными контакторами, что необходимо как для совершенствования конструкции устройства, реализующего управляемую коммутацию, так и для выбора оптимального режима его работы.

Список литературы

1. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / В. А. Воздвиженский, А. Ф. Гончаров, В. Б. Козлов и др. ; под ред. В. Б. Козлова. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 200 с.
2. Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ) / Главгосэнергонадзор России. — М. : Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. — 610 с.
3. Электротехнический портал. Рекомендации по выбору и применению ОПН для оптимальной защиты электрооборудования [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/98/>.
4. Центр сварки. Выбор RC-цепочки, защитного диода, диода-стабилитрона, диода-резистора [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://oocentrsvarki.ru/teoriya/kak-rabotaet-zashchitnyj-diod.html>.
5. Верхола, А. В. Исследование коммутационных перенапряжений при отключении низковольтной цепи электромеханическим аппаратом / А. В. Верхола // XVII международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» : труды МКЭЭЭ-2018. — Алушта, 2018. — С. 257–259.

МОНИТОРИНГ ИНТЕНСИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕСТРОЕК В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ ВПЕРЕДИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Добыча угля подземным способом, в частности на шахтах Донбасса, сопряжена в настоящее время с увеличением количества шахтопластов, склонных к газодинамическим явлениям, которые все чаще сопровождаются гибелью шахтеров и большими материальными потерями. Как показывают анализ и практика [1, 2], безопасная и эффективная эксплуатация горных выработок, особенно в сложных горногеологических и горнотехнических условиях, к тому же на больших глубинах, возможна лишь при получении своевременной информации о состоянии углепородного массива (УГПМ) в плоскости выемочного столба впереди очистного забоя.

При ведении очистных работ призабойная часть угольного пласта испытывает дополнительные периодические нагрузки от зависания и разрушения пород кровли. В этой связи изменяются условия перераспределения напряжений, вызванные подвиганием угольного забоя, происходят структурные перестройки (скрытое трещинообразование) угля и вмещающих горных пород, сопровождающиеся выделением энергии в широком спектре частот [3, 4].

Из-за существенных силовых и структурных неоднородностей в УГПМ возникает разнообразная динамика скрытого трещинообразования по мере подвигания угольного забоя. Это, в свою очередь, приводит к разупрочнению углепородного массива, меняет динамику десорбции метана и его диффузию в искусственно образованные полости.

Таким образом, пласт угля и вмещающие горные породы служат своеобразными датчиками изменения во времени горного давления в рабочем пространстве выработки. Носителем достаточно полной и достоверной информации является пассивная акустическая и электромагнитная эмиссии, возникающие при скрытом трещинообразовании, зависящие, в первую очередь, от величины воздействующих напряжений на углепородный массив и его физико-механических свойств. Причем вариации величин техногенных напряжений очень сильно зависят от скорости подвигания лавы и подготовительных горных выработок, а также от всевозможных технологических мероприятий, проводимых на добычных участках.

На основании этого эффекта был предложен метод контроля распределения интенсивности скрытого трещинообразования в углепородном массиве в плоскости выемочного столба впереди очистного забоя и подготовительных горных выработках.

Кроме того, регистрируя активную составляющую сейсмоакустических сигналов, наведенную режущим органом комбайна или струга, и зная первичный спектр, а также местоположение его относительно штреков, можно определять структурные неоднородности угольного пласта и скорость распространения сейсмоакустических сигналов, что приводит к получению дополнительной информации о углепородном массиве (УГПМ) и существенно уменьшает погрешность предложенного метода контроля распределения интенсивности скрытого трещинообразования.

Комплексное использование данных методов и средств, способных в режиме реального времени измерять одновременно сейсмоакустическую и электромагнитную эмиссию, скорость газовыделения, температуру угольного пласта, позволит создать эффективную информационно-измерительную систему (ИИС) мониторинга геодинамических процессов в углепородных массивах шахты с несколькими добычными участками.

На основании разработанной информационной модели была предложена архитектура ИИС мониторинга процесса скрытого трещинообразования в УГПМ, которая представлена на рисунке 1.

ИИС мониторинга процесса скрытого трещинообразования в УГПМ состоит из трех комплексов: подземного, поверхностного и комплекса передачи информации. Подземный комплекс, в свою очередь, состоит из двух подсистем, которые устанавливаются соответственно в откаточном и вентиляционном штреках.

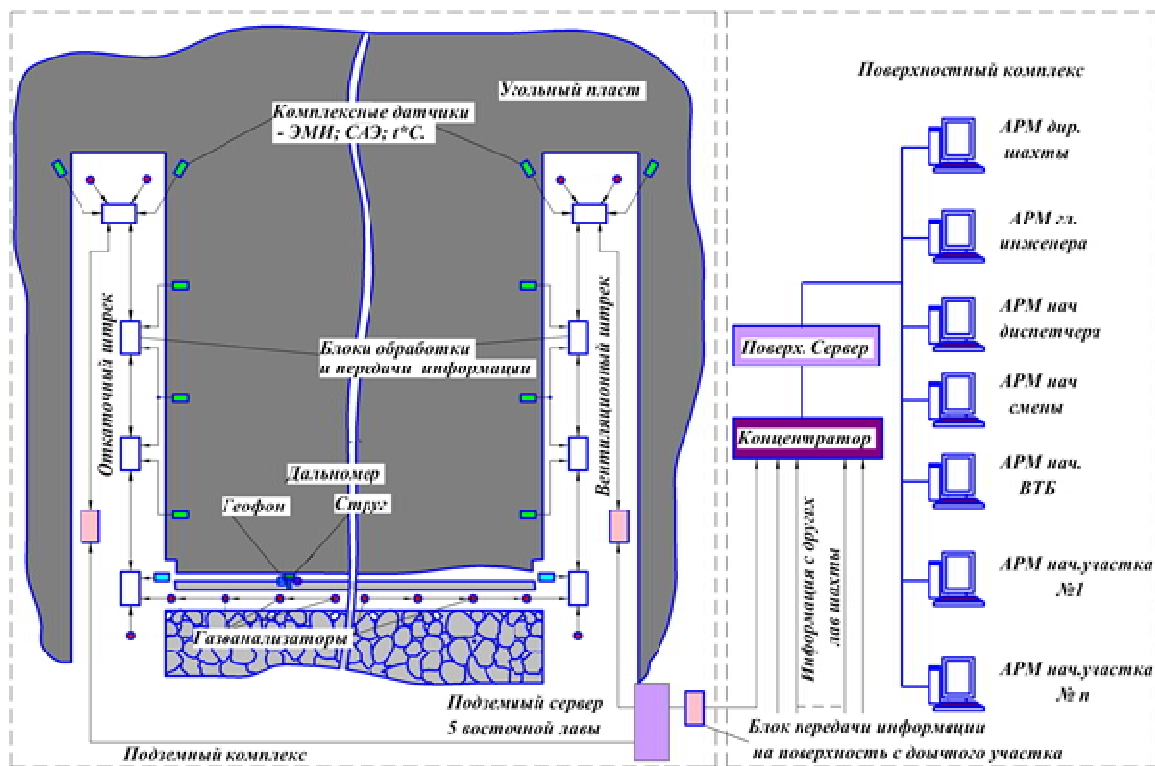


Рисунок 1 — Архитектура информационной системы мониторинга углепородного массива

В подземном комплексе в реальном масштабе времени функционируют одновременно все задействованные подсистемы, в том числе и вышеперечисленные. Сбор данных является неотъемлемой частью мониторинга, поэтому в измерительной подсистеме задействованы различные датчики, которые обеспечивают соответствующие подсистемы текущей информацией. Комплексные датчики (КД) предназначены для регистрации пассивной электромагнитной и акустической эмиссии, возникающей при скрытом трещинообразовании в углепородном массиве. Кроме того, КД измеряет температуру угольного пласта в зоне установки, регистрируя тем самым возможные десорбционные процессы метана, а также регистрирует акустические шумы, которые возникают от взаимодействия режущего органа комбайна с углем и прошедшие сквозь угольный пласт. Первичный спектр шумов реагирует геофон, укрепленный на комбайне. Дальномеры определяют геометрическое положение режущего органа в лаве, тем самым позиционируя источник излучения акустической эмиссии.

Рудничную атмосферу по длине лавы, а также в критических точках контролируют газоанализаторы, которые образуют сенсорную беспроводную сеть. Газоанализаторы перемещаются вместе с механизированной крепью по мере подвигания лавы. Вся информация, предварительно обработанная на подземных блоках обработки, передается по соответствующим каналам на поверхностный комплекс, где осуществляется окончательная обработка информации, которая поступает на автоматизированные рабочие места (АРМ) соответствующих служб.

На рисунке 2 представлена визуализация интенсивности структурных перестроек в УГПМ добычного участка впереди очистного забоя на АРМ диспетчера шахты.

Предложенные методы ИИС мониторинга геодинамических процессов позволят в режиме реального времени диагностировать состояние углепородного массива добычного участка шахты по четырем взаимосвязанным факторам:

- интенсивности скрытого трещинообразования в плоскости выемочного столба впереди очистного забоя и подготовительных горных выработок;
- определять структурные неоднородности угольного пласта;
- определять его температурный режим;
- контролировать динамику выделения метана.

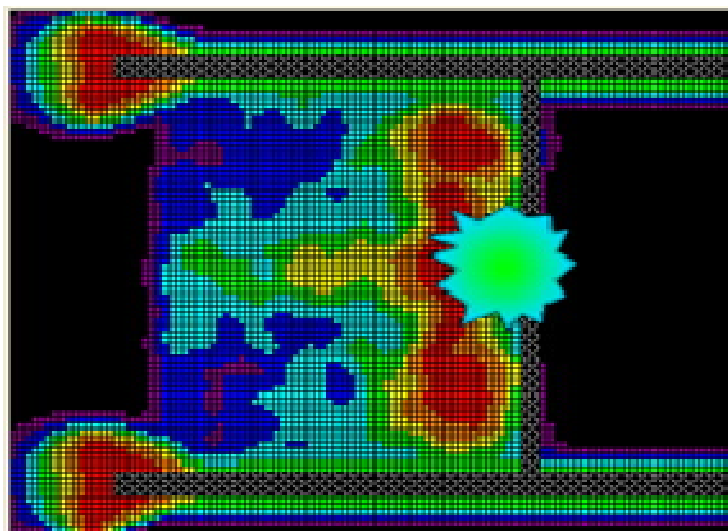


Рисунок 2 — Визуализация интенсивности структурных перестроек в УГПМ добычного участка впереди очистного забоя на АРМ диспетчера шахты

Мониторинг динамики изменения этих параметров позволит уже в ближайшем будущем обеспечить получение качественно новой информации о процессах и явлениях в массивах горных пород.

Список литературы

1. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов / А. Ф. Булат, В. К. Хохолев ; отв. ред. Зорин А. Н. ; АН УССР. Институт геотехнической механики. — К.: Наук. думка, 1990. — 168 с.
2. О прогнозе разрушения горных пород на основе регистрации импульсов электромагнитного излучения // М. В. Курленя, А. Г. Вострецов, Г. Е. Кулаков, Г. Е. Яковицкая // ФТПРПИ. — 2001. — № 3. — С.41–52
3. Бакаев, О. В. Методы и модели мониторинга геодинамических процессов в углепородном массиве угольных шахт / О. В. Бакаев // Радиоэлектронные и компьютерные системы. — 2012. — № 6. — С. 219–223.
4. Бакаев, О. В. Концепция построения информационной системы мониторинга геодинамических процессов в углепородном массиве угольных шахт / О. В. Бакаев // Радиоэлектронные и компьютерные системы. — 2010. — № 6 (47). — С. 343–348.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Детали специального назначения, которые подвергаются жестким условиям эксплуатации в различных средах, должны иметь и специфические требования к своей поверхности, особенно это относится к деталям авиакосмической техники, работающим в экстремальных условиях.

В настоящее время для модификации поверхности ответственных деталей, в том числе и для деталей газотурбинных двигателей (ГТД), применяют различные технологические процессы. Как показывает анализ, наиболее эффективной технологией обработки поверхности деталей является вакуумное ионно-плазменное напыление [1, 2], которое имеет широкий выбор наносимых покрытий с заданными характеристиками и возможностью автоматизации всех процессов.

Однако, чтобы обеспечить качественное покрытие, необходимо подготовить поверхности деталей перед напылением. Поэтому необходимо в технологический процесс нанесения покрытий включить операцию, которая бы позволила в вакуумной камере, непосредственно перед напылением, качественно очистить деталь и активировать ее поверхность.

Как правило, для этих целей используют ионно-плазменную очистку и другие специфические технологические процессы в глубоком вакууме [3].

Ионную очистку осуществляют методами с использованием специализированных высоковольтных источников питания (ВИП), которые способны работать в сложных условиях динамической нагрузки плазменных процессов. Для этих условий работы был разработан и изготовлен высоковольтный источник питания ВИП-2-15, общий вид которого представлен на рисунке 1 [4].

ВИП-2-15 изготовлен для работы в нормальных климатических условиях и может эксплуатироваться в помещениях, отвечающих требованиям эксплуатации вакуумного оборудования, при температуре окружающего воздуха +10–30 °С и влажности не более 70 %.

Питание ВИП-2-15 осуществляется от трехфазной сети 3×380В±10 % частотой 50(60) Гц. Габаритные размеры 600×1900×400 мм.

Величина выходного напряжения — регулируемая 250–2000 В при токе в нагрузке 0,5–15 А, а величина пульсаций выходного напряжения при максимальном токе нагрузки и максимальном выходном напряжении не более 3 %. Темп подъема напряжения — регулируемый и находится в пределах 5,0–10 В/с.

Амплитуда тока срабатывания защиты — регулируемая 5,1–15,1 А, а время срабатывания защиты от коротких замыканий и перегрузок по току не более 1 мкс.

Управление этим ВИП осуществляется с использованием информационных технологий [5], поскольку человеческий фактор может привести к серьезным экономическим потерям. Это связано, прежде всего, с тем, что все процессы, протекающие при ионно-плазменной очистке, в том числе, темп нарастания и сброса выходного напряжения, должны изменяться в зависимости от режима технологического процесса, качества поверхности изделий, интенсивности возникновения микродуговых процессов и прочих явлений, связанных с тестированием работоспособности основных функциональных узлов ВИП и систем защиты.

На рисунке 2 приведен типовой режим изменения выходного напряжения ВИП-2-15 от времени для технологического процесса ионной очистки деталей газотурбинных двигателей, где также отображены режимы контроля зарождения микродуговых привязок и их гашение. Кроме этого, на графике отражены режимы скорости подъема напряжения до и после гашения микродуговых привязок.



а

б

Рисунок 1 — Общий вид высоковольтного источника питания ВИП-2-15: а — общий вид функциональных узлов ВИП, при открытой двери; б — общий вид с системами ручного управления и подключенными коммуникациями

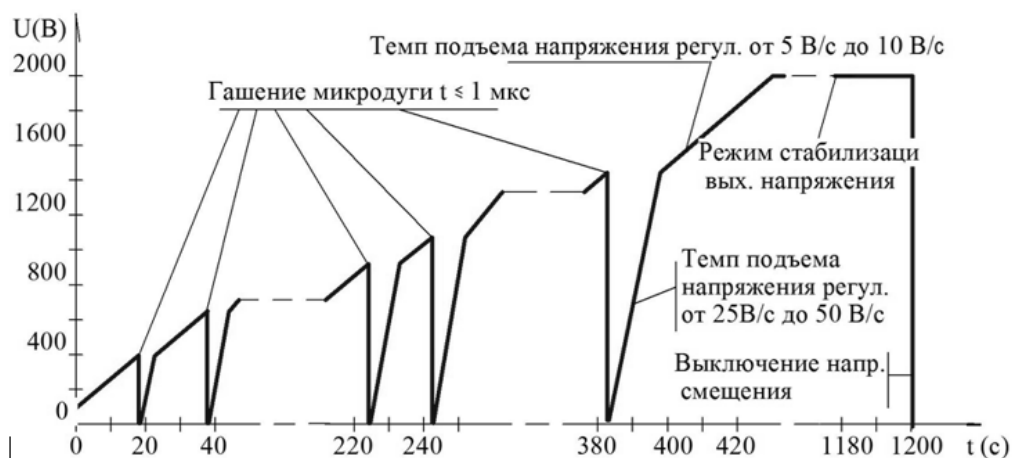


Рисунок 2 — Типовой режим выходного напряжения ВИП-2-15 от времени в процессе ионной очистки деталей газотурбинных двигателей

Для управления динамическими режимами всех функциональных узлов источника питания ВИП-2-15, предназначенного для ионно-плазменной очистки деталей авиакосмической техники, была разработана многомерная информационно-управляющая система (ИУС), работающая в режиме реального времени.

При разработке ИУС учитывались не только множество управляемых и контролируемых параметров, но и влияние возмущающих факторов, возникающих при различных режимах работы ВИПа и различного рода электромагнитных помех, которые существенно снижают вероятность достижения цели управления.

Обмен информацией между подсистемами осуществляется через подсистему сбора информации и общего управления, которая, в свою очередь, получает от технолога или оператора управляющие сигналы для проведения соответствующего технологического режима.

Технолог может задавать общий режим работы комплексом ионно-плазменного напыления, в том числе режим работы системы ионно-плазменной очистки деталей авиакосмической техники. Режим работы выбирается в зависимости от типа детали, конструктивных особенностей и материала, из которого она изготовлена.

Оператор через подсистему удаленного управления осуществляет сбор текущей информации и ее визуализацию, может корректировать информацию в базе данных для соответствующих режимов.

Список литературы

1. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД / С. А. Мубояджян, Д. А. Александров, Д. С. Горлов, Л. П. Егорова, Е. Е. Булавинцева // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 71–80.
2. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, Я. А. Помелов // *Конверсия в машиностроении*. — 1999. — № 2. — С. 42–47.
3. Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии : монография / О. В. Шипуль, Е. В. Цегельник, А. О. Гарин и др. — Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. — 189 с.
4. Бакаев, О. В. Высоковольтный источник питания для ионной очистки лопаток газотурбинных двигателей / О. В. Бакаев // *Сборник научных работ 44 й международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (г. Москва, октябрь 2018)*. — М. : ЕНО, 2018. — С. 44–46.
5. Грибков, А. Н. Информационно-управляющие системы многомерными технологическими объектами: теория и практика : монография / А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев. — Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. — 164 с.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**65 ЛЕТ ДонГТИ.
НАУКА И ПРАКТИКА.
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ИННОВАЦИИ**

Сборник тезисов докладов
юбилейной международной научно-технической конференции
13–14 октября 2022 г.

Часть 1

В авторской редакции

Художественное оформление обложки

Н. В. Чернышова

Заказ № 247.

Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офс. Печать RISO.

Усл. печат. л. 15,35. Уч.-изд. л. 13,2.

Издательство не несет ответственности за содержание
материала, предоставленного автором к печати.

Издатель и изготовитель:

Донбасский государственный технический институт
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР, 94204

(ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР, ауд. 2113, т/факс 2-58-59)

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя
и распространителя средства массовой информации
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016.