

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Липецкий государственный технический университет»**

ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

СОВРЕМЕННАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ НОВОГО ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ

**ПОСВЯЩАЕТСЯ 10-ЛЕТИЮ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ЛГТУ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**III ВСЕРОССИЙСКОЙ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**21-23 ОКТЯБРЯ 2020 г.
ЛИПЕЦК**

Липецк
Липецкий государственный технический университет
2020

УДК 669(06)

С 568

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Коршиков В.Д.

С 568 Современная металлургия нового тысячелетия, посвящается 10-летию Металлургического института ЛГТУ : сб. науч. тр. III Всеросс. (с международным участием) науч.-практ. конф., 21-23 октября 2020 г., Липецк. – Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2020 . – 232 с. – Текст: электронный

ISBN 978-5-00175-026-0

В сборник научных трудов вошли материалы Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, проходившей с 21 по 23 октября 2020 года в г. Липецке, на базе Липецкого государственного технического университета. В издании содержатся результаты научных исследований в области металлургии, химии, оборудования металлургических цехов. Представляет интерес для специалистов металлургической отрасли.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель программного комитета:

Сараев Павел Викторович — ректор ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», д-р техн. наук

Сопредседатели программного комитета:

Погодаев А.К. – первый проректор ЛГТУ, д-р техн. наук

Кузенков С.Е. – проректор по науке и инновациям ЛГТУ, канд. техн. наук

Лихарев С.К. – вице-президент по логистике ПАО «НЛМК», канд. ф-м. наук

Мельник С.П. – директор дирекции по безопасности ПАО «НЛМК», канд. экон. наук

Грачёв С.Н. – директор Технической дирекции ПАО «НЛМК»

Дагман А.И. – директор Технической дирекции дивизиона электротехнических сталей ПАО «НЛМК», канд. техн. наук

Ефимчук И.П. – директор дирекции по обучению и развитию персонала ПАО «НЛМК»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель организационного комитета:

Чупров В. Б. – директор Металлургического института ЛГТУ, канд. техн. наук

Заместители председателя:

Бельский С. М. – профессор кафедры обработки металлов давлением ЛГТУ, д-р техн. наук

Русakov М. Ю. – начальник управления по обучению и развитию персонала Дирекции по персоналу ПАО «НЛМК»

Ответственный секретарь:

Скаков С. В. – зам. директора МИ ЛГТУ по научной работе

Члены организационного комитета:

Мазур И.П. – зав. кафедрой обработки металлов давлением ЛГТУ, д-р техн. наук

Цыганов И.А. – зав. кафедрой физического металловедения ЛГТУ, канд. техн. наук

Роговский А.Н. – зав. кафедрой металлургических технологий ЛГТУ, канд. техн. наук

Жильцов А.П. – зав. кафедрой металлургического оборудования ЛГТУ, канд. техн. наук

Калмыкова Е.Н. – зав. кафедрой химии ЛГТУ, д-р хим. наук

УДК 669(06)

ISBN 978-5-00175-026-0

© Коллектив авторов, 2020

© ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Коршиков В. Д., Конев В. А., Конев М.В.

К вопросу использования топлива RDF в доменных печах.....6

Шмидт А.А., Володин И.М.

Исследование операции глубокой вытяжки деталей сложного профиля из трансверсально-изотропной высокопрочной стали.....17

Ермолаева Т.Н.

Совершенствование схем анализа материалов металлургического производства методом атомной эмиссионной спектроскопии.....24

Ермолаева Т.Н., Якубенко Е.В., Черникова И.И.

Анализ конструкционных сталей и медных сплавов методом АЭС ИСП с искровым пробоотбором.....31

Журавлева М.Г., Сараев П.В., Домашнева Е.Л.

Моделирование процессов металлургического производства на основе ANFIS с учетом кластеризации входных переменных.....38

Вишневский Д. А., Жильцов А. П., Сотников А.Л., Бондарь Н.А.

Повышения безотказности металлургического оборудования методами контроля психофизиологических параметров работника в режиме реального времени.....45

Полякова А.В.

Повышение механических свойств детали типа втулка методом совмещения редуцирования-дорнования.....51

Полякова А.В., Поляков А.О.

Способы предотвращения потери жесткости трубной заготовки при изготовлении втулки шестерни главной передачи грузового автомобиля.....57

Поляков А. О., Лавриненко В.Ю.

Ресурсосберегающая технология получения деталей типа кольцо методом сжатия.....62

Кожевников А.В., Смирнов А.С., Кожевникова И.А.

Совершенствование процессов тонколистовой прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения.....68

Должанова А.А. Козлов С.В., Фарафонова О.В.

Исследование возможности кинетического ингибирования образования карбоната кальция в оборотной воде.....74

Еронько С.П., Вишневский Д.А., Ткачев М.Ю., Назаренко В.В.

Комплексное использование компьютерного и натурального моделирования при конструировании металлургического оборудования.....79

Кузьмин Г.О., Левченко Э.П. Аппаратно-программный комплекс контроля охлаждающей жидкости МНЛЗ.....	86
Джаксымбетова М.А., Мазур И.П., Канаев А.Т. Структура и свойства стержневой арматурной стали, упрочненной методом прерванной заковки.....	91
Косанова И.М., Мазур И.П., Канаев А.Т. Градиентно-слоистые структуры, сформированные при поверхностно-плазменной закалке колесной стали.....	98
Роговский А.Н., Шипельников А.А., Скаков С.В., Бобылева Н.А., Тюленев Е.Н., Кононыхин Г.Н., Глебов В.П. Моделирование гидродинамики стали в промежуточном ковше УНРС при подаче аргона через пористую балку	105
Горбунов К.С., Бахаев К.В. Исследование асимметричного процесса прокатки на стане 2000 ПАО «НЛМК».....	112
Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., Салько О.Ю., Куис Д.В. Анализ процесса прессования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице новой конструкции.....	117
Панин Е.А., Лежнев С.Н., Пищиков В.Е., Тымченко А.А. Исследование процесса деформирования в равноканальной ступенчатой матрице новой конструкции на основе компьютерного моделирования.....	124
Осинин А.В., Осинин В.Ф., Лупова И.А., Герасименко Т.А. О повышении эффективности литья черных и цветных металлов путём совместного использования электрогидравлического и индукционного методов.....	131
Павлиненко О.И., Левченко Э.П. Приготовление остроугольной стальной дроби методом разрушения «молот по наковальне»	134
Петренко А.В., Чернышов Е.А., Иванова Е.О., Левченко Э.П. Эффективный способ прочистки канализационных труб.....	140
Шкарин А.Н., Бельский С.М., Пименов В.А. Аппроксимация контура профиля поперечного сечения горячего подката.....	145
Петров П.А., Ульяницкий В.Н. Распределение энергосиловых параметров процесса резки при обработке простых сортовых профилей фасонными ножами.....	150
Михайлов В.Г., Мещеряков Н.С., Ким Д.С. Оценка эффективности применения в агломерационной шихте древесной щепы.....	157

Кузьмин А.Ю., Жильцов А.П.

Повышение производительности комплекса оборудования участка подготовки шихтовых материалов к загрузке на колошник доменной печи..... 166

Долгих Ю.Н., Шиловских О.Ю., Бучек Д.Б., Терехов А.А.

Применение магнезиальных материалов для наведения ковшевого шлака в конвертерном цехе №1 ПАО «НЛМК»..... 171

Жильцов А.П., Соколов Д.С., Костылев Д.Е.

Совершенствование технического обслуживания и ремонтов оборудования прокатного комплекса с использованием мобильных систем..... 177

Шаталов Р.Л., Максимов Е.А.

Повышение качества полос из высоколегированной, труднодеформируемой и коррозионностойкой стали путем правки изгибом с растяжением..... 183

Медведев В.А., Загоскин Е.Е., Шаталов Р.Л.

Исследование эффективности различных технологий производства деформированных стальных тонкостенных сосудов методами холодной штамповки и горячей деформации на прокатно-прессовой линии..... 189

Филатов М.А., Левченко Э.П., Карпук И.А., Кашеев А.В.

Бестрансмиссионное обеспечение движения мелющей загрузки и его преимущества..... 194

Москалев Д.Н., Цыганов И.А.

Неметаллические включения под поверхностью тонкой проволоки диаметром 0.30 мм для производства металлокорда 200

Харламов Ю.А., Петров П.А., Вишневецкий Д.А.

Восстановление параметров качества изношенных поверхностей трения 204

Пономарев М.К., Бахаев К.В.

Анализ микроструктуры низколегированной стали после охлаждения..... 211

Саитгараев А. А.

Оптимизация технологического режима АЦВ КЦ-1 с целью достижения пониженного содержания углерода в расплаве..... 215

Глущенко С. Р.

Применение методологии LEAN SIX SIGMA при оптимизации процесса планово-предупредительных ремонтов металлургического оборудования на примере агрегатов защитных покрытий цеха трансформаторной стали ПАО «НЛМК»..... 220

Власенко Д. А.

Аналитический метод определения параметров процесса свободного ударного контакта..... 226

УДК 662.659

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА RDF В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ

Коршиков В. Д.¹, Конев В. А.², Конев М.В.²

¹Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

²ЗАО «Липецкметаллургпроект», Липецк, Россия

ON QUESTION OF REFUSE DERIVED FUEL USAGE IN BLAST FURNACES

Korshikov V.D.¹, Konev V.A.², Konev M.V.²

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²CJSC «Lipetskmetsallurgprojeckt», Lipetsk, Russia

Аннотация: Рассмотрены галогенорганические соединения, отмечен их вред для экологии. Приведены способы ликвидации хлорорганических отходов в доменных печах, рассмотрен механизм циркуляции хлора в шахте доменной печи с появлением соединений хлора в дымовых газах. Высказано предположение о том, что при превышении определенной концентрации хлора в печи, он не связывается в полной мере оксидами кальция, магния, железа и алюминия. Отмечено наличие безопасной технологии переработки ТКО в топливо.

Ключевые слова: галогенорганические соединения, поливинилхлорид, ПВХ, ликвидация хлорорганических отходов, механизм циркуляции хлора в доменной печи

Abstract: Halogen-organic compounds are considered, their damage to ecology is noted. Methods of elimination of organo-chlorine wastes in blast furnaces are presented, mechanism of chlorine circulation in blast furnace shaft with appearance of chlorine compounds in flue gases is considered. It has been suggested that when a certain chlorine concentration in the furnace is exceeded, it is not fully bound by calcium, magnesium, iron and aluminum oxides. The availability of safe technology for processing solid municipal waste into fuel was noted.

Key words: Halo-carbon, polyvinyl chloride, PVC, elimination of organo-chlorine waste, chlorine circulation in the blast furnace

Авторы статьи в 2011÷2012гг. участвовали в федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007÷2012 годы», по теме: «Разработка метода подготовки топлива из твердых бытовых отходов (ТБО) для печей высокотемпературного синтеза цементного клинкера (Государственный контракт № 16.515.11.5078 от 18 октября 2011г.).

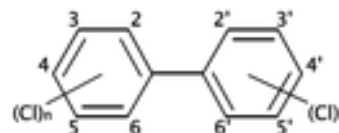
Был исследован морфологический состав остающихся после сортировки остатков ТБО, так называемых «хвостов», направляемых в настоящее время

на захоронение на полигон. Был разработан способ переработки «хвостов» твердых бытовых отходов в топливо для печей высокотемпературного синтеза цементного клинкера (патент RU 2479622). Исследования теплоты сгорания образцов полученного по данному патенту топлива проводились в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург), теплота сгорания определена в «калориметрической бомбе» и составила 30,7 МДж/кг.

Введение

Полихлорированные дифенилы (ПХД), или полихлорированные бифенилы (ПХБ), – группа органических соединений, включающая в себя все хлорозамещённые производные дифенила (1 ÷ 10 атомов хлора, соединённые с любым атомом углерода дифенила, молекула которого составлена из двух бензольных колец), отвечающие общей формуле $C_{12}H_{10-n}Cl_n$.

Полихлорированные дифенилы
(ПХД)



И ПХД, и ПХБ по степени токсичности входят в 1-й класс опасных веществ. Они не только крайне опасны для человека, но и способны нанести непоправимый вред окружающей среде.

В СССР ПХБ в массовом количестве производили с 1934 до конца 1995 года и в основном применяли в качестве диэлектрических жидкостей в трансформаторах и конденсаторах под названиями «Совол» и «Совтол». Также их использовали в качестве пластификаторов при производстве лаков и полимерных материалов, смазок и фунгицидов для защиты древесины. Кроме того, наша промышленность выпускала продукт под названием Трихлордифенил. Он предназначался для арктических широт и состоял на 85% из Совола. Был выпущен также Гексол, содержащий 25% Совола и 75% гексахлорбутадиена. В то время не было известно об их негативном влиянии на человека и природу.

В силу высокой опасности ПХБ для окружающей среды и здоровья населения полномочными представителями 92 государств на Конференции, проходившей в Стокгольме 22-23 мая 2001 года была принята и открыта для подписания постоянно действующая Конвенция: «Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях». Цель Конвенции заключается в охране здоровья человека и окружающей среды от стойких органических загрязнителей.

Россия приняла решение подписать Конвенцию (Постановление Правительства РФ от 18.05.2002 N 320). Она была ратифицирована Федеральным законом от 27.06.2011 № 164-ФЗ.

Во исполнение принятых Россией обязательств по запрету и контролю стойких органических загрязнителей (СОЗ), а также в связи с принятием мер для уничтожения или уменьшения выбросов СОЗ (в особенности полихлорбифенилов), органы государственного управления обязаны обеспечить выполнение мер, связанных с изъятием и утилизацией энергетического оборудования, содержащего ПХБ. Ответственными за выполнение требований Стокгольмской конвенции по безопасному обращению и удалению ПХБ-оборудования и отходов являются предприятия, имеющие на балансе такое оборудование и отходы.

Важным требованием к профессиональной технологии уничтожения ПХБ является способность снизить их концентрацию до степени менее 0,001%. Процесс их ликвидации должен гарантировать безопасность при отказах, таких как остановка подачи электричества, без рисков для персонала и оборудования. Подготовка и подача ПХБ в процесс их технологической ликвидации должна быть безопасной, несложной и контролируемой. Оборудование и контрольные приборы должны быть простыми и прочными, предпочтительно использующими местные ресурсы.

Для сведения:

Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения («ЦНИИМаши») разработана схема утилизации (сжигания) «Совтола». Согласно технологической инструкции после слива «Совтола» из трансформатора – обмотки, магнитопровод (активное железо) и внутренней части корпуса трансформатора должны промываться растворителем, который при этом загрязняется и также подлежит утилизации (сжиганию). Только после промывки обмотки и внутренних частей корпуса можно разобрать и сдавать на утилизацию черный и цветной металлический лом.

О ликвидации хлорорганических отходов в доменных печах

Известны методы утилизации хлорорганических отходов, материалов содержащих галогены (пластики ПВХ) в доменных печах. Данные методы считаются безопасными и экологически чистыми.

Мы считаем, что это не в полной мере соответствует действительности.

Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие "Экоспектр" разработан и запатентован способ сжигания хлорорганических отходов в доменной печи. (Патент RU 2119125 «Способ сжигания хлорорганических отходов») [1].

В соответствии с этим способом хлорорганические отходы подаются в фурменную зону доменной печи. В фурменной зоне при температуре 1700 – 1900°C и наличии окислительной среды происходит термическое разложение и окисление хлорорганических отходов с образованием в конечном итоге углекислого газа и хлористого водорода (HCl). По мнению авторов патента, наличие в доменной печи оксидов железа, кальция, магния и алюминия приводит к нейтрализации хлористого водорода и образованию хлоридов железа, кальция, магния, алюминия и др., которые удаляются из печи в составе доменных шлаков. Что, по мнению авторов патента, предотвращает попадание коррозионноактивного хлористого водорода и газообразного хлора в доменный газ и препятствует образованию вторичных хлорорганических соединений.

Предложенный способ был проверен на доменной печи №2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»). Исходным материалом для сжигания использовался совтол (смесь из 70% пентахлорбифенила и 30% трихлорбензола). В патенте RU 2119125 приведены результаты исследований, выполненных авторами патента. Приводятся результаты подачи в фурменную зону доменной печи различного количества совтола в единицу времени на 1 м³ дутья:

Пример N 1. Совтол подавался в фурменную зону доменной печи в количестве 4 кг/мин при объеме дутья 2200 м³/мин, что соответствовало соотношению подачи совтола в количестве 1800 мг на 1 м³ дутья. В доменном газе не обнаружены хлористый водород (HCl), молекулярный хлор (Cl₂) и хлорорганические соединения.

Пример N 2. Совтол подавался в фурменную зону доменной печи в количестве 7 кг/мин при объеме дутья 2300 м³/мин, что соответствовало соотношению подачи совтола в количестве 3040 мг на 1 м³ дутья. В доменном газе не обнаружены HCl, Cl₂. Отмечено наличие хлорорганических соединений в концентрации 0,45 мг/м³, что ниже уровня ПДК – 1 мг/м³.

Пример N 3. Совтол подавался в фурменную зону доменной печи в количестве 8 кг/мин при объеме дутья 2000 м³/мин, что соответствовало соотношению подачи совтола в количестве 4000 мг на 1 м³ дутья. В доменном газе не

обнаружены HCl, Cl₂, концентрация хлорорганических соединений составила **1,2 мг/м³** (превышен уровень ПДК рабочей зоны).

В таблице №1 приведены полученные экспериментальные данные о наличии хлорорганических соединений в доменном газе в зависимости от подачи на утилизацию в фурменную зону доменной печи различного количества совтола в единицу времени на 1 м³ дутья.

Таблица 1. Наличии хлорорганических соединений в доменном газе в зависимости от подачи в единицу времени на 1 м³ дутья

Подача совтола 1800 мг на 1м ³ дутья	В доменном газе не обнаружены HCl, Cl ₂ , и хлорорганические соединения.
Подача совтола 3040 мг на 1м ³ дутья	В доменном газе не обнаружены: HCl, Cl ₂ . Отмечено наличие хлорорганических соединений в концентрации 0,45 мг/м ³ .
Подача совтола 4000 мг на 1м ³ дутья	В доменном газе не обнаружены: HCl, Cl ₂ . Отмечено наличие хлорорганических соединений в концентрации 1,2 мг/м ³ .

HCl – хлористый водород

Уровень ПДК рабочей зоны – 1 мг/м³.

Cl₂ – молекулярный хлор

Таким образом, проведенные авторами указанного выше патента эксперименты на доменной печи №2 ПАО «НЛМК» с подачей в фурменную зону печи различных, но незначительно отличающихся друг от друга количеств совтола показали следующее.

Несмотря на несоизмеримо высокое содержание в доменной печи оксидов железа, кальция, магния и алюминия по сравнению с количеством подаваемого в фурменную зону печи совтола во втором и третьем случаях в доменном газе обнаруживаются хлорорганические соединения. То есть во внутреннем пространстве печи превышает предельная концентрация содержания хлора и его излишки уходят с доменным газом в виде соединений хлора с углеродом.

В охранном документе (патент RU 2502922 «Способ утилизации хлорорганических отходов») [2], приведены данные экспериментов проведенных в лабораторных условиях на установке, моделирующей процесс выплавки чугуна в печи шахтного типа (печь Таммана) по утилизации хлорорганических отходов при увеличении подачи в печь хлорсвязующей добавки в виде карбоната кальция (CaCO₃). Способ был проверен в лабораторных условиях на установке, моделирующей процесс выплавки чугуна в печи шахтного типа (печь Таммана), с использованием материалов, представляющих собой смесь: 45 мас. % окатышей Качканарского ГОКа и 55 мас.% агломерата Качканарского ГОКа. Показатели и условия плавки в печи Таммана соответствовали показа-

телям и условиям, необходимым, для получения одной тонны чугуна в доменной печи: расход кокса – 440 кг, расход дутья 1262 м³, масса шихтовых материалов – 1413 кг, хлорсвязующие добавки в количестве **50-75** кг, температура колошникового газа – 300°С, температура фурменного очага – 1988°С. Количество подаваемых на утилизацию хлорорганических отходов, таких как «Совол» или «Арохлор 1221» – 1 кг., при поддержании вязкости шлакового расплава 0,2-0,5 Нс/м². Установлено, что концентрация хлористого водорода и хлора в отходящих газах печи Таммана не превышала предельно допустимых концентраций – для хлористого водорода – 5,0 мг/м³, для хлора – 1,0 мг/м³. Результаты проведённых исследований приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Утилизируемая техническая смесь	Добавка к шихте	Вязкость шлака, Нс/м ²	Масса добавки, кг	Концентрация в газовой фазе, мг/м ³	
				HCl	Cl ₂
Совол	CaCO ₃	0,480	20	5,04	0,196
Совол	CaCO ₃	0,507	50	3,61	0,184
Совол	CaO*SiO ₂	0,260	75	3,70	0,195
Совол	CaMg(CO ₃) ₂	0,497	50	3,88	0,200
Арохлор 1221	CaCO ₃	0,507	50	2,72	0,126

Мы предполагаем, что и в первом и во втором случаях при исследованиях имели место кратковременные замеры по определению содержания хлорорганических соединений в колошниковом газе. Мы не оспариваем того факта, что подаваемые в фурменную высокотемпературную зону хлорорганические отходы разложились в среде кислородсодержащего газа с образованием хлора (Cl) и хлористого водорода (HCl). Опытные данные свидетельствуют о том, что при 10% избытке водяных паров над стехиометрическим расходом при температуре более 1000°С обеспечивается практически полное связывание хлора в HCl [3]. И хлор, и хлористый водород – продукты газообразные. Поднимаясь по шахте печи вверх, они вступают в реакцию с оксидами металлов, присутствующими в шихте доменной печи, а также в футеровке шахты печи с образованием хлоридов.

Практически все хлориды летучи. В Таблице 3 указаны некоторые теплофизические свойства хлоридов металлов [4, 5], в таблице 3.1 некоторые физические свойства металлов и их хлоридов [6, 7].

Таким образом, в верхних горизонтах печи хлориды конденсируются на относительно холодных материалах шихты и с ними опускаются в нижние, высокотемпературные горизонты печи.

Таблица 3. Некоторые теплофизические свойства хлоридов металлов

Хлорид	Плотность в жидком состоянии при температуре		Температура плавления хлорида, °С	Температура кипения хлорида, °С
	°С	кг/м ³		
BaCl ₂	1000	3120	962	1560
CaCl ₂	850	2030	775*	1935,5*
NaCl	850	1505	801	1413
KCl	780	1539	771	1500 возг.
MgCl ₂	752	1686	714	1412
NiCl ₂	25	3510*	1009*	985 возг.*
FeCl ₂	25	3160*	677	1026
MnCl ₂	25	2977*	650	1190
ZnCl ₂	25	2910*	318 / 283*	756 / 732*
PbCl ₂	25	5980*	501	956
CaCO ₃	25	2710*	1339	Разлагается
MgCO ₃	25	3050*	> 400	Разлагается
Na ₂ CO ₃	25	2509	851	Разлагается

* – [5]

Таблица 3.1. Некоторые физические свойства металлов и их хлоридов

Металл	Температура плавления металла, °С	Температура кипения металла, °С	Температура плавления хлорида, °С	Температура кипения хлорида, °С
<i>Тяжелые металлы</i>				
Pb ⁺²	327,4	1750	501	956
Sn ⁺²	231,9	2270	247	649
Cd	321	767	568	975
Zn	419,5	906	318	756
Cu	1083	2310	630	993
Ni	1455	2900	1030	987
Co	1492	3100	727	1053
<i>Металлы группы железа</i>				
Fe ⁺³ Fe ⁺²	1539	2450	309 677	320 1026
Mn MnCl ₂	1250	2150	650	1190
Cr ⁺³	1877	2480	1152	1300
V ⁺⁴	1700	3000–3400	–28	153,7
Mo	2625	4700	194	268
W	3400	5900	283	348
Ti	1668	3330	–24	136
Nb	2500	3700	212	240
Ta	2850	5300	207	234
Au ⁺³ Au ⁺¹	1064,5	2947	288 –	265 289,5
Ag	960,8	2184	455	1564
Pt ⁺² Pt ⁺⁴	1769	4520		

Исследованиями по определению содержания хлора в объектах доменного производства, выполненными д.т.н. Бебешко Г.И.(АО «Государственный

научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет») и к.т.н. Муравьевой И.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС») показано, что большая часть хлоридов удаляется из печи с колошниковой пылью. [8].

В Таблице 4 приведен элементный состав проб доменного шлака и пылеобразных отходов, полученный методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S8 TIGER. [8].

Таблица 4. Элементный состав образцов шлака и пылеобразных отходов, полученный методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Предприятие	Соединение	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	WO ₃	MnO	Cl
Доменный шлак ПАО «Тулачермет»	%(по массе)	38,07	36,65	4,82	4,52	1,15	0,73	0,40	0,31	0,22	0,13	0,06	0,04
ПАО «Косогорский металлургический завод» Пыль после ПУ	%(по массе)	8,48	7,39	3,21	1,84	S 0,46	0,98	0,27	47,39			0,70	0,36
ПАО «Косогорский металлургический завод» Пыль после СГО	%(по массе)	13,33	17,13	6,37	5,69	S 0,77	3,94	1,99	41,60		Zn 0,16	0,61	2,00

Примечание: ПУ – пылеулавливатель; СГО – сухая газовая очистка.

Из данных приведенных в Таблице 4 следует, что содержание хлора (Cl) в пылеобразной составляющей колошникового газа значительно, в 10÷50 раз, превышает содержание хлора в доменных шлаках.

Подобное распределение хлора в объектах доменного производства может быть объяснено высокой летучестью хлоридов металлов, позволяющей им легко переходить в газовую фазу.

*На свойствах высокой летучести хлоридов основано такое направление в металлургии, как **хлорная металлургия**. [4, 6, 7].*

В основе процесса лежит взаимодействие окислов или сульфидов металлов с хлором или хлоридом водорода по обратимым реакциям. Сущность хлорной металлургии заключается в образовании хлоридов металлов и их испарения в газовую фазу. Таким образом, из руд, промышленных продуктов и отходов металлов извлекаются металлы путем взаимодействия их с хлорирующим агентом. Многие хлориды обладают высоким давлением их паров

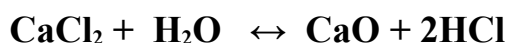
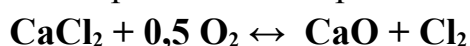
в интервале температур 300-1100 °С, что позволяет осуществить процесс получения металлов без расплавления всей массы, перерабатываемого материала. Как правило, процесс хлорирования основан на избирательном хлорировании металлов (железо и вмещающие породы остаются в исходном состоянии).

Переход хлоридов металлов в газовую фазу происходит как испарением из расплава (Cu, Zn, Pb, Sn), так и сублимацией (Ni, Co, Wo, Mo и др.). В присутствии кислорода хлориды тяжелых цветных металлов разлагаются с образованием оксидов металлов.

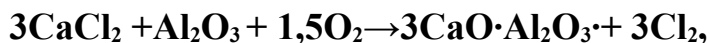
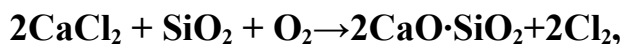
Главными компонентами газовой фазы при хлорировании служат хлор и хлористый водород. Содержание их в газовой фазе определяет глубину протекания процесса хлорирования, ее интенсивность и увеличение извлечения металлов.

Самыми активными хлоринаторами при хлорировании по степени активности являются Cl_2 , HCl, $CaCl_2$, NaCl, KCl, $MgCl_2$ и $KMgCl_3$. При температуре выше 700 °С активность хлора и хлористого водорода одинаковы.[4, 6, 7].

Шихта в доменной печи движется сверху вниз и поступает в зоны высоких температур. В температурных зонах доменной печи 800÷900°С и выше хлориды разлагаются с выделением хлора и хлористого водорода. Например, известно, что при повышенных температурах $CaCl_2$ разлагается кислородом воздуха и парами воды по реакциям:



а в присутствии SiO_2 или Al_2O_3 идут реакции:



Заметное разложение $CaCl_2$ в сухом и влажном воздухе происходит выше 830°С, в присутствии SiO_2 – выше 720°С, в присутствии Al_2O_3 выше 800°С. [9].

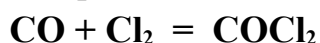
При разложении хлоридов выделяется газообразный хлор и хлористый водород, и процесс повторяется вновь. Таким образом, в доменной печи наблюдается многократная циркуляция хлора и его соединений снизу вверх, из фурменной зоны печи в атомарном либо молекулярном виде и обратно сверху вниз из низкотемпературной зоны в высокотемпературную зону в виде хлоридов кальция, магния, алюминия и железа и пр.

Специалистами института "Ирсид", группы Arselor (Франция) и завода Диллингер (Германия) был проведен термодинамический анализ процессов циркуляции хлора и щелочей в печи с помощью математической модели GEMINI2 (Термодата-Гренобль) с использованием данных о составах более 250 проб материалов и газа доменных печей завода Диллингер. Было установлено, что в печи циркулирует определённое количество хлора, который накапливается и удаляется в зависимости от условий плавки. [10].

При продолжении подачи хлорорганических отходов в доменную печь концентрация хлора и его соединений возрастает и имеющихся в шихте доменной печи оксидов металлов становится недостаточно для связывания хлора и хлористого водорода в хлориды обнаруживаются в доменном газе, в том числе в виде хлорорганических соединений. Данные выводы подтверждаются приведенными выше примерами в указанных охранных документах. Т.е. при достижении определенного критического порога в верхних горизонтах шахты печи будет присутствовать и хлористый водород, и свободный хлор, вступающие в реакцию, в том числе с оксидом углерода.

Известно, что в верхних горизонтах печи присутствуют и окись углерода, и водород (доменный газ).

Также известно, что в интервале температур $150\div 125^{\circ}\text{C}$ окись углерода (CO) вступает в реакцию с газообразным хлором (Cl_2) с образованием:



Для сведения: COCl_2 – это вещество, называемое фосген, является боевым отравляющим веществом. Не эту ли хлорорганику обнаруживали в доменном газе авторы изобретения (патент RU 2119125)?

В промышленности фосген получают из окиси углерода и хлора на активном угле при температуре $125-150^{\circ}\text{C}$ по реакции: $\text{CO} + \text{Cl}_2 \leftrightarrow \text{COCl}_2$. Следует также отметить, что фосген в холодной воде растворяется мало – 0,9%. [11]

Заключение

Авторы считают, что в доменных печах нельзя утилизировать галогенсодержащие материалы (в том числе пластики ПВХ), так как при этом происходит накопление галогенов в объеме шахты доменной печи, и при превышении их определенных концентраций, галогены удаляются из доменной печи вместе с доменным газом в виде хлорорганических соединений. Эти же обстоятельства требуют тщательного химического анализа используемого в качестве

топливных добавок на доменных печах топлива RDF, в том числе изготовленного из твердых коммунальных отходов.

Следует отметить, в частности, тот факт, что в России организаций способных вести постоянный оперативный контроль содержания в газообразных выбросах в атмосферу полихлорированных дифенилов (ПХД) и полихлорированных бифенилов (ПХБ) недостаточно. В Липецкой области таких организаций вообще нет.

Вместе с тем авторы имеют информацию о том, что уже существуют технологии, позволяющие (на первых стадиях процесса переработки ТКО в топливо) извлекать из ТКО и утилизировать галогены. Внедрение подобных технологий позволит использовать изготовленное из ТКО топливо в доменных печах.

Список литературы

- [1] Патент РФ № 2119125, 20.09.1998
- [2] Патент РФ № 2502922, 27.12.2013
- [3] Пальгунов П.П., Сумароков М.В. Утилизация промышленных отходов. М.: «Стройиздат», 1990. – 352 с.
- [4] Ковган П.А., Абуов М.Г., Едильбаев А.И., Задиранов А.Н. Перспективное направление современной металлургии – хлорная металлургия // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 321-324.
- [5] Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник, Минск, «Современная школа», 2005. – 608 с.
- [6] Коршунов Б.Г., Стефанюк С.Л. Введение в хлорную металлургию редких элементов, «Металлургия», 1970. – 344 с.
- [7] Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Издание 2-е, исправленное и дополненное, Л.: «Химия», 1978. – 392 с.
- [8] Муравьева И.В., Бабешко Г.И. Определение хлора в объектах доменного производства // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2017. Том 60, №5. – С. 342-347.
- [9] Позин М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот) ч.1, изд.4-е испр. Л.: «Химия», 1974. – 738 с.
- [10] Lectard E., Hess E., Lin R. Поведение хлора и щелочей в доменной печи и их влияние на изменение свойств агломерата при восстановлении. Behavior of chlorine and alkalis in the blast furnace and effect on sinter properties during reduction. // METEC Congress '03: 3 International Conference on Science and Technology of Ironmaking, Dusseldorf, 16-20 June, 2003: Proceedings. Dusseldorf: Stahlinst. VDEh. 2003. – С. 521-526.
- [11] Франке З. Химия отравляющих веществ. Т.1. Перевод с нем. М.: Химия, 1973. – 440 с.

УДК 621.73.043

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ИЗ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

Шмидт А.А.¹, Володин И.М.¹

¹ Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

RESEARCH OF THE OPERATION OF DEEP DRAWING OF COMPLEX PROFILE PARTS FROM TRANSVERSAL-ISOTROPIC HIGH-STRENGTH STEEL

Alexander Schmidt¹ Volodin I.M.¹

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: Выполнялось исследование, оптимизация операции глубокой вытяжки деталей сложного профиля из трансверсально-изотропной высокопрочной стали. Исследовалась параметрическая оптимизация формы и размера исходной заготовки для более благоприятной вытяжки деталей автомобильного кузова. Разработана деталь внешней средней стойки и усиления бампера автомобильного кузова заданного качества из высокопрочной стали. Разработанная методика показала хорошую сходимость теоретических результатов и экспериментального моделирования и может быть применена в автомобильном производстве аналогичных деталей.

Ключевые слова: глубокая вытяжка; высокопрочные стали; параметрическая оптимизация; автомобильные детали кузова

Abstract: A study was carried out, optimization of the operation of deep drawing of parts of complex profile from transversely isotropic high-strength steel. We studied parametric optimization of the shape and size of the initial billet for a more favorable drawing of parts of the automobile body. The results are obtained and a detail of the outer middle pillar and reinforcement of the bumper of an automobile body of a given quality of high-strength steel is developed. The developed technique showed good convergence of theoretical results and experimental modeling and can be applied in the automotive production of similar parts.

Keywords: deep drawing; high strength steels; parametric optimization; car body parts

Введение

Устанавливалось влияние и параметры технологических и геометрических параметров на НДС детали, предельные возможности деформирования, возникновение поверхностных дефектов в результате нарушения сплошности. Выполнялось исследование и оптимизация вытяжки глубоких деталей из высокопрочной стали и автомобильных деталей сложного профиля для уменьшения

массы и себестоимости производства. Устанавливались возможности оптимизации элементов деталей с сохранением заданных параметров жесткости и прочности готовых изделий.

Настройка инструмента при пластической деформации крупногабаритных деталей из высокопрочной стали оказывает значительное влияние на качество получаемой продукции. При этом наиболее характерными являются износ матрицы и пуансона, отклонения вследствие неравномерности деформации заготовки. Анализ пластического деформирования деталей при различной настройке инструмента может быть осуществлен при различном угле между пуансоном и вертикальной осью деформируемой детали.

Вытяжка детали осуществляется из высокопрочной низколегированной стали, вследствие чего процесс обычно затруднен [1] из-за возникновения разрушений в различных регионах из-за несоответствия углов деформаций пуансона и оси детали. Детали автомобильного производства требуют высокого качества поверхности и повышенных требований к форме, а также точности размеров, и минимизации возможных задиров, царапин, возникновения волнистостей и разрывов, и других поверхностных и внутренних дефектов.

Модели и методы

Выполнялось исследование и оптимизация технологического процесса получения деталей автомобильного производства. Для новой формы деталей применялись элементы на детали внешней средней стойки и детали усиления бампера для течения металла. Глубокая вытяжка осуществлялась с использованием фланцовки с прижимом для получения детали с радиусами закругления и заданной степенью деформации.

Математический аппарат состоял в построении модели равенства энергии деформации и на основе МКЭ, статистических критериев оптимизации и экспертной системы типовых элементов. Выполнялось моделирование вытяжки на первом этапе вытяжной технологической линии с учётом возможной доводки заготовки до готовой детали на последующих правочных и обрезочных операциях. Выходные параметры согласно рассчитанной технологии.

Выполнялось тестирование моделей с учётом вытяжки с варьируемыми параметрами и возникающей степени деформации и напряженно-деформированного состояния.

Силовые режимы учитывались в зависимости от коэффициента вытяжки, радиусов закругления матрицы и пуансона, давление прижима фланца и вычислялось возникающее утонение заготовки в характеристических точках заготовки.

Обсуждение полученных результатов

Деталь 1: Внешняя средняя стойка. Были проведены эксперименты с целью установления зависимостей между параметрами процесса и конечной формой детали и возможностью вытяжки детали внешней средней стойки автомобиля [2] (Рис. 1). Исходная деталь изготавливалась из специального автолиста различной толщицы (1.2-2.5 мм). Выполнялось исследование влияния наладки инструмента на результаты вытяжки: а) анализ интенсивности скоростей деформаций, оценка поля скоростей, величины областей скольжения металла по профилю контактной поверхности; б) анализ технологических схем деформации с помощью численного моделирования; в) анализ относительной силы деформирования, радиусов скругления инструмента, коэффициента трения, толщины заготовки, усилия прижима на результаты вытяжки.



1.0мм 2.2мм высокопрочная сталь 560 МПа
6.5 кг -> 3.3 кг – экономия 3.2 кг

Рисунок 1. Предлагаемая модель для детали внешней средней стойки из цельной заготовки

Оптимизация заготовки и технологии производилась по установленным варьируемым факторам, количество оптимизируемых независимых переменных – 6, параметры технологии – 2, геометрия – 6, кол-во сгенерированных дизайнов – 72.

Был спроектирован новый профиль детали средней стойки автомобиля, получаемый за одну операцию вытяжки. Доводка формы детали после вытяжного перехода осуществлялась путём обрезки по контуру фланца с заданной смазкой [3]. Оптимальная заготовка была спроектирована из цельной листовой заготовки, что позволило снизить норму расхода на 3.3 кг, или 50%. Моделирование осуществлялось в среде CATIA v5.

По результатам испытаний получены технологические решения по изготовлению детали внешней средней стойки уменьшенной металлоёмкости. Показана возможность изготовления детали из единой цельной заготовки (Рис. 1) с требуемыми технологическими параметрами. Норма расхода металла снизилась на 3.3 кг с 6.5 кг до 3.2 кг без потери прочности. Прочностные испытания для предлагаемой модели показали достоверность полученных технических параметров [4].

Значимость настройки инструмента. Выполнено моделирование вытяжки с использованием МКЭ для исследования значимости угла наклона детали и инструмента (Рис. 2) при величинах угла 0° , 1° и 2° . Полученные результаты показали хорошую корреляцию между измерениями напряжений и параметрами вытяжки в вертикальных областях и согласуются с результатами других авторов [4]. Также согласованы соотношения между полученным контактным напряжением, отношениями изгибов и пружинения.

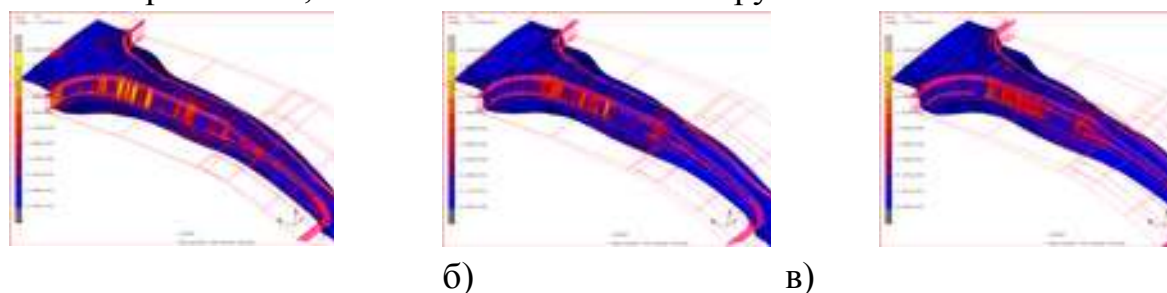


Рисунок 2. Зависимость между углом наклона пуансона и возникающей деформацией в готовой детали внешней средней стойки а) 0° б) угол 1° в) угол 2°

Полученные результаты оценки влияния скоса инструмента по результатам моделирования для изготовления детали (рис. 2) показали, что отклонение оказывает сильное влияние на результаты деформирования, а в случае величины отклонения более 1° , получение детали невозможно в результате возникновения разрыва (табл. 1).

Таблица 1. Влияние скоса на результаты численного моделирования

Угол скоса, $^{\circ}$, α	Разно-высокость заготовки h , мм	Результаты вытяжки
0	0	Равномерная деформация
1	0,27	Обратная вытяжка донной части
2	0,58	Разрыв заготовки в донной части

Деталь 2: Усиление бампера. Спроектирован профиль детали усиления бампера кузова автомобиля, изготавливаемый штамповкой, вместо получения детали прокатом, из цельной заготовки с применением специальных типовых элементов в стенке детали для уменьшения пружинения и обеспечения необхо-

димой жесткости при критических деформациях при столкновении автомобиля с препятствием.

Проведены эксперименты с целью установления зависимостей между параметрами процесса и конечной формой детали и возможностью процесса штамповки [2] (Рис. 3). Выполнялось исследование влияния наладки инструмента на результаты вытяжки: а) анализ интенсивности скоростей деформаций, оценка поля скоростей, величины областей скольжения металла по профилю контактной поверхности, дефектов; б) анализ технологических схем деформации с помощью численного моделирования; в) анализ относительной силы деформирования, радиусов скругления инструмента, коэффициента трения, толщины заготовки, усилия прижима на результаты вытяжки.

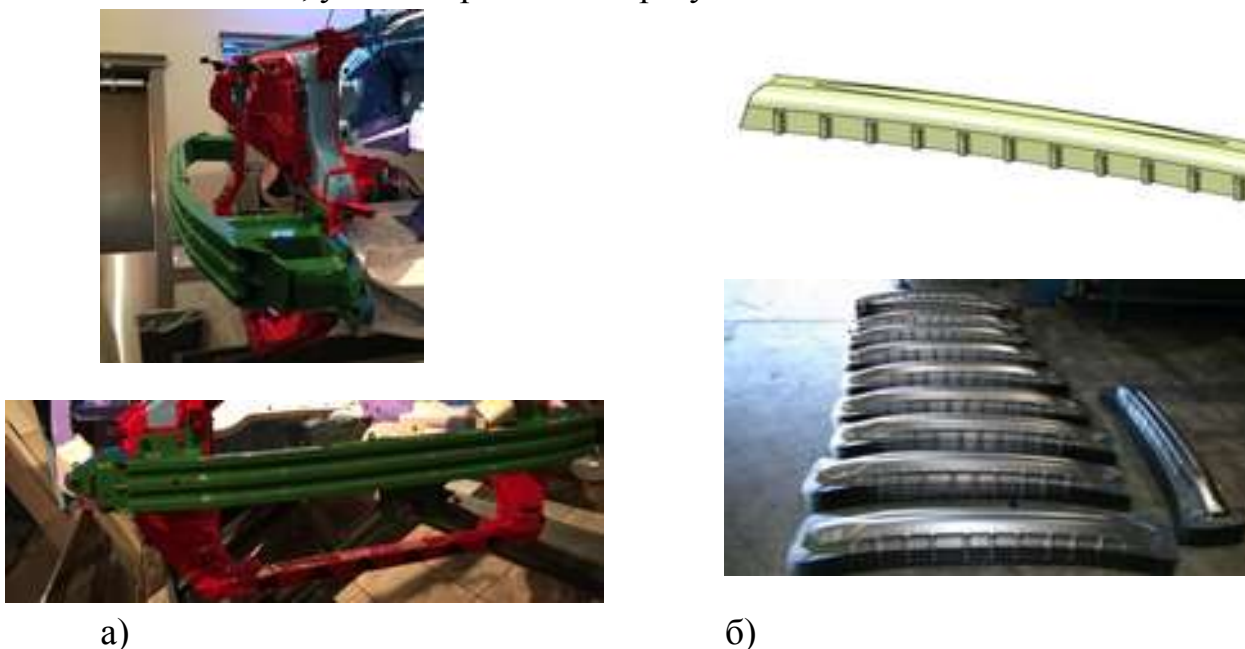


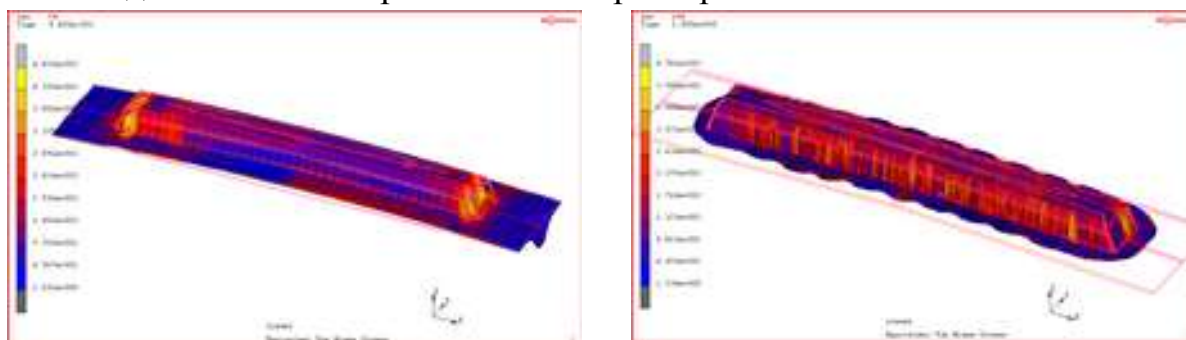
Рисунок 3. Деталь усиления бампера а) исходная деталь; б) оптимизированная деталь

Изучено влияние радиусов скругления на пуансоне и матрице, размеры исходной заготовки, наличие и форма элементов на результаты моделирования изготовления детали.

Выполнялась оптимизация технологии для изготовления детали усиления бампера из высокопрочной стали при предельных деформациях, в результате из исходной детали (Рис. 3 а)) получена деталь оптимизированной формы и размеров (Рис. 3 б)).

Оптимизация формы исходной заготовки усиления бампера. Оптимизация заготовки и технологии производилась по установленным варьируемым факторам, количество оптимизируемых независимых переменных – 9,

параметры технологии – 2, геометрия – 7, кол-во сгенерированных дизайнов – 720. Для течения излишков металла использовали ортогональные плоскости проёма инструмента и рёбра перетока. Указанные рёбра также являются технологическим решением для минимизации влияния пружинения на размеры готовой детали и на её прочностные характеристики.



а) Рисунок 4. Заготовка усиления бампера а) до оптимизации б) после оптимизации

Были установлены интервалы варьирования переменных толщины заготовки, относительных радиусов скругления матрицы и пуансона, давления прижима фланца, коэффициента трения. Определено, что при увеличении относительных радиусов скругления относительная сила уменьшается. Увеличение коэффициента трения приводит к росту относительной силы деформирования. Уменьшение толщины заготовки позволяет уменьшить силу деформирования. В результате проведенного анализа величины напряжений, предложена технология получения штамповкой цельной детали усиления бампера автомобиля и получена рациональная форма заготовки. Толщина заготовки уменьшена с 1.6 мм до 1.2 мм, кол-во хордовых элементов увеличилось с 1 до 4, глубина вытяжки уменьшилась с 115 до 110 мм, масса изделия уменьшилась с 6.71 кг до 5.7 кг.

Установлено влияние анизотропии на силовые режимы и предельные возможности вытяжки. Увеличение коэффициента анизотропии с 0.1 до 2.0 сопровождалось уменьшением относительной силы на 25-30% и уменьшением коэффициента вытяжки на 50%.

Выбор штампованной формы по сравнению с прокатным типовым профилем позволяет снизить норму расхода металла, уменьшить количество переходов для осуществления вытяжки разработанной детали согласно заданному оптимальному контуру, повысить качество выпускаемого изделия и производительность труда.

По результатам испытаний получены технологические решения по изготовлению детали усиления бампера с уменьшением металлоемкости до 15% по сравнению с традиционным прокатным профилем. Получена заготовка с ребрами жесткости для уменьшения пружинения и более равномерного распределения напряжения, заданной величиной степени использования ресурса пластичности заготовки при вытяжке при предельных деформациях.

Выводы

Показана возможность оптимизации получения деталей из стали с минимальным количеством операций из цельной заготовки. Анализ зависимости величины силы от коэффициента вытяжки, относительных радиусов матрицы и пуансона показал наличие статистических зависимостей между указанными характеристиками. Увеличение относительных радиусов матрицы и пуансона, позволило снизить значения силовые режимов.

Предельные коэффициенты вытяжки в зависимости от относительных радиусов матрицы и пуансона увеличивались. Установлено, что при уменьшении относительного давления прижима, предельный коэффициент вытяжки уменьшается. Предельные режимы вытяжки для деталей из высокопрочной стали ограничены величиной максимального напряжения в выходе из очага деформации.

Список литературы

- [1] Evin Emil, Tomáš Miroslav, Kmec Jozef, Németha Stanislav, Katalinic Branko, Wesselyd Emil, The Deformation Properties of High Strength Steel Sheets // Procedia Engineering. - Elsevier, 2014. - Т. 69. - стр. 758-767.
- [2] Schmidt A.A., Numerical Prediction And Sequential Process Optimization In Sheet Forming Based On Genetic Algorithm. // Materials and Manufacturing Processes. - 2011. - Vol. 26. - pp. 521-526.
- [3] Шмидт А.А., Володин И.М., Подбор смазки с учетом коэффициента трения для вытяжки деталей из высокопрочной стали. // Научно-технический и производственный журнал «Сборка в машиностроении, приборостроении». - 2017. - Т. 7. - стр. 321-324.
- [4] Шмидт А.А., Влияние параметров настройки инструмента на оптимизацию вытяжку деталей автомобильного производства // Технологии и оборудование обработки металлов давлением. - Известия ТулГУ. Технические науки, 2015. - 2 : Т. 8. - стр. 156-163.
- [5] G.J Coubrough M.J Alinger, C.J Van Tyne, Angle of contact between sheet and die during stretch–bend deformation as determined on the bending-under-tension friction test system // Journal of Materials Processing Technology. - 2002.

УДК 543.054;543.423

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ АТОМНОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Ермолаева Т. Н.¹

¹*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*

IMPROVEMENT OF SCHEMES FOR ANALYZING METALLURGICAL PRODUCTION MATERIALS BY THE ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY METHOD

Ermolaeva T. N.¹

¹*Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

Аннотация: Предложены новые схемы анализа конструкционных сталей, ферросплавов, кремнеземистых и магниезиальных огнеупоров, доломитов, железорудного сырья методом АЭС ИСП, включающие микроволновую пробоподготовку в автоклаве, позволяющую существенно повысить прецизионность, чувствительность и рентабельность анализа, сократить его продолжительность и трудоемкость. Разработанные методики апробированы в лаборатории металлургического предприятия при анализе стандартных и производственных образцов.

Ключевые слова: Анализ металлургических материалов, АЭС ИСП

Abstract: New schemes are suggested of analyzing engineering alloy steels, ferroalloys, silicon and magnesium-based refractories, dolomites, iron ore raw materials by the ISP-AES method, including microwave sample preparation allowing to raise significantly the accuracy, sensitivity and value of the analysis, to reduce the duration and labor input of transforming target elements into a solution. The developed methods of analysis are verified in a laboratory of a metallurgical plant in analyzing standard samples and prototypes.

Keywords: Analyzing metallurgical production materials, ISP-AES

Введение

Особую роль в аналитическом контроле в черной металлургии играют методы атомной эмиссионной спектроскопии, обеспечивающие быстрое и одновременное определять макро- и микроэлементы в разнообразных по составу пробах. Однако до сих пор отсутствует унифицированный методический подход к анализу с учетом требуемых показателей качества, продолжительности анализа и его рентабельности. Несмотря на большой объем исследований в этой области, актуальным является упрощение процедур пробоподготовки, снижение расхода химических реактивов, улучшение безопасности труда работников лабораторий. До настоящего времени в лабораториях металлургиче-

ских предприятий для анализа сырья и материалов ГОСТ и ТУ рекомендованы одноэлементные методы анализа, характеризующиеся значительной продолжительностью и трудоёмкостью, требующие индивидуальных приёмов пробоподготовки при определении отдельных элементов. Кроме того, установление состава ряда труднорастворимых материалов сопряжено с трудностью перевода образцов в раствор. Для разложения рекомендуется неоднократное и продолжительное упаривание, доплавление нерастворённого остатка. При разложении проб в открытых сосудах возрастает риск потерь летучих компонентов. Непрерывное совершенствование аналитического оборудования, требует рационального сочетания процедур анализа для составления наиболее эффективных схем, сочетающих операции пробоподготовки и измерения аналитического сигнала. Для повышения рентабельности анализа перспективно использование микроволнового разложения пробы в автоклаве и АЭС ИСП.

Материалы и методы исследования

Пробоподготовку материалов осуществляли в микроволновых системах “Milestone High Performance Microwave Labstation ETHOS PLUS” (Италия) или “SpeedWave four” (“Berghoff”, Германия). Спектральный анализ выполняли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой “iCAP 6500 Duo” (“Thermo Scientific”, Англия). При разработке методик пробоподготовки металлургических образцов добивались сокращения массы пробы, продолжительности разложения, объёма и номенклатуры концентрированных кислот. Выбор режима микроволнового разложения осуществляли с использованием ГСО, близких по составу к анализируемым пробам, варьируя состав и соотношение кислот в растворе в интервале температур от 100 до 270 °С и времени выдержки при максимальной температуре от 5 до 30 мин.

Результаты и обсуждение

Состав раствора для микроволнового разложения ГСО, производственных и вспомогательных материалов в автоклаве зависит от элементного и фазового состава анализируемых проб. Экспериментально установлено, что непрерывный нагрев реакционных смесей может привести к бурному кипению кислот, разгерметизации автоклавов и потере летучих компонентов. Поэтому во всех разработанных методиках предложен ступенчатый микроволновый нагрев

реакционных смесей, общий объём которых не превышает 15 мл, с шагом 20-80 °С и выдержкой на каждой ступени в течение 2-5 мин.

Принимая во внимание наличие в пробах конструкционных легированных сталей устойчивых карбидов хрома, молибдена, вольфрама, а также кремния и фосфора, образующих летучие соединения, в состав смеси для разложения включали комплексообразующие соляную и фтористоводородную кислоты, а также окисляющие - азотную и серную [1,2]. Поскольку избыточное содержание легколетучих HF, HCl, а также выделение газообразных продуктов реакции может привести к разгерметизации сосуда и потере целевых компонентов осуществляли четырёхступенчатый нагрев реакционной смеси до 210 °С (рис.1а) с выдерживанием при постоянной температуре в течение фиксированного промежутка времени. Рекомендовано осуществлять микроволновую деструкцию образцов конструкционных легированных сталей массой 0,5 г в смеси кислот HCl, HNO₃, H₂SO₄, HF (3:1:1:0,125), общая продолжительность разложения в смеси кислот с последующим добавлением 0,5 мл H₃BO₃ (4 масс. %) для связывания избытка HF, составляет 60 мин [1,2].

В отличие от конструкционных сталей магнезиальные огнеупоры и доломиты полностью состоят из тугоплавких оксидов магния, кремния, железа, кальция и алюминия. Поэтому в состав кислотной смеси включали фосфорную, соляную, азотную, плавиковую и борную кислоты. Показано, что для предотвращения образования нерастворимых продуктов (MgF₂, Ca[SiF₆], [AlF₆]³⁻) целесообразно проводить разложение в 2 этапа (рис. 1б). На первом этапе в смеси HCl, HNO₃, H₃PO₄ (3:1:1) происходит деструкция пробы и образование аморфного осадка Si(OH)₄•2H₂O, а на втором – перевод Si в раствор и связывание избытка HF в HBF₄ при добавлении смеси HF : 4 % масс. H₃BO₃ (1:2). Низкое содержание оксидов магния, кальция, алюминия (до 5 % масс.) в кремнезёмистых огнеупорах позволяет осуществлять деструкцию в течение одного цикла продолжительностью 83 мин (рис.1в) Поскольку основными компонентами железных руд и доменной пыли являются Fe, FeO, Fe₂O₃, SiO₂, а также сульфиды и сульфаты, в раствор для вскрытия пробы включали концентрированные HCl и HF, раствор H₃BO₃ (4 % масс.) в соотношении 2:1:1,5) [2]. Пробоподготовку осуществляли в два этапа (рис.1, г).

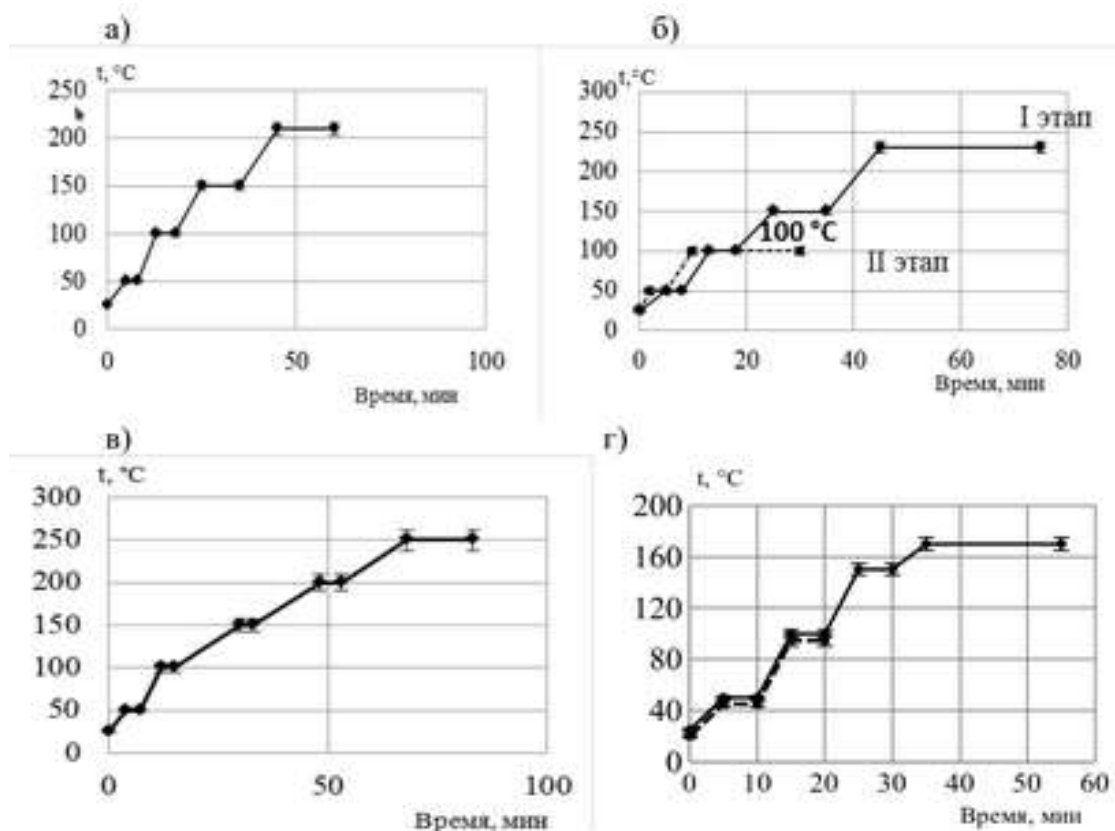


Рисунок 1. Параметры микроволнового разложения конструкционных легированных сталей (а), магниезильных (б) и кремнезёмистых (в) огнеупоров, железных руд и окатышей (г)

Экспериментальным путем установлено, что для растворения ферросилицида циркония, ферросиликохрома, ферробора, ферровольфрама, феррованадия, ферросиликомарганца, силикокальция, ферротитана и шлакообразующих смесей в кислотные смеси необходимо включать плавиковую кислоту, обеспечивающую перевод в раствор не только кремния, но и труднорастворимых силицидов различных металлов, и азотную кислоту, выступающую в роли окислителя [4,5]. Показано, что для вскрытия проб ферровольфрама и ферросилицида циркония оптимальна кислотная смесь $2\text{HNO}_3 + 1\text{HF}$, способствующая количественному переводу в раствор циркония, кремния и вольфрама в виде фторидных комплексов [5]. Применение аналогичного состава реакционной смеси для микроволнового разложения феррованадия (рис.2а) не приводило к полному растворению пробы, поэтому в смесь дополнительно вводили соляную кислоту. При нагреве автоклава до $200\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдалось количественное переведение пробы в раствор. Основу кислотного раствора для микроволнового растворения марганецсодержащих материалов (рис.2е) составляет соляная

кислота. Для исключения разгерметизации автоклава при нагреве до 200 °С в реакционную смесь включали высококипящую серную кислоту, снижающую давление насыщенного пара. Использование смеси такого же состава для разложения ферробора (рис.2б) не обеспечивает полного растворения пробы. Замена серной кислоты на хлорную в смеси на основе HCl, HNO₃, HF, HClO₄, взятых в соотношении 1:1:1:1, способствует полному переводению ферробора в раствор и позволяет исключить процедуру сплавления пробы с пероксидом натрия, используемая в настоящее время в производственных лабораториях.

Учитывая присутствие в силикокальции значительных количеств Si (более 50% масс.) и Ca (более 15% масс.), для полного перевода ферросплава в раствор предложено применять смесь концентрированных соляной, азотной и плавиковой кислот. Поскольку в пробах с высоким содержанием кремния при взаимодействии с HF возможно резкое увеличение давления в автоклаве, вследствие образования летучего фторида кремния, в реакционный сосуд в сухом виде вводили борную кислоту. Образующаяся HBF₄ способствует удерживанию кремния в растворе и предотвращает выпадение в осадок фторидных комплексов кальция и алюминия.

Из-за пассивации титана азотной кислотой, растворение ферротитана (рис.2г) предложено осуществлять в два этапа. На первом этапе образец подвергается действию смеси 2H₂SO₄ + 3HCl + 0,5HF, исключающей разгерметизацию автоклава, а после растворения основной массы пробы в смесь добавлялась азотная кислота. Двухэтапный прием разложения применен и для вскрытия проб ферросиликохрома (рис.2д) из-за пассивации хрома азотной кислотой, используемой на втором этапе. Однако для исключения образования осадка кремниевой кислоты из-за присутствия в ферросиликохроме значительных количеств кремния, соотношение компонентов реакционной смеси на первом этапе предложено изменить (1H₂SO₄ + 2HCl + 1HF) и проводить переводение пробы в раствор в два этапа. На первом этапе проба при 190 °С подвергалась действию смеси кислот, исключающих возникновение избыточного давления в автоклаве, а на втором, после того как прореагировала основная масса образца, в смесь добавлялась азотная кислота.

Для обеспечения прецизионности и правильности определения макро- и микрокомпонентов в промышленных и вспомогательных материалах методом АЭС ИСП были оптимизированы рабочие параметры спектрометра, выбраны аналитические линии элементов, свободные от наложений, установлена степень разбавления растворов, оценено устойчивое состояние плазмы, проведена граду-

ировка спектрометра. Отсутствие значимых спектральных наложений элементной основы на аналитические линии определяемых элементов, а также их взаимного наложения, искажающего результаты анализа, выявляли при анализе водных растворов, содержащих минимальную концентрацию определяемого элемента и максимальную концентрацию матричных и сопутствующих элементов.

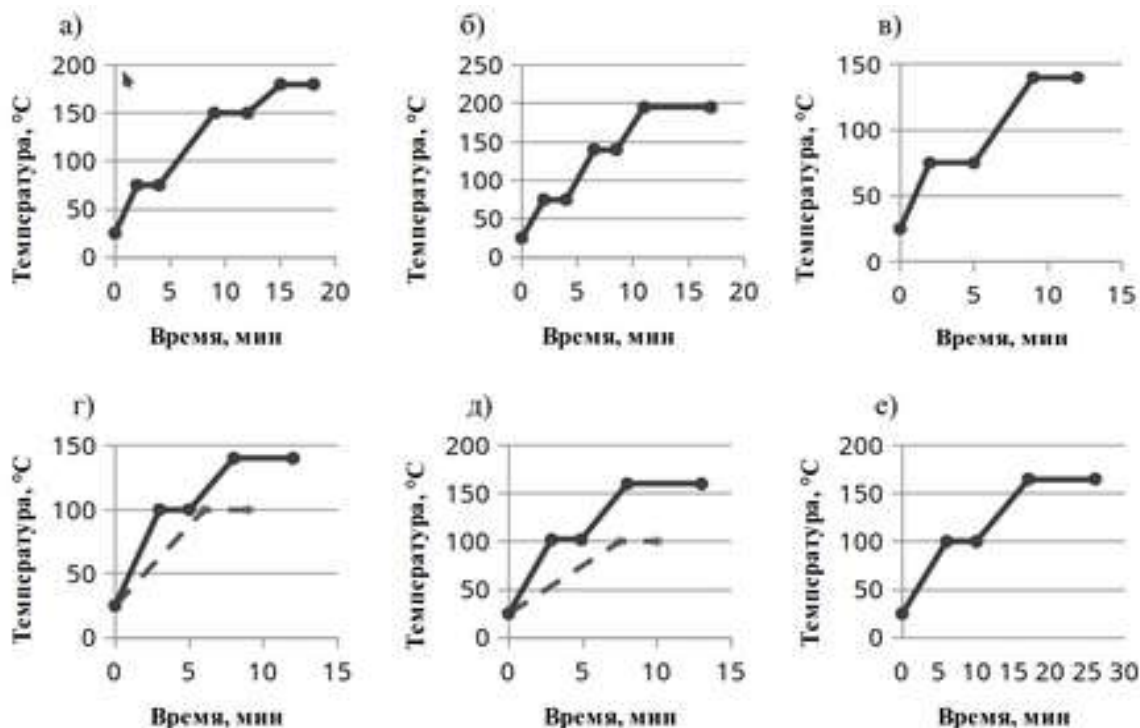


Рисунок 2. Алгоритм микроволнового нагрева при микроволновом разложении ферросплавов: феррованадия (а), ферробора (б), силикокальция (в), ферротитана (г), ферросиликохрома (д) и марганецсодержащих материалов (е)

Определение нормируемых элементов проводили методом градуировочного графика используя зависимость абсолютной или относительной интенсивности (в методе внутреннего стандарта) линий. В качестве внутреннего стандарта использовали Y и Cd. Для повышения чувствительности и воспроизводимости результатов определения была изучена возможность измерения интенсивности нескольких спектральных линий для одного элемента в исследуемом образце и суммирования их (метод многомерной градуировки).

Предложенная схема анализа в сочетании с микроволновой пробоподготовкой позволяет существенно повысить экспрессность и рентабельность анализа за счёт сокращения суммарной продолжительности анализа, уменьшения объёма концентрированных кислот, в сравнении с методиками, рекомендованными ГОСТ (табл.1).

Таблица 1 – Характеристики стандартных (1) и разработанным методик (2) анализа

Образец	Время анализа, ч		Масса пробы для анализа, г		Объем концентрированных кислот, мл	
	1	2	1	2	1	2
Феррониобий	112		3,1		134	6
Ферровольфрам	144		3,55		661	3
Ферробор	80		2,75		225	12
Силикокальций	72		1,5		265	9
Ферротитан	144		10,35		137	8,5
Ферросиликоцирконий	88		1,9		180	8
Марганецсодержащие материалы	128		4,65		442	8
Шлакообразующие смеси	104		1,65		151	9

Методики определения P (ФР.1.31.2015.19430), Si, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Mo (ФР.1.31.2015.20726) в конструкционных сталях и Si, Ca (ФР.1.31.2017.28287) в силикокальции методом АЭС-ИСП после микроволновой пробоподготовки внесены «Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений». Методики определения V, P, Cr в феррованадии и Al, Si, Ti в феррониобии включены в технологический регламент ПАО «НЛМК» и внедрены в аналитическую практику лаборатории металлургического предприятия.

Список литературы.

- [1] Якубенко Е.В. Микроволновая подготовка конструкционных сталей для определения Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, W методом АЭС ИСП / Е.В. Якубенко, З.А. Войткова, И.И. Черникова., Т.Н. Ермолаева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2014. - №1. - С.12-15.
- [2] Якубенко Е.В. Совершенствование схем анализа материалов металлургического производства методом атомной эмиссионной спектроскопии: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 02.00.02/ Якубенко Елена Всеволодовна; Гиредмет.- Москва, 2016. - 22 с.
- [3] E. S. Yakubenko, O. V. Tolmacheva, I. I. Chernikova, T. N. Ermolaeva. Analysis of Siliceous Refractories by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy in Combination with Microwave Sample Preparation// Inorganic Materials, 2018, Vol. 54, No. 14, pp. 30–34.
- [4] Тормышева Е.А. Микроволновая пробоподготовка в анализе ферросплавов, магниезальных огнеупоров и наплавочных порошков методом АЭС ИСП: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 2.00.02/ Тормышева Екатерина Александровна; Гиредмет.- Москва, 2012. – 23 с.
- [5] Черникова.И.И. Разработка способов микроволновой пробоподготовки в анализе ферросплавов, шлакообразующих смесей и рудных материалов методом атомно эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой: автореф. дис. ... канд. хим. наук.: 02.00.02/ Черникова Инна Игоревна ; ВГУ. - Воронеж. 2018. -19 с.

УДК 543.054;543.423

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЭС ИСП С ИСКРОВОМ ПРОБООТБОРОМ

Ермолаева Т. Н.¹, Якубенко Е. В.², Черникова И. И.²

¹ *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

² *Новолипецкий металлургический комбинат, г. Липецк, Россия*

ANALYSIS OF ENGINEERING ALLOY STEELS AND COPPER ALLOYS BY THE ISP-AES METHOD WITH SPARK ABLATION

Ermolaeva Tatyana¹, Yakubenko Elena², Chernikova Inna²

¹ *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

² *Novolipetsk Metallurgical Plant, Lipetsk, Russia*

Аннотация: Оптимизированы условия электроразрядного отбора проб конструкционных легированных сталей и сплавов на основе меди для последующего определения в них нормируемых элементов методом АЭС ИСП по градуировочным графикам, полученным с применением твердых стандартных образцов или их растворов.

Ключевые слова: Анализ металлургических материалов, АЭС ИСП, искровой пробоотбор

Abstract: Optimized conditions for spark ablation of engineering alloy steels and copper-based alloys for the subsequent determination of normalized elements in them by the ICP AES method according to calibration plots obtained using solid standard samples or their solutions.

Key words: Analyzing metallurgical production materials, ISP-AES, spark ablation

Введение

Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) является в настоящее время одним из наиболее информативных и распространенных методов анализа металлургических проб вследствие высокой чувствительности и доступности нового поколения аналитического оборудования. Введение проб в индуктивно связанную плазму обычно осуществляется из раствора, полученного растворением твердых образцов в минеральных кислотах. Однако для анализа относительно однородных проб конструкционных сталей и медных сплавов возможно полностью исключить стадию растворения за счёт прямого АЭС-ИСП анализа с электроразрядным пробоотбором. В настоящее время в лабораторной практике металлургических предприятий в сочетании с методом оптической эмиссионной спектроскопии с

искровым или дуговым возбуждением спектров уже используются способы введения проб после лазерного или искрового пробоотбора. Однако электрическая дуга или искра в сравнении с ИСП характеризуются невысокой стабильностью излучения, что приводит к ухудшению метрологических характеристик анализа. Поэтому в настоящее время особенный интерес представляют многоэлементные, универсальные методы АЭС с ИСП с искровым пробоотбором, которые уже положительно зарекомендовали себя при определении элементов в некоторых цветных и драгоценных металлах и сплавах, керамике, огнеупорном сырье. Ограничением широкому внедрению такого подхода в лабораторную практику может являться отсутствие твёрдых стандартных образцов с необходимыми диапазонами концентраций элементов, что затрудняет градуировку прибора. Решением проблемы может стать использование для построения градуировочных графиков не только твердых стандартных образцов, но и растворов, полученных деструкцией в смеси кислот стружки аттестованных стандартных образцов.

Материалы и методы исследования

Для отбора твердых проб медных сплавов и конструкционных сталей использовали систему искрового пробоотбора SSEA (Solid Sampling and Excitation Accessory, Thermo Scientific, США). Определение элементов выполняли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой «iCAP 6500 Duo», фирмы «Thermo Scientific» (Англия), для контроля параметров процесса применяли персональный компьютер с операционной системой Windows 7 и программным обеспечением iTEVA. Разложение конструкционных легированных сталей осуществляли в микроволновой системе «Milestone High Performance Microwave Labstation ETHOS PLUS» (Италия) с автоклавами ротора высокого давления HPR – 1000/10S (внутренний объём 100 мл, рабочее давление 100 атм). В качестве объектов исследования были выбраны конструкционные стали марок 08пс, 08кп, 15ХМ, 20ХМ, 30ХМ, 30ХМА, 35ХМ, 38ХМ, 30Х3МФ, 12ХН, 20ХН, 45ХН, 50ХН, 20ХНР, 12ХН2, 12ХН3А, 20ХН3А, 30ХН3А, 12Х2НВФМА, 19Х2НВФА, 21Х2НВФА, 23Х2НВФА, 40Х1МФА, 40ХН, 12Х2НВФА и медные сплавы марок М1, МСр0.1, медные слитки из печей с шагающими балками (ПШБ)

Результаты и обсуждение

При искровом пробоотборе происходит образование твердых частиц образца в атмосфере инертного газа под действием высоковольтного разряда при быстром, локальном разогреве участка образца. Таким образом, представительность пробы, поступившей в ИСП определяется основными параметрами искрового пробоотбора: мощностью, амплитудой постоянного напряжения разряда (частотой), продолжительностью предобжига и продувки линии подачи сухого аэрозоля. Параметры индивидуальны для каждой группы образцов и зависят от их химического состава, физических свойств и подбираются экспериментально по максимальной интенсивности и воспроизводимости сигналов анализов.

Поэтому при изучении условий прямого АЭС ИСП анализа конструкционных сталей и медных сплавов исследовали влияние параметров искрового пробоотбора на величину интенсивности линий и относительное стандартное отклонение (s_r) при изменении уровня мощности разряда от 1 до 9 единиц по шкале SSEA (от 2,10 до 3,30 кВт), частоты разряда от 100 до 800 Гц. Было отмечено, что при увеличении мощности искрового отбора проб от 2,10 до 2,55 кВт (от 1 до 4 по шкале SSEA) закономерно возрастает количества частиц аэрозоля, что сопровождается резким увеличением интенсивностей линий элементов (рис. 1а,б,в). Отмечено, что увеличение интенсивностей линий анализов определяется их температурой кипения и концентрацией в анализируемом образце, влияющими на скорость испарения элементов [1,2].

При возрастании интенсивностей спектральных линий P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Mo, W в интервале 2,10 – 2,55 кВт при анализе конструкционных сталей наблюдается снижение относительного стандартного отклонения аналитического сигнала (рис. 2). Для V, Cr, Mn, Mo, W отмечены низкие флуктуации аналитического сигнала уже при мощности искрового пробоотбора 2,25 кВт. А прецизионное определение Mo возможно в более широком диапазоне мощности электрического разряда 2,10 – 3,30 кВт. Дальнейшее увеличение мощности искрового пробоотбора с 2,70 до 3,30 кВт способствует увеличению интенсивностей спектральных линий всех элементов. Однако, при этом наблюдается значительное возрастание относительного стандартного отклонения при регистрации интенсивностей анализов, что, вероятно, связано с укрупнением размера частиц аэрозоля, сопровождающимся неравномерным распылением и мерцанием пробы в ИСП [1]. Учитывая вышеизложенное для одновременного

определения Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Mo, W. с высокой воспроизводимостью ($sr < 1,17\%$) рекомендована мощность искрового разряда 2,55 кВт.

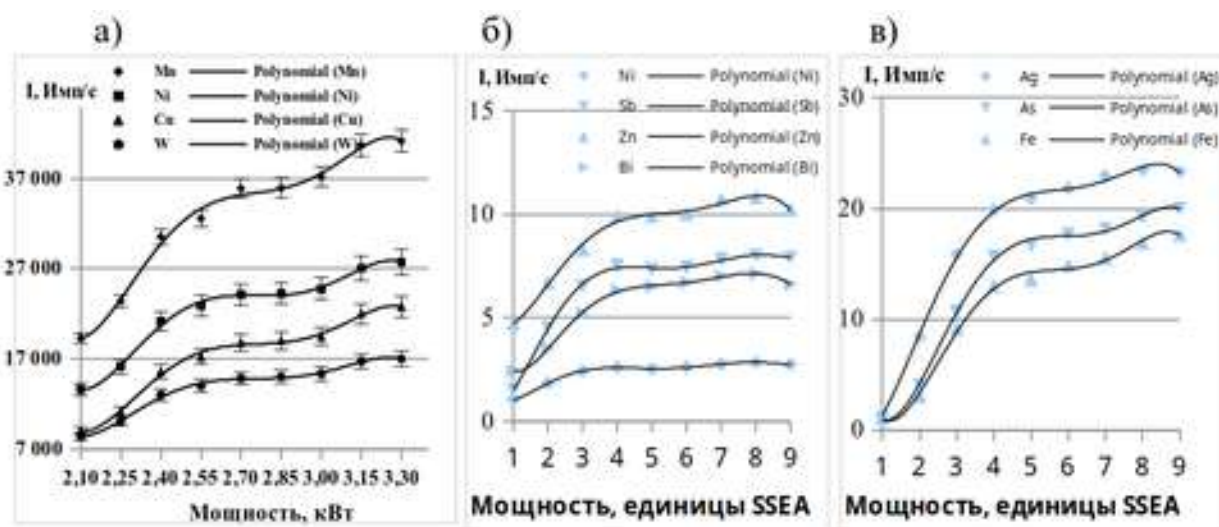


Рисунок 1. Влияние мощности искрового пробоотбора на относительную интенсивность спектральных линий: конструкционная сталь (а), медный сплав (б,в)

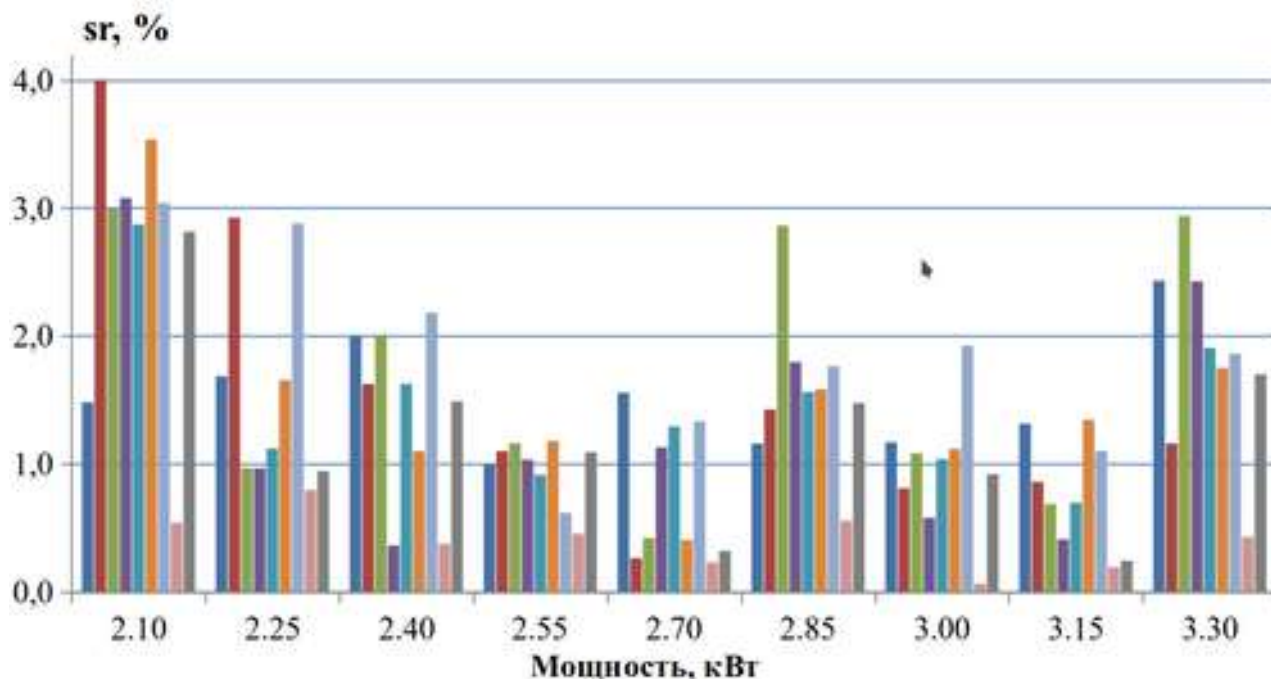


Рисунок 2. Влияние мощности электроразрядного пробоотбора на величину относительного стандартного отклонения интенсивностей аналитических линий элементов ($n = 3$) при анализе конструкционных сталей

Аналогично для медного сплава повышение мощности свыше 2,55 кВт не приводит к существенному увеличению интенсивностей линий определяемых

элементов, поэтому признано нецелесообразным. Наряду с этим, изменение уровня мощности от 2,10 до 2,55 кВт, сопровождается снижением относительного стандартного отклонения при определении Fe, Sb, As, Sn, Mn, Bi, Ag, P, Pb. В то же время подъем мощности искрового разряда до 3,30 кВт увеличивает значение относительного стандартного отклонения при определении Mn, P, Sn, Fe, Ni и Zn (рис. 3). Поэтому с учетом интенсивности линий определяемых элементов и значений относительного стандартного отклонения при их регистрации было предложено проводить искровой пробоотбор, как и для конструкционных сталей, при уровне мощности 2,55 кВт.

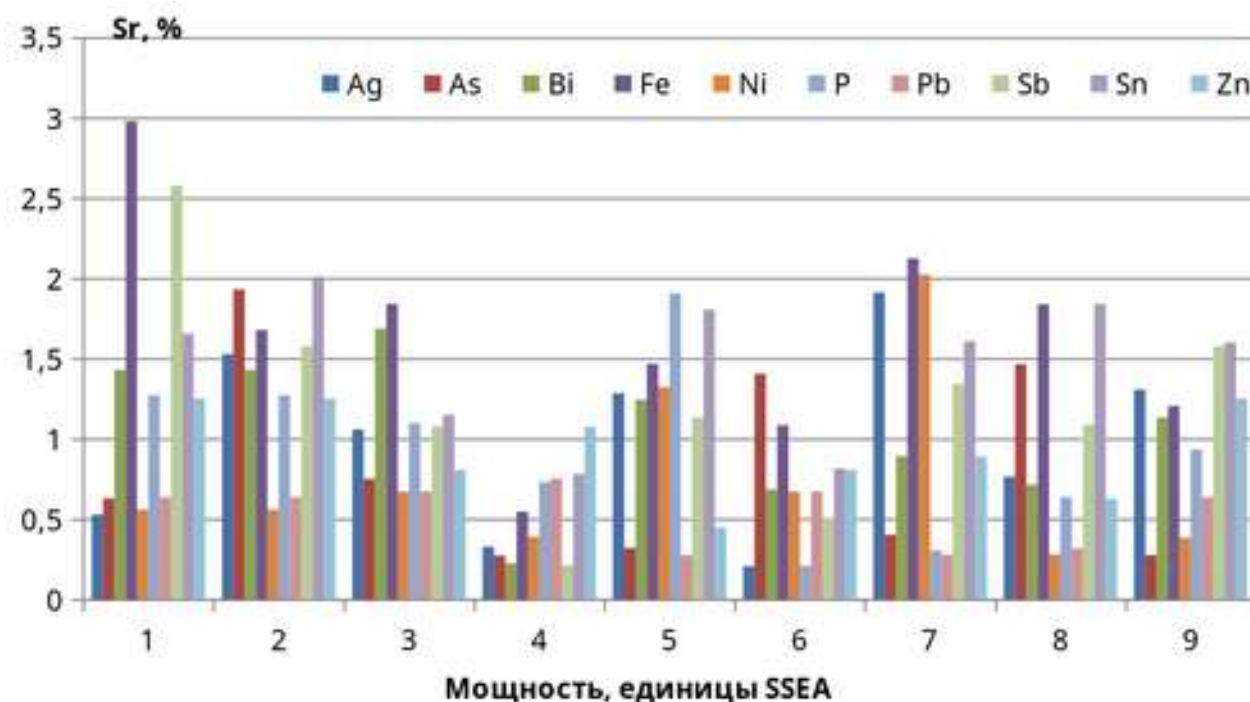


Рисунок 3. Влияние мощности искрового разряда на относительное стандартное отклонение ($n=3$) при анализе медных сплавов

Увеличение частоты искрового пробоотбора от 50 до 800 Гц приводит к разноплановому изменению абсолютных и относительных интенсивностей. Абсолютные интенсивности линейно возрастают, тогда как относительные уменьшаются в интервале (100-500) Гц и далее принимают постоянное значение. Несмотря на то, что высокая воспроизводимость аналитических сигналов ($s_r < 3\%$) наблюдается в широком интервале частот (400 – 800) Гц, наименьшие значения s_r ($\leq 1\%$) получены для частоты 500 Гц. Установлено, что повышение воспроизводимости $I_{отн.}$ ($s_r \leq 1,5\%$) может быть достигнуто при увеличении продолжительности предобжига и продувки линии подачи сухого аэрозоля. При проведении предобжига непосредственно перед проведением

измерений, удаляется поверхностный слой пробы, что исключает необходимость тщательной очистки и подготовки поверхности образца. Продолжительность предобжига подбирали экспериментально, при выполнении предобжига в течение 55 с наблюдается максимальное значение интенсивности для большинства элементов.

Таким образом, было рекомендовано проводить искровой пробоотбор конструкционной стали и медных сплавов при следующих условиях: частота разряда – 500 Гц, мощность – 2,55 кВт, продолжительность предобжига и продувки – 55 с и 10 с.

Полученные градуировочные зависимости по твёрдым стандартным образцам конструкционных легированных сталей и медных сплавов подтверждают линейность графиков в области нормируемых содержаний элементов ($r \geq 0,995$). Сопоставлены градуировочные зависимости для конструкционных легированных сталей, полученные по твердым и растворенным стандартным образцам после микроволновой пробоподготовки. Статистическая оценка параметров градуировочных зависимостей свидетельствует об их равноценности. В тоже время для анализа твёрдых образцов с применением градуировочной функции, полученной по растворённым стандартным образцам, необходимо учесть изменение наклона и смещения прямой, которое устанавливали по двум установочным стандартам. В качестве установочных стандартов использовали образцы стали марок 01ЮТ и 12Х2НВФА, содержащие легирующие элементы внутри диапазона градуировочных графиков. Измеряя относительную интенсивность сигнала элемента для растворов установочного стандарта ($I'_{\text{отн.}}$) и твердых установочных стандартов ($I_{\text{отн.р.}}$) и решая систему двух уравнений вида $I'_{\text{отн.}} = b \cdot I_{\text{отн.р.}} + a$, рассчитывали коэффициенты **b** и **a**, учитывающие изменение наклона и смещения градуировочных графиков.

Правильность разработанных методик подтверждена путем анализа стандартных образцов и сопоставлением с данными, полученными ГОСТированными методами. Определение элементов конструкционных сталей осуществляли после микроволнового разложения проб или после искрового пробоотбора монолитов. Несмотря на небольшое снижение прецизионности, при определении Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Mo, W методом АЭС ИСП с искровым пробоотбором в конструкционных сталях наблюдается снижение продолжительности анализа в 102 раза, в 36 раз уменьшается расход концентрированных кислот, снижаются трудозатраты и сокращается перечень применяемых реактивов. Кроме того, построение градуировочных графиков по растворам стандартных

образцов существенно расширяет возможности методики, увеличивает её экономичность за счёт исключения необходимости использования широкого спектра дорогостоящих твёрдых ГСО.

Методика АЭС ИСП с искровым пробоотбором апробирована при определении Cu, Cr, Mn, Ni, V, W, P и Si в конструкционных сталях: 08кп, 15ХМ, 20ХМ, 30ХМ, 30ХМА, 35ХМ, 38ХМ, 30ХЗМФ, 12ХН, 20ХН, 45ХН, 50ХН, 20ХНР, 12ХН2, 12ХН3А, 20ХН3А, 30ХН3А, 12Х2НВФМА, 19Х2НВФА, 21Х2НВФА, 23Х2НВФА, 40Х1МФА, 40ХН, 12Х2НВФА; определения Ag, As, Bi, Fe, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn, Cu в образцах медных сплавов М1, МСр0.1, ПШБ 70169, ПШБ 70170. Значения s_r свидетельствуют о высокой прецизионности результатов анализа, сравнимой с методами классической химии.

Список литературы

- [1] Якубенко Е.В. Совершенствование схем анализа материалов металлургического производства методом атомной эмиссионной спектроскопии: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 02.00.02/ Якубенко Елена Всеволодовна; Гиредмет.- Москва, 2016. - 22 с.
- [2] Якубенко Е.В., Войткова З.А., Ермолаева Т.Н. Изучение особенностей градуировки по растворам в многоэлементном анализе конструкционных сталей методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и электроразрядным пробоотбором // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т.80. №10. – С. 7 – 12.
- [3] Черникова И.И., Фурсова С.С., Ермолаева Т.Н. Анализ медных сплавов методом АЭС ИСП с искровым пробоотбором // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т.86. №3. – С. 11-19.

УДК 004.032.26:519.237

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ANFIS С УЧЕТОМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ВХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Журавлева М. Г.¹, Сараев П. В.¹, Домашнева Е. Л.¹

¹ *Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*

SIMULATION OF METALLURGICAL PRODUCTION PROCESSES BASED ON ANFIS USING CLUSTERIZATION OF INPUT VARIABLES

Marina Zhuravlyova¹, Pavel Saraev¹, Ekaterina Domashneva¹

¹ *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

Аннотация: Рассмотрен подход к построению моделей ANFIS технологических процессов металлургического производства, предполагающий кластеризацию значений входных переменных. Представлены теоретические аспекты построения ANFIS и кластеризации. Показаны результаты моделирования на примере анализа данных, полученных в ходе функционирования технологического процесса производства стали.

Ключевые слова: ANFIS, кластеризация входных переменных, моделирование процессов металлургического производства.

Abstract: An approach to construction of ANFIS models of metallurgical production processes is considered, which assumes the clustering of input variables values. Theoretical aspects of ANFIS construction and clustering are presented. Results of modeling are shown on an example of processing the data obtained during the functioning of technological process of steel making.

Key words: ANFIS, input variables clustering, steel making processes modeling.

Введение

Одним из эффективных методов моделирования технологических процессов металлургического производства является построение моделей ANFIS - адаптивных нейро-нечетких систем вывода (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), которые относятся к классу гибридных нейро-нечетких систем. Они используют базы лингвистических правил, определяющих зависимость между единственным выходом системы и входными лингвистическими переменными, каждая из которых может иметь несколько нечетких значений [1-2]. Для многоэтапного процесса металлургического производства точные модели, описывающие отдельные этапы или весь процесс в целом, не всегда существуют, поэтому применение современных моделей, основанных на анализе эмпирических данных, актуально. В качестве выходной характеристики модели может выступать выходное свойство – тот или иной показатель качества

произведенной единицы продукции, к входным переменным относятся характеристики полупродукта, параметры технологического процесса и т.п., измеренные значения которых накапливаются в массивах данных.

Построение модели ANFIS включает два этапа: выбор структуры системы и настройку параметров. Выбор структуры предполагает определение количества нечетких значений для каждой из входных лингвистических переменных и количества нечетких правил. Формализация данного этапа в общем случае затруднена, так как структура ANFIS зависит от структуры входных переменных и выхода, представленных в виде массивов реальных данных о функционировании технологического процесса. Автоматическое определение количества вариантов нечетких значений входных технологических переменных может осуществляться на основе кластерного анализа [3-4]. При этом количество нечетких значений входной переменной оценивается как число кластеров, сформировавшихся в процессе кластеризации данной входной переменной. Для обучающих выборок большого объема подходящим является метод k -средних с неизвестным числом кластеров, позволяющий уточнять количество кластеров в процессе анализа [4].

Модели и методы исследования

ANFIS могут рассматриваться как системы нечетких правил вида

P_k : если x_1 есть $A_{q_1^k}$ и x_2 есть $A_{q_2^k}$ и ... и x_n есть $A_{q_n^k}$, то

$$y_k = f_k(x_1, \dots, x_n) = c_{k1}x_1 + c_{k2}x_2 + \dots + c_{kn}x_n + d_k, \quad (1)$$

где (здесь и далее) k – номер правила, x_i – i -я входная переменная, $i = 1, 2, \dots, n$; $q_1^k \in \{1, 2, \dots, g_1\}$, $q_2^k \in \{1, 2, \dots, g_2\}$, ..., $q_n^k \in \{1, 2, \dots, g_n\}$, g_1, g_2, \dots, g_n – количества значений первой, второй и т.д., n -й входных переменных; y_k – выход k -го правила; c_{ki}, d_k – настраиваемые параметры. Переменные x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, соответствующие переменным технологического процесса, являются лингвистическими. Каждая из них может иметь несколько значений, с которыми ассоциированы нейроны первого слоя.

ANFIS имеют пятислойную структуру. Выходы нейронов первого слоя, $A_{q_i^k}$ из (1), $i = 1, 2, \dots, n$, являются степенями принадлежности входных значений соответствующим нечетким множествам. Могут использоваться гауссовские функции принадлежности:

$$A_{q_i^k}(x_i) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - a_{q_i^k}}{b_{q_i^k}} \right)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad q_i = 1, 2, \dots, g_i,$$

где $a_{q_i^k}$ и $b_{q_i^k}$ – настраиваемые параметры a_{q_i} и b_{q_i} соответственно, в k -м правиле; g_i – количество значений x_i и количество различных значений параметров a_{q_i} и b_{q_i} : для разных правил, например, k и l , q_i^k и q_i^l могут совпадать.

Нейроны второго слоя вычисляют уровень истинности α_k k -го правила. Если все входные переменные участвуют в формировании правил, и используются все возможные правила, уровень истинности можно вычислить по формуле:

$$\alpha_k = A_{q_1^k}(x_1)A_{q_2^k}(x_2)\dots A_{q_n^k}(x_n), k = 1, 2, \dots, m,$$

где $m = 1, 2, \dots, g_1 g_2 \dots g_n$ – максимальное количество правил.

Нейроны третьего слоя вычисляют нормализованные уровни истинности правил β_k :

$$\beta_k = \alpha_k / (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m).$$

Нейроны четвертого слоя вычисляют произведение нормализованных уровней истинности правил и соответствующих выходов правил:

$$\tilde{y}_k = \beta_k (c_{k1}x_1 + c_{k2}x_2 + \dots + c_{kn}x_n + d_k).$$

Нейроны пятого слоя производят суммирование выходов нейронов четвертого слоя. Таким образом, описанная модель ANFIS имеет вид:

$$y = \sum_{k=1}^m \frac{e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - a_{q_i^k}}{b_{q_i^k}} \right)^2} \left(d_k + \sum_{i=1}^n c_{ki} x_i \right)}{\sum_{j=1}^m e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - a_{q_i^j}}{b_{q_i^j}} \right)^2}}. \quad (2)$$

Предварительная кластеризация должна быть выполнена для каждой технологической переменной x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, в результате чего можно получить величины g_1, g_2, \dots, g_n , а также, при необходимости, оценки параметров a_{q_i} и b_{q_i} , $i = 1, 2, \dots, n$, $q_i = 1, 2, \dots, g_i$. Входными параметрами процедуры кластеризации по методу k -средних являются начальное число кластеров v_0 и две константы: мера грубости p_0 и порог включаемости в кластер f_0 . Вначале, в качестве центров кластеров, выделяется v_0 наблюдений кластеризуемой входной переменной. Процесс кластеризации предполагает многократное проведение этапов огрубления и включения в кластеры. На этапе огрубления выполняются объединения близких друг к другу кластеров с использованием значения меры грубости. Этап включения в кластер позволяет включить текущее наблюдение в уже существующий, наиболее подходящий, или новый кластер на основе значения порога включаемости. Результатом кластеризации являются окончательное количество кластеров v_j на последнем, j -м этапе, и совокупность кластеров,

характеризующихся центром, весом (т.е. количеством наблюдений, включенных в кластер), набором наблюдений, попавших в кластер, и расстояниями между наблюдениями из кластера и его центром. Количество кластеров ν_j рассматривается как искомое количество значений кластеризуемой входной переменной.

Пример моделирования на основе реальных данных и анализ результатов

Для проведения экспериментов использовался массив фактических данных объемом $n = 900$ наблюдений, полученных в ходе функционирования технологического процесса (ТП) производства изотропной электротехнической стали. С помощью ANFIS строилась модель зависимости между единственным откликом, выходной характеристикой – отношением предела текучести к пределу прочности – y , и двумя факторами: процентными содержаниями кремния, [Si], % – x_1 , и фосфора [P], % – x_2 , в стали после процесса выплавки. Для обучения были использованы 720 наблюдений исходной выборки, остальные 180 наблюдений вошли в тестовую выборку. Данные были нормированы. Фрагмент тестовой выборки представлен в табл. 1.

Таблица 1. Фрагмент тестовой выборки

№ п/п	x_1	x_2	y	№ п/п	x_1	x_2	y
1	0,013	0,909	0,797	11	0,996	0,029	0,301
2	0,363	0,029	0,073	12	0,996	0,029	0,297
3	0,363	0,029	0,138	13	0,297	0,029	0,049
4	0,363	0,029	0,159	14	0,297	0,029	0,000
5	0,363	0,029	0,106	15	0,297	0,029	0,049
6	0,052	0,943	0,829	16	0,055	0,897	0,789
7	0,022	0,931	0,785	17	0,071	0,909	0,837
8	0,022	0,931	0,817	18	0,352	0,023	0,159
9	0,016	0,926	0,833	19	0,352	0,023	0,130
10	0,016	0,926	0,833	20	0,352	0,023	0,130

В результате проведенных экспериментов построено несколько моделей ANFIS. На каждом этапе исследования вначале проводилась кластеризация входных переменных обучающей выборки, на основе которой определялись g_1 нечетких значений переменной [Si] и g_2 значений переменной [P], равные полученным для каждой переменной количеством кластеров. Затем осуществлялось обучение ANFIS с количеством g_1+g_2 нейронов первого слоя и $g_1 g_2$ (количество

всех возможных правил) нейронов второго слоя. Начальное количество кластеров выбрано равным квадратному корню из количества наблюдений.

Значения параметров p_0 и f_0 изменялись от этапа к этапу. Для их задания вычислялись и упорядочивались по возрастанию все возможные расстояния между парами наблюдений, принадлежащими кластеризуемой переменной. В качестве p_0 и f_0 использовались отдельные значения из упомянутой последовательности расстояний. Результаты кластеризации на нескольких этапах представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты кластеризации

№ этапа	Переменная, число кластеров	p_0	f_0	№ кластера	Вес	Центр
1	$x_1, 2$	0,30	0,30	1	543	0,154
				2	177	0,891
	$x_2, 3$	0,44	0,44	1	341	0,918
				2	335	0,033
2	$x_1, 3$	0,11	0,30	3	44	0,012
				1	218	0,325
				2	325	0,040
	$x_2, 3$	0,02	0,44	3	177	0,891
				1	341	0,918
				2	335	0,033
3	$x_1, 4$	0,02	0,30	3	44	0,012
				1	218	0,325
				2	188	0,057
				3	137	0,017
	$x_2, 3$	0,01	0,44	4	177	0,891
				1	341	0,918
				2	335	0,033
				3	44	0,012

В табл. 2 показаны характеристики кластеров, выделенных для каждой входной переменной. Название переменной и количество выделенных на данном этапе кластеров указаны во втором столбце табл. 2. Вес кластера (шестой столбец табл. 2) представляет собой количество наблюдений, попавших в кластер, а центр (последний столбец табл. 2) – среднее арифметическое наблюдений, попавших в кластер. Во втором и третьем столбцах табл. 2 указаны значений констант p_0 и f_0 : чем ближе они к нулю, тем меньше степень

агрегирования данных, и большее количество кластеров выделяется в процессе анализа.

В результате обучения для нескольких этапов исследования получены модели ANFIS, их характеристики качества – ошибки обучения и обобщения – представлены в табл. 3. В качестве начальных оценок параметров использовались центры кластеров. В табл. 3 использованы следующие обозначения: g_1, g_2 – количества значений x_1 и x_2 ; $\epsilon_o, \epsilon_{об}$ – ошибки обучения и обобщения моделей соответственно. Можно видеть, что наиболее точная модель получена на 3 этапе, ее можно выбрать как наиболее подходящую для рассматриваемых данных.

Таблица 3. Результаты построения моделей ANFIS

№ этапа	g_1	g_2	ϵ_o	$\epsilon_{об}$
1	2	3	0,016	0,016
2	3	3	0,039	0,032
3	4	3	0,007	0,014
4	7	10	0,016	0,014
5	11	14	0,030	0,038

Параметры модели, полученной на третьем этапе, представлены в табл. 4 ($d_k = 0$). В ней: $i = 1, 2$; $q_1 = 1, 2, 3, 4$; $q_2 = 1, 2, 3$; $k = 1, 2, \dots, 12$. Чтобы записать модель в явном виде, следует подставить параметры из табл. 4 в (2). Сопоставив результаты из табл. 2 и табл. 4, можно заметить, что центры полученных кластеров (для $g_1 = 4, g_2 = 3$) практически совпадают с оценками $a_{q,i}$, так как они использовались в качестве начальных оценок параметров $a_{q,i}$.

Таблица 4. Параметры модели, построенной на 3 этапе

g_1	g_2	$a_{q,1}$	$a_{q,2}$	$b_{q,1}$	$b_{q,2}$
4	3	$a_{11} = 0,32$ $a_{21} = 0,05$ $a_{31} = 0,01$ $a_{41} = 0,89$	$a_{12} = 0,93$ $a_{22} = 0,04$ $a_{32} = 0,02$	$b_{11} = 3,46$ $b_{21} = 2,80$ $b_{31} = 3,60$ $b_{41} = 3,08$	$b_{12} = 3,26$ $b_{22} = 3,75$ $b_{32} = 4,05$
c_{k1}		$c_{11} = 0,28$ $c_{21} = 0,74$ $c_{31} = 0,73$ $c_{41} = 0,52$ $c_{51} = -0,33$ $c_{61} = -0,33$ $c_{71} = -0,14$ $c_{81} = -0,13$ $c_{91} = -0,13$ $c_{101} = -0,14$ $c_{111} = -0,13$ $c_{121} = -0,13$			
c_{k2}		$c_{12} = 0,93$ $c_{22} = 0,61$ $c_{32} = 0,54$ $c_{42} = 0,05$ $c_{52} = 0,01$ $c_{62} = -0,01$ $c_{72} = 0,17$ $c_{82} = 0,13$ $c_{92} = 0,11$ $c_{102} = 0,11$ $c_{112} = 0,09$ $c_{122} = 0,07$			

Заключение

Описан подход, позволяющий строить современные гибридные модели ANFIS технологических процессов металлургического производства по эмпирическим данным. Для автоматического выбора структуры модели применялась кластеризация входных переменных на основе метода k-средних с неизвестным числом кластеров. Показано, что подход на основе кластеризации позволяет выбирать модель с наилучшими характеристиками.

Список литературы

- [1] Нечёткая логика: алгебраические основы и приложения / С.Л. Блюмин [и др.]. Липецк: ЛЭГИ, 2002. - 111 с.
- [2] Сараев П.В. Идентификация нейросетевых моделей. Липецк: ЛГТУ, 2011. - 94 с.
- [3] Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствие. М.: Финансы и статистика, 1988. - 342 с.
- [4] Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Основы эконометрики : учебник для вузов : в 2 т. Т.1 : Теория вероятностей и прикладная статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. - 656 с.

УДК 669.02/.09:004.422.422:159.91

**ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ
ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТНИКА
В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Вишневский Д. А.¹, Жильцов А. П.², Сотников А. Л.³, Бондарь Н. А.¹

¹ *Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина*

² *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

³ *Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина*

**IMPROVING THE RELIABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT BY
MONITORING THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF A
WORKER IN REAL TIME**

Dmitriy Vishnevskiy¹, Alexander Zhiltsov², Aleksey Sotnikov³, Nadezhda Bondar¹

¹ *Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine*

² *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

³ *Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine*

Аннотация: В статье изложен материал о повышении безотказности металлургического оборудования используя методы контроля психофизиологического состояния работника в режиме реального времени. Разработано носимое устройство, которое предназначено для снятия индивидуальных показаний психофизиологических реакций (пульса, кожно-гальванической реакции (КГР), температуры организма и внешней среды) сотрудника во время рабочего процесса и определения его месторасположения на территории производства в режиме реального времени.

Ключевые слова: безотказность металлургического оборудования, человеческий фактор, носимое устройство, человеческие ошибки.

Abstract: The paper provides records on increasing the reliability of metallurgical equipment using methods for monitoring the psychophysiological state of an employee in real time. A wearable device has been developed that is designed to take individual readings of psychophysiological reactions (pulse, skin-galvanic reaction (RAG), body temperature and the environment) of an employee while working and trace his location within the production area in real time.

Key words: reliability of metallurgical equipment, human factor, wearable device, human errors.

Введение. Теоретические основы повышения надёжности металлургических машин на стадии проектирования и эксплуатации базируются на достижениях науки о прочности, долговечности, эргономики и др.

Проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов металлургических машин, в результате которых предпринимались попытки определить оптимальную долговечность деталей металлургических машин на основании законов распределения параметров надёжности [1-3].

Существуют два основных подхода к получению информации о надёжности работающего оборудования. Первый подход – изучение закономерностей отказов оборудования, как реализовавшихся событий. Второй подход – изучение и прогнозирование текущего технического состояния системы.

В большинстве случаев, прогнозирование технического состояния и изучение закономерностей отказов оборудования базируется на отказах самих машин без учётов ошибок, совершаемых оператором-человеком, так называемые организационные факторы.

К таким факторам можно отнести: неправильную организацию производственных работ; неэффективность или отсутствие производственного контроля соблюдения правил техники безопасности; сравнительно низкая культура производства; умышленное отключение или вывод из строя средств защиты; низкий уровень знаний требований промышленной безопасности; нарушение технологической и трудовой дисциплины; неосторожные действия исполнителей работ; несовершенство нормативных и технических требований.

На предприятиях с полным металлургическим циклом, в технологических линиях которых находятся сложные агрегаты с действующим уровнем организации технологических процессов создаются предпосылки для возникновения инцидентов и аварий. Они приводят к значительным экономическим потерям и социальной напряжённости работающих. Доля происшествий и аварий происшедших по вине человека колеблется 20 – 55 % [4, 5].

Постановка задачи. Разработать носимое устройство для снятия психофизиологических показателей работника и систему мониторинга психофизиологического состояния работника в режиме реального времени.

Основной материал исследования. Для снижения влияния человеческого фактора на безотказность металлургического оборудования была разработана программа «Система мониторинга психофизиологического состояния

оператора металлургической отрасли программными средствами» и носимое устройство.

Программное обеспечение является структурной единицей разрабатываемого устройства по индивидуальному мониторингу психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли во время выполнения рабочего процесса. Данное программное обеспечение реализовано в среде IDE Clariion (Си). Программное средство получает по беспроводному каналу связи информацию от датчиков: показатели кожно-гальванической реакции, пульса, температура окружающей среды и тела, данные акселерометра и GPS позиционирование работника на карте предприятия для дальнейшей обработки. Каждому работнику присвоен уникальный номер для идентификации и закладываются индивидуальные характеристики уровня значений контролируемых параметров (норма, ниже нормы, выше нормы). Если полученные данные указывают на отклонение от нормальных значений, то оператор получает сигнал-оповещение и принимает решение для своевременной реакции на ситуацию, что снизит производственный риск. Программное обеспечение выполняет ряд функций: накопление показаний датчиков для каждого зарегистрированного работника, при отклонении показаний от нормы, а информация записывается в протокол в хронологическом порядке с указанием даты, времени и характера отклонения(ий). Накопленная информация после анализа может быть использована для организационных и административных решений, направленных на улучшение эффективности работы предприятия с подчиненными [6]. Например, учитывать сезонные особенности развития повреждений металлургического оборудования [7].

Программа создана для работы под управлением OS Windows. Интерфейсная часть построена на базе Graphical User Interface (GUI). Разработка визуальной композиции и временного поведения GUI является важной частью реализации в области взаимодействия оператора с компьютером для повышения эффективности и простоты использования базового логического дизайна разрабатываемой программы, так как все управляющие элементы программного интерфейса имеют "ожидаемое" поведение подобно любому другому программному средству, работающему в этой OS.

Программа построена по модульному принципу. Основной модуль содержит непрерывный ("вечный") цикл, в рамках которого реализуются все функциональные возможности программы. При этом совершаются несколько блоков анализа:

- обработка активных элементов интерфейса;
- обработка предопределенных горячих клавиш;
- обработка и анализ полей ввода.

Экранные формы, реализуемые в рамках программы, могут подвергаться динамической модификации в зависимости от информационных потребностей. Отдельные элементы интерфейса могут подвергаться изменению их функциональных возможностей, например, скрываться или деактивироваться/активироваться в зависимости от текущих условий или связанных с теми или иными действиями оператора. Такой подход существенно повышает устойчивость программного средства, уменьшает количество ошибок и способствует логике выполнения алгоритма.

В этом же цикле обрабатываются действия по горячим клавишам, как программы, так и операционной системы.

Обработка полей ввода повышает комфортность оператора, особенно при вводе значений с наложенными ограничениями диапазона.

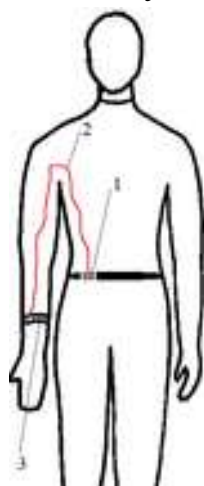
Каждый объект в рамках реализуемого программного пакета содержит набор функций и методов, основными из которых является инициализация с динамическим выделением памяти для его функционирования и отображения, а также метод удаления данного объекта с освобождением памяти после его закрытия. Наряду с этими объект содержит другие методы обеспечивающие его функциональное предназначение.

Объекты инкапсулируют методы по обработке событий, поток которых обрабатывается в рамках основного цикла путем их вызова.

Устройство (рис. 1) которое работает в паре с разработанным программным продуктом, состоит из двух основных частей и одного вспомогательного. Браслет, надеваемый на руку, содержит датчики измерения пульса, датчик измерения температуры сотрудника и окружающей среды, и датчик снятия показаний КГР. Вторая часть устройства представляет карбоновый корпус со вставками из органического стекла (акрила) под вывод световой индикации (питание, предупреждение, тревога) перфорированной сетки спикера для вывода звуковой информации (тревога, внимание), внутри корпуса находится собственно контроллер управляющий устройством, 3-х осевой акселерометр, GPS модуль, Bluetooth модуль, модули пульсометра и КГР соответственно и элемент питания.

Датчики, как расположенные в браслете (КГР, пульсометр), так и в корпусе устройства (акселерометр, GPS др.), периодически (каждые 5-10 секунд) отправляют пакет данных при помощи контроллера и беспроводного

модуля WI-FI через внутреннюю специализированную WI-FI сеть предприятия. Затем данные поступают на один из серверов предприятия, где анализируются, обрабатываются и сохраняются при помощи разработанной программы. После обработки, если полученная информация показывает опасные тренды, программа предлагает рациональные варианты для разрешения нештатной ситуации и вырабатывает стратегию по минимизации ущерба или полному нивелированию ЧП, а оператор уже принимает окончательное решение. Также в дальнейшем накопленная информация позволит при помощи методологии статистического анализа совершенствовать технологию трудового процесса. При возникновении нестандартных ситуаций и опасных тенденций, связанных с изменением психофизиологического состояния работника, устройство также сигнализирует работнику при помощи визуальной и звуковой индикации.



1 – корпус устройства; 2 – гибкий кабель; 3 – браслет с датчиками

Рисунок 1. Принципиальная схема расположения частей устройства непосредственно на сотруднике

Имя работника	Дата	Время	КГР	Пульс	t тела	t окруж.	X	Y
Ирина Эдуардовна	19/11/2019	14:56:02	22.03	141	37.86	7.00	7 404	5 050
Иванович	19/11/2019	14:55:52	22.00	140	37.79	7.00	7 404	5 050
Едодор Макарович	19/11/2019	14:55:32	22.00	142	37.79	7.00	7 404	5 050
Анислав Иванович	19/11/2019	14:55:02	22.08	140	37.87	7.00	7 404	5 050
Алгорь Дмитриевич	19/11/2019	14:54:32	22.80	133	37.74	7.00	7 404	5 050
Арина Васильевна	19/11/2019	14:54:02	22.80	130	37.62	7.00	7 404	5 050
	19/11/2019	14:53:32	24.30	124	37.66	7.00	7 404	5 050
	19/11/2019	14:53:02	26.30	122	37.64	7.00	7 404	5 050
	19/11/2019	14:52:32	27.08	118	37.41	7.00	7 404	5 050
	19/11/2019	14:52:02	29.40	115	37.37	7.00	7 404	5 050

Рисунок 2. Окно программы «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами» с фиксацией скачка частоты сердечных сокращений испытуемого № 2

Обсуждение полученных результатов. Данная система прошла испытания на ЗАО «Внешторгсервис филиал №12» под авторским контролем. Данные полученные при испытаниях проходят статическую обработку. Система адекватно реагирует на психофизиологические изменения организма работника, и выдает сообщения на экране монитора оператора при достижении верхнего или нижнего порога показателей (рис. 2).

Выводы. Таким образом, контроль за психофизиологическим состоянием работника в реальном времени позволит снизить влияние человеческого фактора на надежность металлургического оборудования путем быстрого реагирования на изменение показателей носимого устройства, что позволит оператору принять решение согласно разработанных инструкций.

Список литературы

- [1] Тимошенко, С. П. Основы теории надежности [Текст] : учебник и практикум для академического бакалавриата / С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко. — Москва : Издательство Юрайт, 2015. — 445 с.
- [2] Чуклин, Д. Стратегии и системы обеспечения эксплуатационной надежности оборудования металлургических заводов [Текст] / Д. Чуклин, С. Охлупин, А. Шаров, А. Рыбакин, М. Дейкин // Регламент. — Екатеринбург : Издательство ТехНадзор, 2015. — С. 148–150.
- [3] Терентьев, Д. В. Пути повышения ресурса узлов трения машин и агрегатов металлургического производства [Текст] / Д. В. Терентьев, С. И. Платов, Н. Н. Огарков, Ю. В. Жиркин, Л. Ф. Керимова // Тезисы докладов 76- ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». — Магнитогорск, 2018. — С. 159–160.
- [4] Сулейманов, М. Г. Оценка надежности персонала при профессиональном отборе кадров в металлургии [Текст] / М. Г. Сулейманов, Л. Ш. Абдуллина // Весник МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. — №3. — С. 73–78.
- [5] Vishnevskiy, D. A. Improving the reliability of metallurgical equipment through the introduction of Realtime Location Systems technologies and Internet of Things [Text] / D. A. Vishnevskiy, B. A. Sakharov // Journal of Advanced Research in Tecbical Science. — North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. — Issue 12. — P. 74–77.
- [6] Вишневецкий, Д. А. Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами / Д. А. Вишневецкий, А. П. Жильцов, В. А. Козачишен, Б. А. Сахаров // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616921 Российская Федерация. Заявка №2019615644 дата поступления 20 мая 2019 г. Дата регистрации 30 мая 2019 г.
- [7] Сидоров, В. А. Сезонные особенности развития повреждений металлургического оборудования / В. А. Сидоров, А. Л. Сотников, В. М. Кравченко, В. В. Буцукин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2010. – №3. – С. 14-19.
- [8]

УДК 621.77.01, 621.777.4

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛИ ТИПА ВТУЛКА МЕТОДОМ СОВМЕЩЕНИЯ РЕДУЦИРОВАНИЯ-ДОРНОВАНИЯ

Полякова А. В.¹

¹*Московский технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

IMPROVING THE MECHANICAL PROPERTIES OF A BUSHING TYPE PART BY COMBINING REDUCTION-MANDREL

Anastasia Polyakova¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

Аннотация: В статье рассмотрен метод совмещения редуцирования и дорнования в едином процессе формоизменения трубной заготовки. Показаны преимущества совмещенного редуцирования-дорнования. Даны рекомендации по повышению размерной точности и качества поверхности детали типа втулка.

Ключевые слова: всестороннее сжатие, упрочнение по всему объему, совмещенный процесс редуцирования-дорнования, тонкостенная втулка

Abstract: The article discusses the method of combining reduction and mandrel in a single process of forming a pipe billet. The advantages of the combined reduction-mandrel are shown. Recommendations are given to improve the dimensional accuracy and surface quality of a bushing-type part.

Key words: all-round compression, hardening throughout the entire volume, combined process of reduction-mandrel

В большинстве случаев втулки являются ответственными деталями, в задачу которых входит обеспечение надежности и работоспособности узлов и механизмов авиационной, автомобильной и других видов техники. К таким втулкам предъявляют повышенные требования по качеству поверхности, размерной точности и твердости.

В условиях многообразия методов изготовления деталей типа втулка немаловажным фактором является возможность существенного снижения себестоимости производства и увеличения коэффициента использования материала (КИМ).

Распространенные методы изготовления детали типа втулка предполагают применение штамповки выдавливанием, волочения, прессования и обработки металлов резанием. Эти методы имеют ряд недостатков, среди которых следует отметить наличие высокой температуры при обработке резанием, повышенный

отход металла и отсутствие однородности структуры всей детали типа втулка при прессовании.

В работах [1, 2, 3] предложена технология изготовления детали типа втулка путем одновременной обработки наружной и внутренней поверхности детали. В совмещенном процессе редуцирования-дорнования обработка наружной поверхности заготовки проводится редуцирующей матрицей с одновременным формоизменением внутренней цилиндрической поверхности заготовки дорном (рис. 1).

Таким образом установив трубную заготовку в промышленный штамп для редуцирования- дорнования можно изготовить деталь типа втулка за минимальное число переходов с заданными механическими свойствами из сталей и цветных металлов – алюминиевых и медных сплавах.

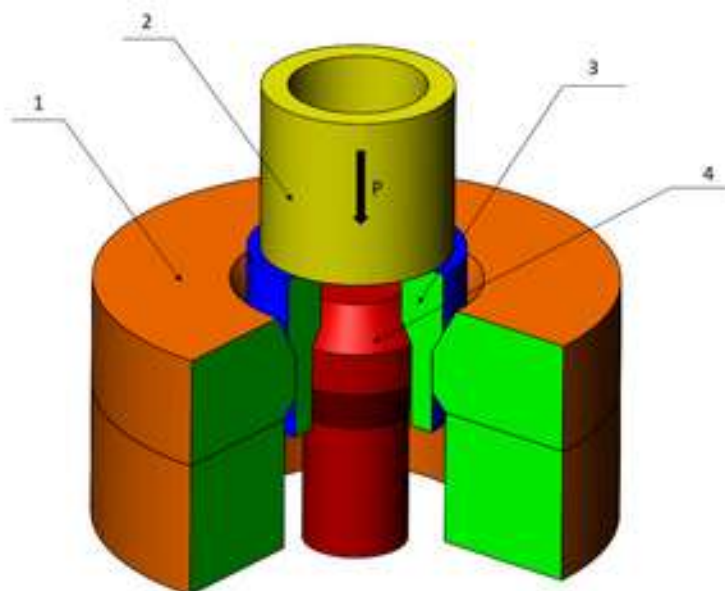


Рисунок 1. Схема процесса совмещенного редуцирования-дорнования.

1- редуцирующая матрица, 2-пуансон, 3 – заготовка, 4 - дорн.

Использование совмещенного редуцирования- дорнования позволяет еще на этапе проектирования решить задачу максимального повышения механических свойств материала втулки за один переход [4]. Детали, полученные совмещенным редуцированием-дорнованием отличаются высоким качеством поверхности, упрочненной структурой по всему объему и высокой износостойкостью.

За основу расчета была принята задача изготовления гладкой втулки кронштейна подвески грузового автомобиля из бронзы БР05Ц55С5 40-1 (ГОСТ 24301-93) рис. 1.

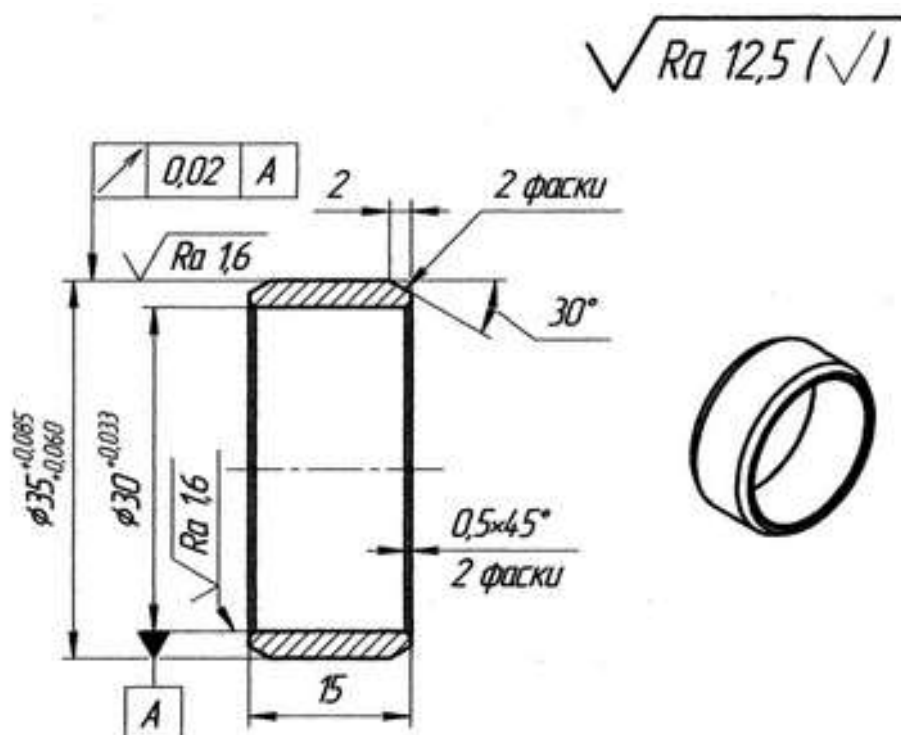


Рисунок 2. Втулка кронштейна подвески грузового автомобиля

Далее была использована разработанная автором методика проектировочного расчёта с целью максимального повышения механических свойств материала втулки за один переход [5]. Исходными данными к проведению расчёта является:

- материал заготовки;
- размеры получаемой втулки (внутренний и наружный радиус, высота);

Последовательность проектировочного расчёта предполагает составление рекомендаций по выбору высоты калибрующих поясков матрицы и дорна, подбору смазочного материала и определению коэффициентов трения по контактным поверхностям, выбору оптимальных углов конусности матрицы и дорна. После чего проводится расчет максимально возможного обжатия Δ_{np} .

Определяется толщина стенки по формуле

$$w = R - r \quad (1)$$

, где R - наружный радиус втулки после деформации, r - радиус отверстия втулки после деформации.

С учётом формулы накопленной деформации

$$e_i = 1,155 \ln \left(1 + \frac{2 \Delta_{\text{пр}}}{w} \right) \quad (2)$$

и аппроксимации кривой упрочнения материала заготовки для разных углов инструмента α решается методом последовательных приближений уравнение

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{w}{2} \left\{ \exp \left[\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \mu} \left(\frac{2}{1 + \sigma_{sk} / \sigma_{s0}} - \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} - \frac{\mu h}{w} \right) \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

где α - угол конусности рабочего участка матрицы, μ - коэффициент трения по напряжению текучести на матрице, σ_{sk} - конечное напряжение текучести, σ_{s0} - начальное напряжение текучести, h - высота калибрующих поясков матрицы и дорна.

в результате чего строится график зависимости максимального обжатия $\Delta_{\text{пр}}$ от угла α .

7) График показывает максимальное обжатие $\Delta_{\text{пр}}$, которое можно достичь за один переход без потери жёсткости заготовки. Этот график также позволяет выбрать наилучший угол инструмента α , обеспечивающий наибольшее максимальное обжатие $\Delta_{\text{пр}}$.

8) В соответствии с поставленной задачей выбирается $\Delta = \Delta_{\text{пр}}$, после чего по формулам

$$R_0 = R + \Delta \quad (4)$$

$$r_0 = r - \Delta, \quad (5)$$

где R_0 - наружный радиус исходной трубной заготовки, r_0 - радиус отверстия исходной трубной заготовки, Δ - радиальное обжатие (перепад радиусов заготовки и втулки).

находятся радиальные размеры исходной заготовки.

9) После этого по формуле

$$H_0 = H \frac{R^2 - r^2}{R_0^2 - r_0^2}, \quad (6)$$

где H_0 - высота исходной трубной заготовки, H - высота готовой втулки.

находится высота заготовки H_0 , которая, в данном случае, равна необходимой величине рабочего хода пресса s .

10) По формуле

$$e_i = 1,155 \ln \frac{R_0 - r_0}{R - r}, \quad (7)$$

находится накопленная деформация.

11) Для данной деформации по кривой упрочнения материала заготовки или её аппроксимации находится величина конечного напряжения текучести $\sigma_{ск}$, которое получится в результате деформации редуцированием–дорнованием. По той же кривой упрочнения или её аппроксимации определяется и величина начального напряжения текучести (предела текучести) σ_{s0} .

12) По формуле

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{ск}}{2}, \quad (8)$$

находится среднее напряжение текучести.

13) Для выбора материалов пуансона, матрицы и дорна, обеспечивающих их достаточную прочность, определяется удельная деформирующая сила

$$q = 1,155 \sigma_s \left[\left(1 + \frac{\mu}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R_0 - r_0}{R - r} + \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} + \frac{\mu h}{R - r} \right], \quad (9)$$

где σ_s - напряжение текучести.

14) Для выбора пресса определяется деформирующая сила

$$P = \pi (R_0^2 - r_0^2) q \quad (10)$$

15) Для высоких заготовок (в большинстве случаев с $H_0 > 10R_0$) дополнительно проверяется выполнение условия устойчивости. Для этого вычисляется критическая сила

$$P_{кр} = \frac{\pi^3 E (R_0^4 - r_0^4)}{H_0^2}, \quad (11)$$

где E - модуль упругости деформируемого материала.

после чего проверяется выполнение неравенства

$$P < P_{кр} \quad (12)$$

В случае изготовления тонкостенной втулки из бронзы БР05Ц55С5 40-1 величина деформирующей силы равна $P=123$ кН. При величине критической силы $P_{кр}=320$ кН выполняется условие (12) и нет необходимости в разделении процесса, совмещенного редуцирования- дорнования на два и более перехода.

По результатам формоизменения трубной заготовки путем совмещения редуцирования и дорнования в один процесс получена втулка кронштейна подвески грузового автомобиля за один переход. Готовая втулка имеет 7 квалитет и шероховатость $Ra=0,32$ мкм, а также конечное напряжение текучести материала детали порядка 233 МПа.

Для достижения высокой размерной точности на деталях, полученных совмещенным редуцированием-дорнованием рекомендуется принимать величину обжатия порядка 0,2-0,4 мм, смазывать заготовку композицией ЦИАТИМ-208 в смеси с дисульфидом молибдена, предусмотреть равенство углов конусности матрицы и дорна.

Выводы

- 1 В результате проведенного проектировочного расчета процесса изготовления тонкостенной втулки из бронзы Бр05Ц5С5 было выявлено, что процесс совмещенного редуцирования-дорнования может быть реализован за один переход.
- 2 Совмещение редуцирования и дорнования в один процесс позволяет существенно снизить время обработки;
- 3 Повышение качества готовой детали типа втулка, полученной совмещенным редуцированием-дорнованием зависит от величины обжатия заготовки;
- 4 Для повышения износостойкости детали типа втулка рекомендуется провести одновременное редуцирование и дорнование заготовки с упрочнением по всему объему;
- 5 Для существенного повышения всех механических свойств детали типа втулка рекомендуется использовать в качестве заготовки сплошной прутки за исключением концевых участков прутков;

Список литературы

- [1] Бодарева А. В. Совершенствование процесса изготовления деталей типа втулка методом совмещения процессов дорнования и редуцирования // Научные труды конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии». Липецк: Липецкий ГТУ. 2012. С. 38-42.
- [2] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования-дорнования. Определение кинематического состояния заготовки // Производство проката. 2014. № 4. С. 38-43.
- [3] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования-дорнования. Определение деформационно-силовых параметров и условий успешной реализации процесса // Производство проката. 2014. № 6. С. 34-47.
- [4] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования-дорнования. Сопоставление теоретических результатов с новыми экспериментальными данными // Производство проката. 2014. № 7. С. 34-47.
- [5] Бодарева А.В. Повышение Эффективности изготовления высокопрочных прецизионных втулок методом совмещения редуцирования и дорнования: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.09 / Бодарева Анастасия Вячеславовна. – М., 2015 – 17 с.

УДК 621.77.01, 621.777.4

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОТЕРИ ЖЕСТКОСТИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВТУЛКИ ШЕСТЕРНИ ГЛАВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Полякова А. В.¹, Поляков А. О.¹

¹*Московский технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

METHODS FOR PREVENTING THE LOSS OF RIGIDITY OF THE PIPE BILLET DURING THE MANUFACTURE OF THE HUB OF THE MAIN GEAR OF A TRUCK

Anastasia Polyakova¹, Artem Polyakov¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

Аннотация: В статье рассмотрены возможные пути предотвращения потери жесткости трубной заготовки при совмещенном процессе редуцирования-дорнования. Даны рекомендации к расчету геометрических параметров заготовки и их корреляции с размерами готовой втулки. Сформулированы критерии потери жесткости трубной заготовки из стали.

Ключевые слова: совмещенный процесс, редуцирование, дорнование, потеря жесткости, потеря устойчивости, трубная заготовка, втулка шестерни, главная передача

Abstract: The article discusses possible ways to prevent the loss of stiffness of the pipe billet during the combined process of reduction-mandrel. Recommendations are given for calculating the geometric parameters of the workpiece and their correlation with the dimensions of the finished sleeve. Criteria for the loss of stiffness of a steel pipe billet are formulated.

Keywords: combined process, reduction, mandrel, stiffness loss, pipe billet, gear sleeve, final drive

Детали типа втулка отличаются своим многообразием, наиболее часто можно встретить гладкие прямые втулки, ступенчатые втулки с наружным или внутренним коническим переходом (рис. 1). К таким втулкам нередко предъявляются требования по высокой прочности, твердости, точности размеров и формы, чистоты поверхности. На производстве перед конструктором часто возникает вопрос о максимально возможной длине такой втулки и тех случаях, когда в процессе формоизменения заготовка может потерять жесткость или устойчивость под воздействием внешней силы.

Изготовление таких втулок предполагает использование трубной заготовки с однородными свойствами по всему объему с последующим совмещенным редуцированием и дорнованием в едином процессе, схема процесса подробно изложена в работах [1, 2]. Она предполагает обработку редуцированием

наружной поверхности цилиндрической заготовки с помощью гладкой матрицы или матрицы с микрорельефом, необходимым для удержания в зоне контакта смазочного материала, и обработку внутренней цилиндрической поверхности заготовки дорном с размером, большим диаметра заготовки. Таким образом в совмещенном процессе редуцирования- дорнования заготовка претерпевает всестороннее сжатие в очаге пластической деформации.

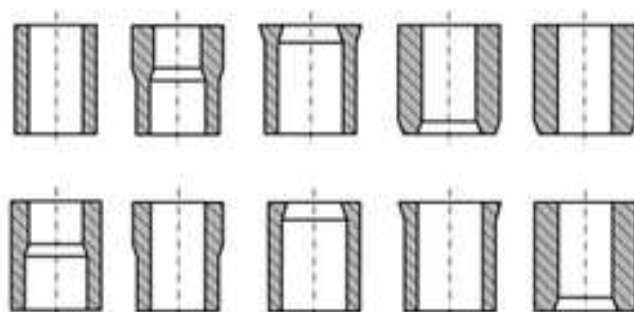


Рисунок 1. Виды втулок, получаемых совмещенным редуцированием- дорнованием

Для проведения серии экспериментов был разработан специальный штамп (рис. 2) для совмещенного редуцирования- дорнования. Принцип работы штампа описан в работе [3]. Наборы сменных матриц и дорнов различных диаметров были изготовлены из инструментальной штамповой стали 8Х4В2С2МФ.

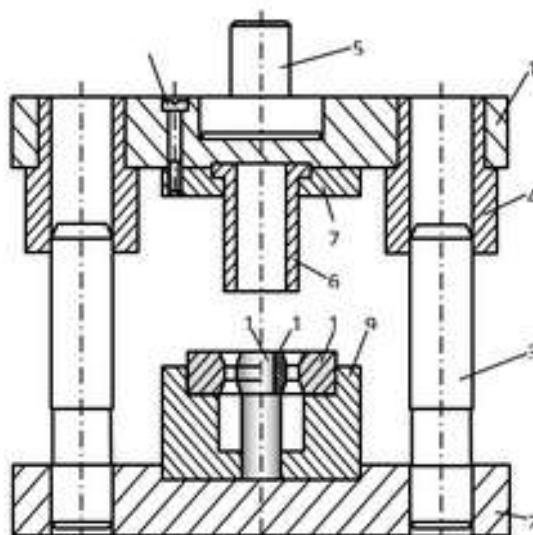


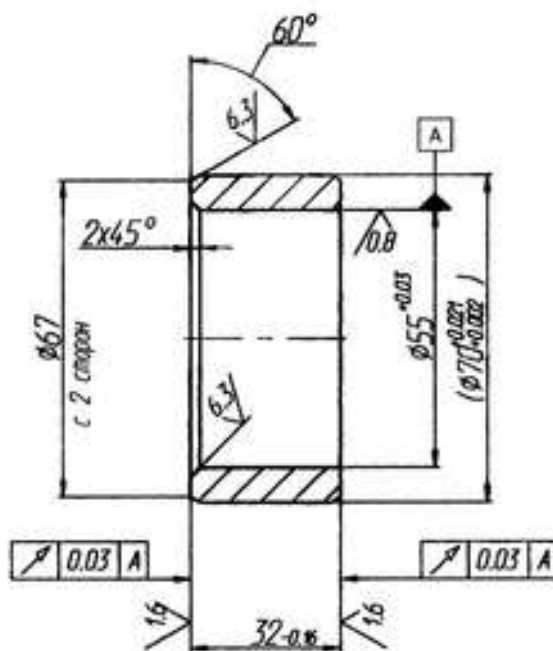
Рисунок 2. Экспериментальный штамп для совмещённого процесса редуцирования-дорнования:

- 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – колонка; 4 – направляющая втулка; 5 – хвостовик; 6 – трубчатый пуансон; 7 – пуансонодержатель; 8 – прижимной винт; 9 – центрирующая обойма; 10 – матрица; 11 – дорн; 12 – стойка

Проведение серии экспериментов было необходимо для оценки потери жесткости и устойчивости трубной заготовки для изготовления втулки шестерни главной передачи грузового автомобиля. Втулка шестерни изготавливается из стали 45 ГОСТ 1050-88 с обязательной последующей термической обработкой с целью достижения твердости порядка 255...300 НВ. Габаритные размеры такой втулки составляют 32 мм (рис. 3).

Рассмотрим случай редуцирования- дорнования предварительно отрезанной в размер трубной заготовки в экспериментальном штампе. В серии экспериментов, подробно описанных в работе [4] в качестве смазочного материала применялась смазка ЦИАТИМ-208 в смеси со смазочной композицией на основе меди, редуцирующая матрица с $R=35,5$ мм, что соответствует наружному диаметру готовой втулки.

Для процесса дорнования- редуцирования втулки шестерни главной передачи рекомендуется использовать дорн наружным радиусом $r=27,5$ мм с углом конусности рабочего участка $\gamma=6^\circ$. Высота калибрующих поясков матрицы и дорна должна быть равной $h=3$ мм.



1. 255 ... 302 НВ.
2. Неуказанные предельные отклонения по ГОСТ 37 001.246-82
3. Размер в скобках - после сборки.

Рисунок 3. Чертеж втулки шестерни главной передачи грузового автомобиля

Определяем требуемые радиусы при $\Delta = 0,2$ мм

$$R_0 = R + \Delta = 35,7 \text{ мм} \quad (1)$$

$$r_0 = r - \Delta = 27,3 \text{ мм}, \quad (2)$$

где R_0 - наружный радиус исходной трубной заготовки, r_0 - радиус отверстия исходной трубной заготовки, Δ - радиальное обжатие (перепад радиусов заготовки и втулки).

Высота исходной заготовки

$$H_0 = H \frac{R^2 - r^2}{R_0^2 - r_0^2} = 30,5 \text{ мм}, \quad (3)$$

где H_0 - высота исходной трубной заготовки, H - высота готовой втулки.

Для успешного протекания процесса совмещенного редуцирования-дорнования следует избегать потери жесткости как основополагающего фактора, ведущего к появлению пластических деформаций в области исходной заготовки. Считается, что пластические деформации в области заготовки возникают в случае если осевые напряжения в ней достигнут предела текучести σ_{s0} , однако при данном виде нагружения имеет место не идеальное сжатие без трения по торцам, а подобное высадке сжатие, где радиальное течение на верхнем торце заготовки затруднено контактным трением, а на нижнем торце – зажатием в сужающемся коническом канале.

Первый путь предотвращения потери жесткости предполагает увеличение предельной силы деформирования согласно выражению (4).

Величина удельной деформирующей силы q_{np} для стали 45

$$q_{np} = 1,155 \cdot \sigma_{s0} = 416 \text{ МПа}, \quad (4)$$

где σ_{s0} - начальное напряжение текучести, 1,155 – коэффициент Лоде.

Это позволит учесть основные физико-механические характеристики материала, предусмотреть снижение требуемой силы деформирования и провести процесс совмещенного редуцирования дорнования без потери жесткости трубной заготовки.

Второй путь предотвращения потери жесткости трубной заготовки при совмещенном редуцировании-дорновании предполагает изготовление втулки шестерни главной передачи грузового автомобиля с учетом выполнения условия

$$q < q_{np} \quad (5)$$

Выполнение этого условия гарантирует проведение совмещенного редуцирования-дорнования с удельной нагрузкой, не превышающей предельной. Для Втулки шестерни, изготовленной из стали 45 требуемая удельная сила деформирования в совмещенном процессе редуцирования-дорнования должна иметь значение, отличающееся от предельного на 10-15%.

Тогда согласно расчетам для втулки шестерни, изготовленной из стали 45 получим

$$q = 1,155 \sigma_s \left[\left(1 + \frac{\mu}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R_0 - r_0}{R - r} + \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} + \frac{\mu h}{R - r} \right] = 376 \text{ МПа} \quad (6)$$

где σ_s - напряжение текучести, α - угол конусности рабочего участка матрицы, μ - коэффициент трения по напряжению текучести на матрице, h - высота калибрующих поясков матрицы и дорна.

К основным критериям потери жесткости трубной заготовки относится расчет удельной деформирующей силы без учета коэффициента Лоде и несоблюдение условия не превышения требуемой удельной силой деформирования ее предельного значения согласно условию (5).

Выводы

1. Все представленные в работе формулы являются наиболее общими из известных, они применимы для любых толщин заготовок и получаемых втулок;
2. Сформулировано важнейшее условие успешной реализации процесса совмещенного редуцирования–дорнования, которое позволит достичь максимальной эффективности и предотвратить порчу заготовки, а также поломку инструмента или оборудования - условие предотвращения потери устойчивости заготовки;
3. Учет коэффициента Лоде необходим при расчете удельной силы деформирования;
4. Для предотвращения потери жесткости трубной заготовки необходимо выполнение условия не превышения требуемой удельной силой деформирования ее предельного значения.

Список литературы

- [1] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования–дорнования. Постановка задачи // Производство проката. 2014. № 3. С. 41-44.
- [2] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования–дорнования. Определение кинематического состояния заготовки // Производство проката. 2014. № 4. С. 38-43.
- [3] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования–дорнования. Определение деформационно-силовых параметров и условий успешной реализации процесса // Производство проката. 2014. № 6. С. 34-47.
- [4] Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещенного процесса редуцирования–дорнования. Сопоставление теоретических результатов с новыми экспериментальными данными // Производство проката. 2014. № 7. С. 34-47.

УДК 621.983

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА КОЛЬЦО МЕТОДОМ СЖАТИЯ

Поляков А. О.¹, Лавриненко В. Ю.¹

¹*Московский технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

ALTERNATIVE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF RINGS BY COMPRESSION METHOD

Artem Polyakov¹, Vladislav Lavrinenko¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

Аннотация: В статье приведены основные сведения об инновационной ресурсосберегающей технологии изготовления деталей типа методом сжатия, применение которой обеспечивает существенную экономию металла. В статье приведены результаты компьютерного моделирования процесса штамповки кольца методом сжатия в программном комплексе PAM-STAMP и сравнение с данными экспериментальной штамповки. В результате установлен диапазон применимости метода сжатия для изготовления деталей типа «кольцо».

Ключевые слова: листовая штамповка, гибка на ребро, кольцо, программный комплекс PAM-STAMP

Abstract: Analysis of the applicability of the method of compression of ring blanks for obtaining of details of the "ring" type, which provides substantial savings in metal are presented in article. The results of computer simulation of the ring stamping process using the compression method in the PAM-STAMP and comparison with the experimental stamping are shown. As a result, the range of applicability of the compression method for manufacturing details of the "ring" type is established.

Key words: sheet stamping, rib bending, ring, PAM-STAMP

Известные методы изготовления деталей типа «кольцо» обработкой давлением (вырубка и пробивка), штамповкой трубной заготовки и обработкой резанием характеризуют высоким расходом металла, низким КИМ и высокими энергосиловыми затратами. В работах [1, 2] предложен новая технология получения колец из листовой заготовки, сущность которого состоит в том, что пуансон сжимает предварительно вырубленную овальную заготовку с овальным отверстием в матрице закрытой крышкой. Применение данной технологии обеспечивает повышение коэффициента использования материала (КИМ) и экономию металла до 1,5-2 раз по сравнению с традиционными методами получения кольцевых деталей.

Для анализа применимости метода сжатия для изготовления кольцевых деталей был определен интервал размеров некоторых используемых колец из стали 08 пс(ГОСТ 1050-2013): наружный диаметр $D = 16...230$ мм, толщина $S = 1 \dots 10$ мм, ширина кольца $B = 4 \dots 30$ мм, толщина 1 мм.

Далее была разработана методика и проведено компьютерное моделирование процесса получения деталей типа «кольцо» в программном комплексе RAM-STAMP [3].

Расчет геометрических размеров исходной заготовки проводили с учетом изменения длины средней линии исходной заготовки в процессе деформации, при этом на прямолинейном участке заготовки происходит гибка, а на радиусном – разгибка[4].

Размер A для различных типоразмеров изготавливаемых колец, рисунок 1, определяли по формуле:

$$A = k \cdot \pi (R - r) \quad (1)$$

где k – коэффициент, учитывающий смещение нейтрального слоя заготовки; зависит от степени деформации $\frac{R}{B_0}$.

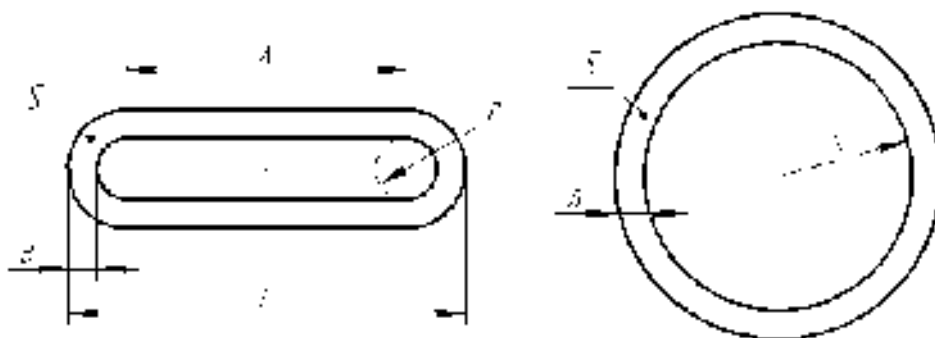


Рисунок 1. Исходная заготовка и деталь

На рисунке 2 приведены результаты моделирования формоизменения исходной овальной заготовки при ее сжатии в штампе.

В результате анализа полученных данных был установлен диапазон применимости – область рационального использования метода сжатия для исследуемого интервала геометрических параметров деталей типа «кольцо», рисунок 3. Заштрихованная область показывает целесообразность применения метода получения деталей типа «кольцо» сжатием. Детали, выходящие из указанной области, предпочтительнее изготавливать другим способом (вырубкой и пробивкой, штамповкой трубной заготовки, токарной обработки из листа и т.д.).

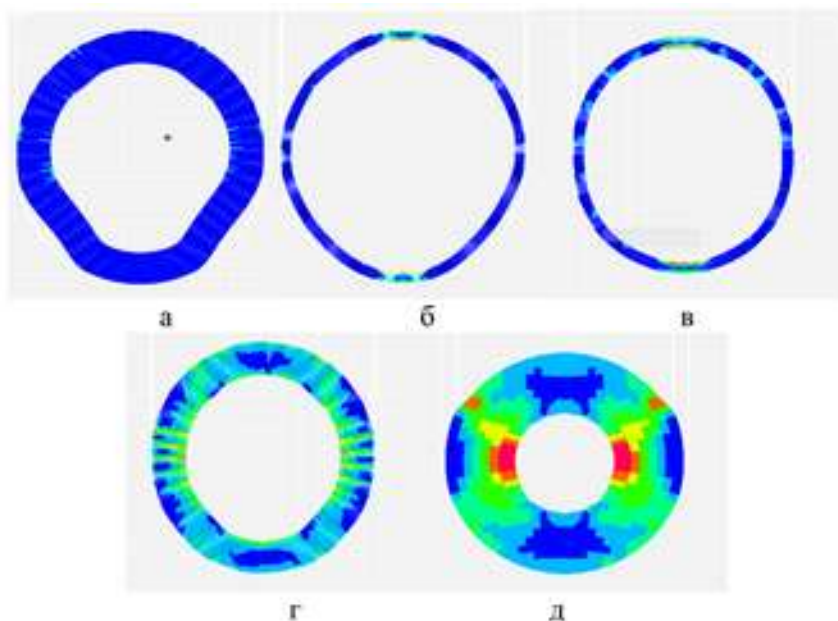


Рисунок 2. Результаты моделирования процесса изготовления кольца методом сжатия:
 а – получаемая деталь $D = 230$ мм, $B = 30$ мм, б – получаемая деталь $D = 230$ мм, $B = 10$ мм,
 в – получаемая деталь $D = 124$ мм, $B = 6$ мм, г – получаемая деталь $D = 124$ мм,
 $B = 18$ мм, д – получаемая деталь $D = 16$ мм, $B = 4$ мм

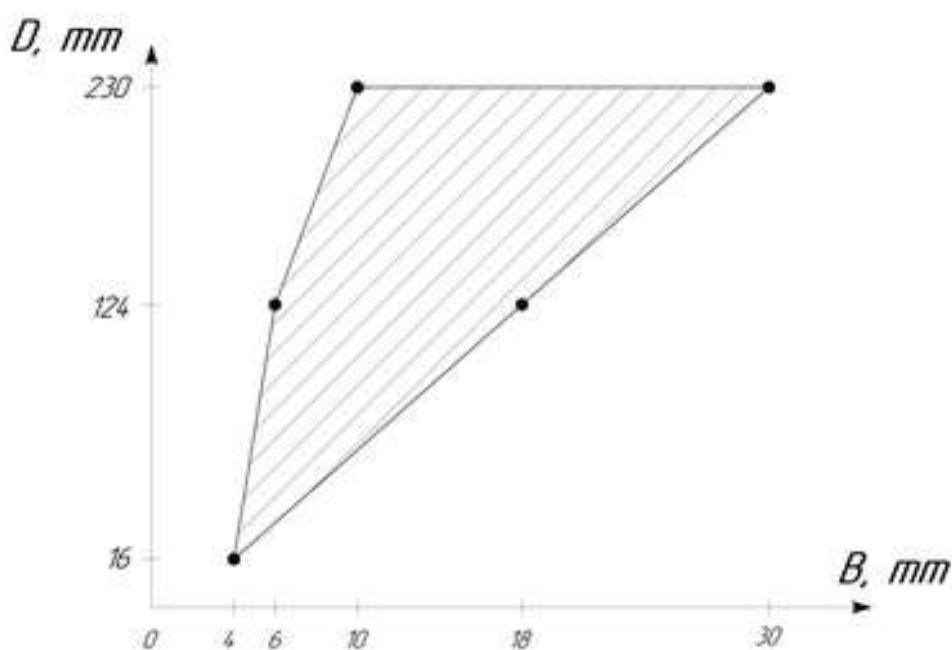


Рисунок 3. Диапазон применимости метода сжатия для исследуемого интервала геометрических параметров деталей типа «кольцо»

Далее была проведена проверка полученных данных компьютерного моделирования путем сжатия овальной заготовки в экспериментальном штампе для получения кольцевой детали с размерами: $D = 82$ мм, $B = 16$ мм, толщина S

= 3 мм, материал – сталь 08 пс, в качестве оборудования использовали гидравлический пресс УИМ-100 номинальной силой 1 МН [5, 6].

На рисунке 4 показаны размеры исходной овальной заготовки и получаемой кольцевой детали. При этом длина исходной заготовки L составила 118 мм.

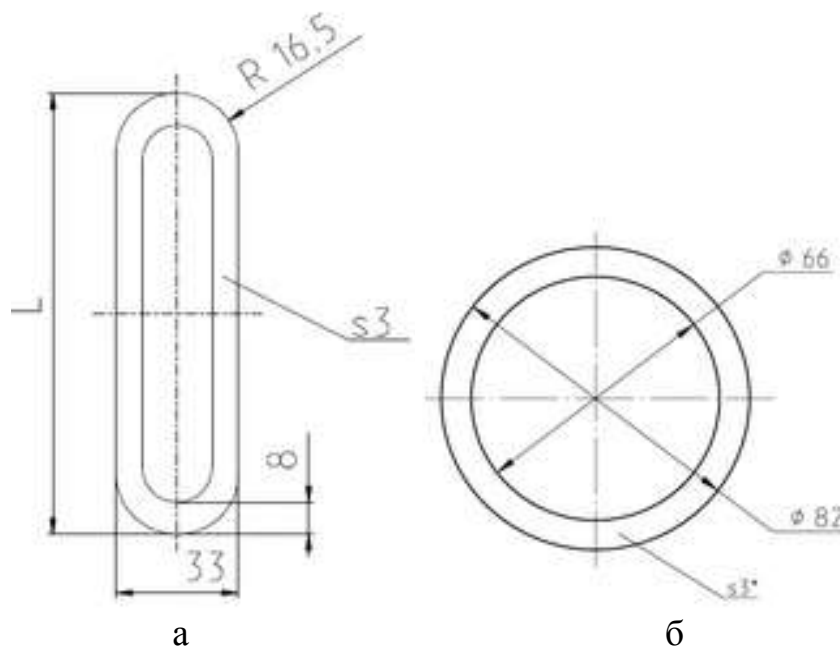


Рисунок 4. Размеры исходной овальной заготовки (а) и получаемой кольцевой детали (б)
 $L = 118$ мм

В результате было изготовлена кольцевая деталь с наружным диаметром 82 мм с отклонением от округлости $\beta=0,97\%$.

На рисунке 5 показаны этапы деформирования исходной овальной заготовки в зависимости от хода ползуна пресса.

Выводы

1. В результате проведенного компьютерного моделирования процесса изготовления деталей типа «кольцо» методом сжатия исходной овальной заготовки в программном комплексе PAM-STAMP был установлен диапазон применимости – область рационального использования метода сжатия для исследуемого интервала геометрических параметров деталей типа «кольцо».

Данная область показывает целесообразность применения метода получения деталей типа «кольцо» сжатием. Детали, выходящие из указанной

области, предпочтительнее изготавливать другим способом (вырубкой и пробивкой, штамповкой трубной заготовки, токарной обработки из листа и т.д.).

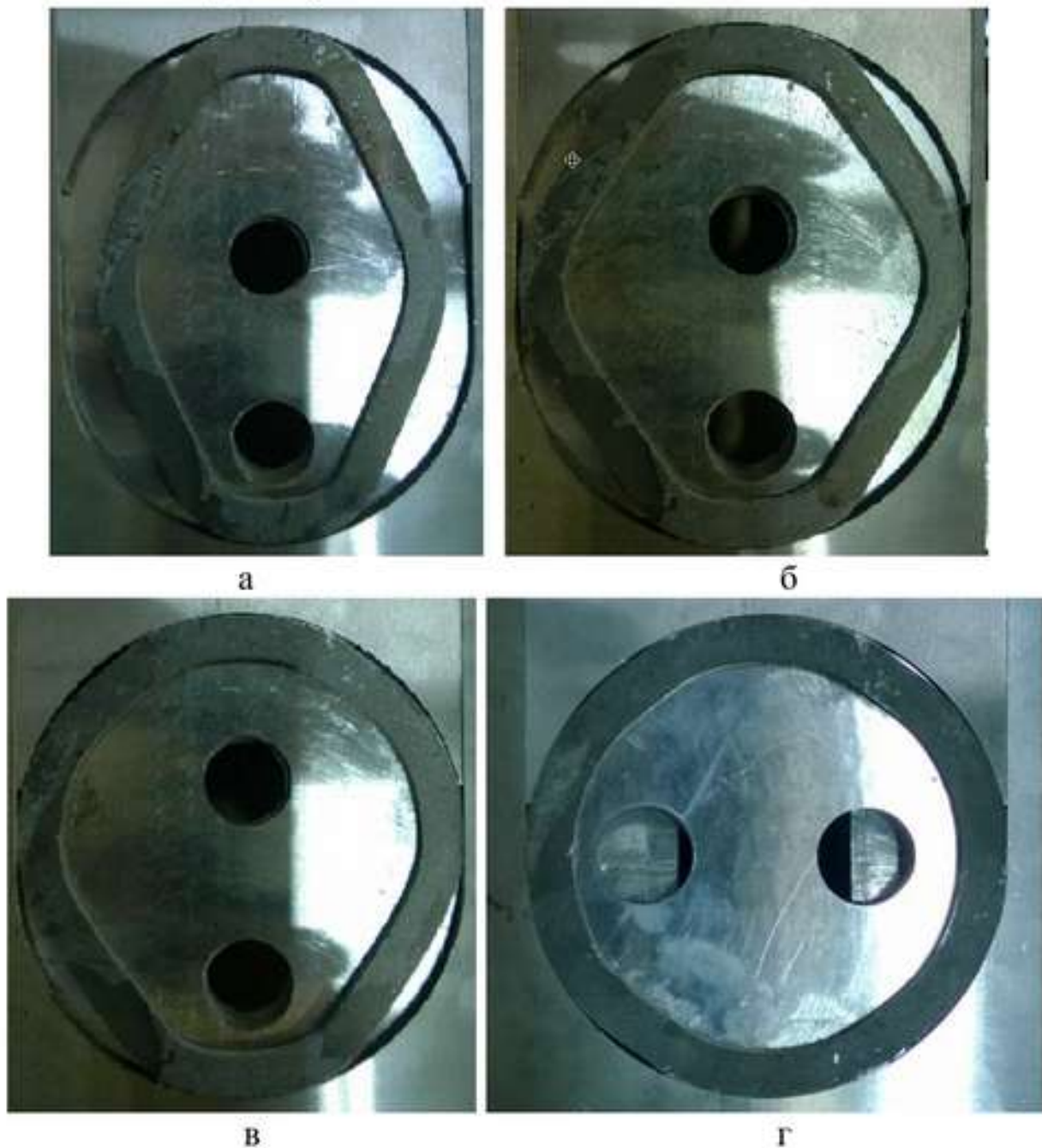


Рисунок 5. Этапы деформирования исходной овальной заготовки в зависимости от хода ползуна прессы: а – 16 мм; б – 24 мм; в – 30 мм; г – 36 мм, окончательное кольцо

2. Проведенная экспериментальная проверка возможности изготовления кольцевой детали ($D = 82$ мм и $B = 16$ мм) методом сжатия из полученного диапазона применимости позволила получить кольцо с требуемым наружным

диаметром 82 мм и с отклонением от округлости $\beta=0,97\%$, что имеет высокую сходимость с результатами компьютерного моделирования.

3. Полученный диапазон применимости целесообразно использовать при разработке методики проектирования технологических процессов листовой штамповки кольцевых заготовок сжатием.

Список литературы

- [1] Патент на полезную модель РФ № 144991. Устройство для изготовления плоских олец / Семенов Е.И., Лавриненко В.Ю., Айрапетян А.С., Демин М.В., Ястребов Е.И. опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.
- [2] Семенов Е.И., Айрапетян А.С., Демин М.В. Штамповка колец методом одновременного сжатия двух или более заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. №6-1. С. 296-303.
- [3] Лавриненко В.Ю. Программный комплекс РАМ-STAMP для конечно-элементного моделирования и анализа формоизменяющих процессов листовой штамповки // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. №6. С.15-19.
- [4] Ростовцев Д.В., Демин В.А., Семенов Е.И. Расчет размеров заготовки для получения кольца способом растяжения // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №8. С.17-19.
- [5] Vladislav Lavrinenko, Anastasiya Polyakova and Artyom Polyakov. Analysis of the applicability of die pressing method for ring-shaped parts fabrication. MATEC Web Conf., 224 (2018) 02074.
- [6] V.Yu. Lavrinenko, A.O. Polyakov, T.A. Mirvelyan. Development of the stamp design for ring-shaped parts manufacturing by compression method // Materials Today: Proceedings. Volume 19, Part 5, 2019, Pages 2106-2108. doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.219.

УДК 621.771

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Кожевников А. В.¹, Смирнов А. С.¹, Кожевникова И. А.¹

¹*Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Россия*

IMPROVEMENT OF THIN-SHEET ROLLING PROCESSES UNDER CONDITIONS OF NONSTATIONARY DYNAMIC LOADING

Aleksandr Kozhevnikov¹, Anatoliy Smirnov¹, Irina Kozhevnikova¹

¹*Cherepovets State University, Cherepovets, Russia*

Аннотация: Представлено теоретическое обоснование изучения процесса прокатки в нестационарных динамических условиях. Разработаны технические решения и рекомендации по повышению эффективности технологии при ее проектировании и эксплуатации прокатного оборудования.

Ключевые слова: Прокатка тонких листов, нестационарность, вибрации

Abstract: The theoretical rationale for studying the rolling process in non-stationary dynamic conditions is presented. Technical solutions and recommendations have been developed to improve the efficiency of the technology during its design and operation of rolling equipment

Key words: thin sheet rolling, non-stationary, chatter.

Введение (актуальность работы)

Современное прокатное производство развивается в двух основных направлениях:

- повышение производительности прокатных агрегатов, за счет увеличения скоростей прокатки с минимальными издержками производства; включая энергетический аспект;
- эффективное проектирование технологии производства новых марок стали в соответствии с требованиями потребителей.

При реализации вышеуказанной стратегии возникает ряд существенных проблем, наиболее существенные из них следующие:

1. Технологический процесс прокатки нестабилен и выражается в колебаниях основных технологических параметров: скоростей прокатки, натяжений полосы, толщины прокатываемых листов и полос, усилия и моментов прокатки, токи главных приводов. В связи с этим, не смотря на развитие информационных технологий и компьютерной техники при освоении прокатки на высоких скоростях на уровне 20-30 м/с усложняется вопрос автоматического управления

и поддержания технологических параметров в рамках, обеспечивающих требуемые характеристики качества и свойств прокатной продукции.

Управлять листовыми прокатными станами, включая моделирование, анализ и обработку информации, приходится осуществлять в условиях нестационарности и динамики технологических параметров, а также стохастичности режимов нагружения, в том числе в очаге деформации.

2. Колебания энергосиловых параметров приводят к возникновению потерь электроэнергии, не учтенных при проектировании технологических режимов, их рост чреват увеличением себестоимости единицы продукции.

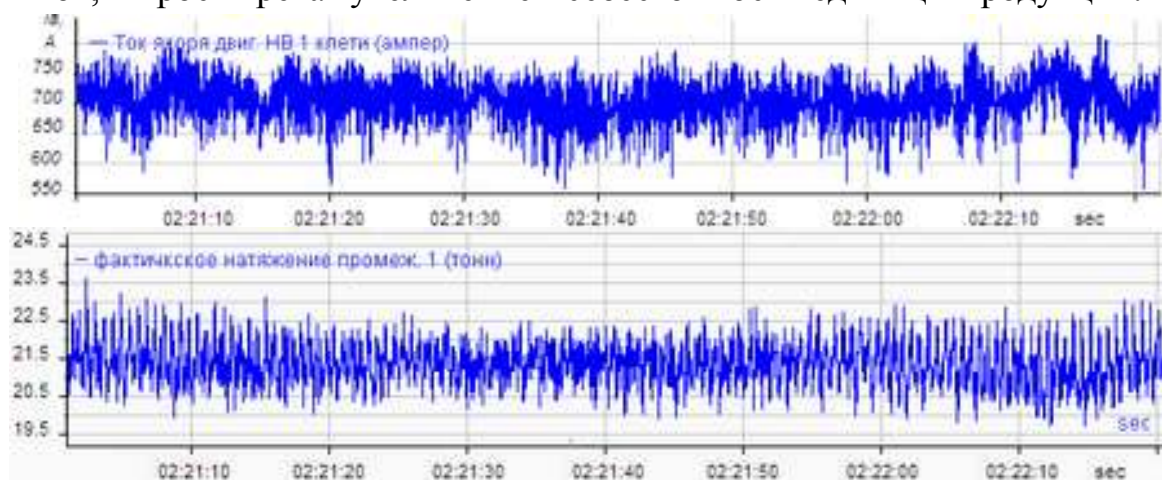


Рисунок 1. Диаграммы значений токов якоря двигателя главного привода и натяжения полосы при прокатке углеродистой стали на 5-клетевом стане холодной прокатки «1700»

При исследованиях влияния нестационарного характера динамических нагрузок на контактные напряжения и энергосиловые параметры в очаге деформации необходимо оценивать динамику возникающих затрат энергии. Оценка энергоэффективности процессов обработки металлов давлением в рассматриваемых условиях необходима для проектирования технологии обработки современных марок сталей и оптимизации существующих технологических решений [1].

3. В алгоритмах АСУ ТП прокатных станов для настройки скоростного режима, определения параметров технологии и очага деформации используются формулы, полученные в середине XX века на основе детерминистского подхода, не учитывающего нестационарность и динамичность процесса обработки, стохастичность исходных параметров подката.

Большинство существующих методов теоретических исследований и расчета геометрических параметров очага деформации и энергосиловых пара-

метров процесса прокатки, выполненных отечественными [2, 3] и зарубежными специалистами [4, 5], являются детерминистскими, основаны на статических моделях, не учитывающих нестационарный и динамический характер процессов обработки металлов давлением, стохастичность ряда характеристик прокатываемой полосы в реальных производственных условиях.

Детерминистский подход до настоящего времени является фундаментом для создания математических моделей процессов прокатки. Подобного рода математические модели позволяют определять статичные значения параметров на основе фиксированных значений исходных данных. Что приводит в новых условиях к существенным ошибкам при выполнении технологических и конструкторских расчетов непрерывных широкополосных станов, и, как следствие, к неоправданным потерям энергии, повышенным эксплуатационным расходам, снижению качества проката.

3. За последние 20-25 лет на многих отечественных и зарубежных непрерывных прокатных станах при освоении проектных скоростей с целью повышения производительности стали возникать негативные динамические явления – резонансные вибрации или автоколебания, известные из англоязычной литературы, как явление «*chatter*». Эти явления вызывают дефекты на поверхности полос и не позволяют осваивать проектные значения скорости прокатки, приводят к обрывам полосы, негативно влияют на надежность оборудования.

В работах, относящихся к области решения указанной проблемы, не рассматриваются причины возникновения данных негативных явлений, в них предлагаются мероприятия по устранению последствий динамических явлений в рамках решения классической задачи демпфирования возникающих колебаний, не рассматривая технологические причины возникновения вибрационных процессов, как основные [6, 7].

4. Моделирование динамических процессов, возникающих при непрерывной прокатке, является весьма сложной задачей, поэтому в технической литературе освещаются только ее отдельные аспекты.

Существует проблема в междисциплинарном подходе к совместному описанию и моделированию взаимодействия очага деформации, где формируются основные процессы нагружения стана и электромеханической системы, обеспечивающей требуемый крутящий момент рабочих валков с учетом инерционности всей системы и сложного нестационарного характера нагрузки.

Вследствие многофакторности процесса, сложной взаимозависимости электромеханических систем клеток непрерывного стана холодной прокатки,

дальнейшее комплексное развитие технологии тонколистовой прокатки невозможно без разработки модели процесса холодной прокатки, учитывающей его динамичность и нестационарность.

Результаты исследований

Специалистами Череповецкого государственного университета проведена серия научно-исследовательских работ, направленных на моделирование и изучение процесса прокатки в динамике, а также минимизации и устранения негативных эффектов, возникающих вследствие неустойчивости процесса и стохастичности нагружения.

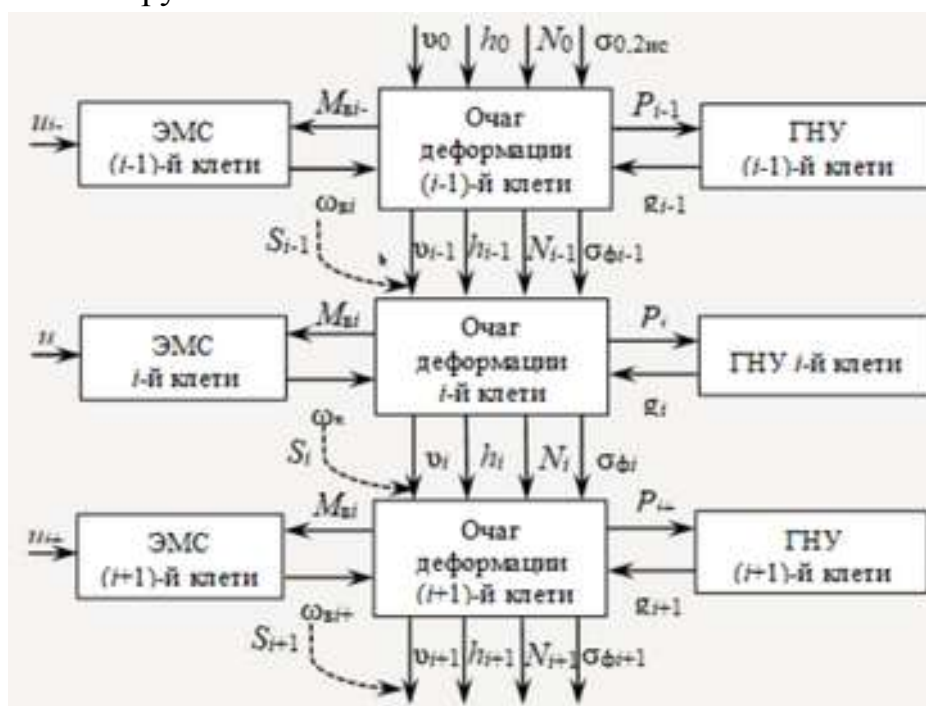


Рисунок 2. Структурная схема математической модели процесса холодной прокатки, учитывающая взаимосвязь электромеханических систем клеток, модель очага деформации и ГНУ.

$(i-1), i, (i+1)$ – номер рассматриваемой клетки; u_{i-1}, u_i, u_{i+1} – напряжение на якорной обмотке двигателя клетки; $\omega_{vi-1}, \omega_{vi}, \omega_{vi+1}$ – угловая скорость вращения рабочего валка клетки; $M_{vi-1}, M_{vi}, M_{vi+1}$ – момент, необходимый для обеспечения процесса прокатки в клетке; v_0 – скорость подката; h_0 – толщина подката; v_{i-1}, v_i, v_{i+1} – скорости полосы на выходе из соответствующих клеток; h_{i-1}, h_i, h_{i+1} – толщины полосы на выходе из соответствующих клеток; $N_0, N_{i-1}, N_i, N_{i+1}$ – силы натяжения полосы; P_{i-1}, P_i, P_{i+1} – силы прокатки в клетках; g_{i-1}, g_i, g_{i+1} – зазоры между рабочими валками; $\sigma_{0,2исx}$ – исходный предел текучести материала полосы; $\sigma_{\phi i-1}, \sigma_{\phi i}, \sigma_{\phi i+1}$ – сопротивление деформации полосы в клетке; S_{i-1}, S_i, S_{i+1} – коэффициенты опережения.

На рис. 2 схематично представлена разработанная комплексная физико-математическая динамическая модель напряженно-деформированного

состояния тонких стальных полос, учитывающая стохастичность их характеристик, нестабильность параметров процесса прокатки и динамический характер его протекания, представляющая собой взаимодействие электромеханической системы клетки с очагом деформации, позволяющая оценивать изменения конструктивных и энергосиловых параметров очага деформации и процесса прокатки в реальном режиме времени с учетом нестационарности технологии [8]. Данная модель позволяет исследовать не только технологические параметры процесса прокатки, но и процессы, происходящие в очаге деформации.

Использование указанной модели в прикладных исследованиях позволило выявить условие возникновения вибраций на станах холодной прокатки. Так при прокатке с натяжением нарушение условия (1), приводит к негативным вибрационным эффектам (см. рис. 3)

$$\Delta V_{i-10i} = v_i h_i b - v_{i-1} h_{i-1} b < 0 \quad (1)$$

где $v_i h_i b$ – скорость, толщина ширина полосы в i -м промежутке; ΔV_{i-10i} – секундный объем металла в межклетевом промежутке ($i-1 \dots i$) [9, 10].

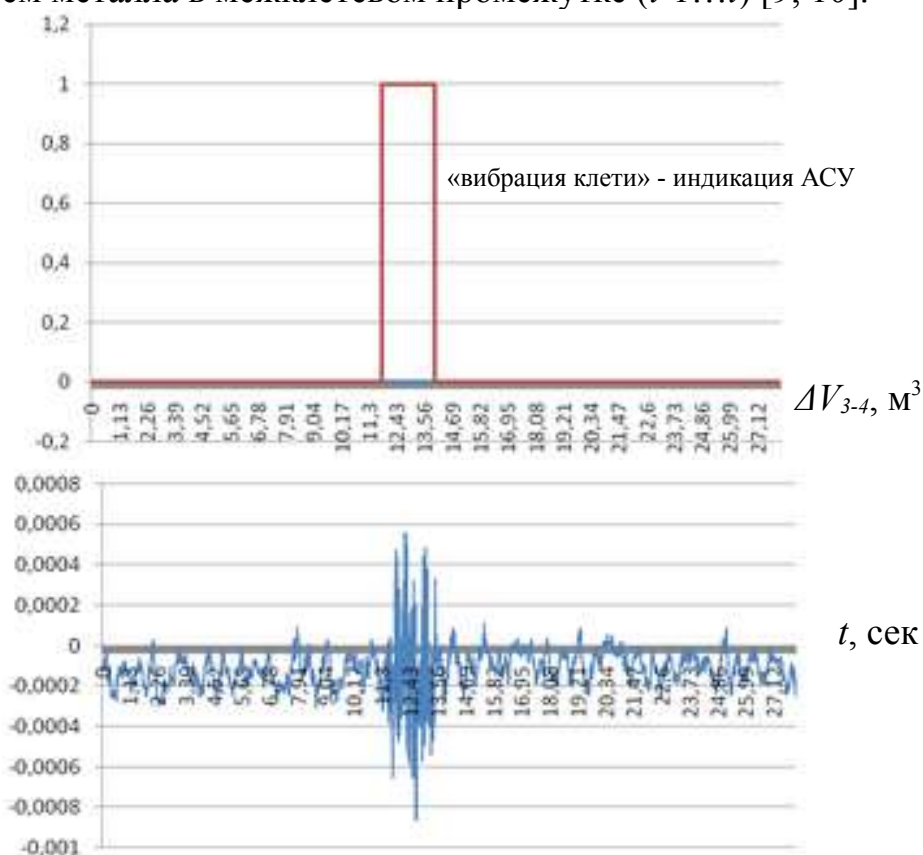


Рисунок 3. Возникновение вибраций в рабочей клетке непрерывного стана холодной прокатки (нижняя диаграмма – индикация по изменению разности межклетевых секундных объемов)

Заключение. Проведенные поисковые исследования показали, что снизить общий уровень нестабильности или колебательного характера технологических параметров можно несколькими способами:

- путем снижения разнолощинности полосы или изменения механической системы главных приводов (снижение зазоров, повышение жесткости и т.п.);

- с помощью корректировок алгоритмов систем управления, например в существующей теории электропривода справедливо равенство крутящего момента и момента нагружения $M_{кр} = M_{нагр}$, а поскольку нагрузка стохастична, то и крутящий момент нестационарно задается системой АСУ в электромеханическую систему стана, связанную с рабочими валками и очагом деформации;

- используя методы электромагнитного демпфирования, например снижение колебаний скорости путем подачи другого сигнала в противофазе [11].

Список литературы

- [1] Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Метод расчета потерь электроэнергии от вынужденных колебаний тока якоря двигателя при работе приводов листовых прокатных станов // Производство проката.- №6. – 2014. С. 19-23.
- [2] Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
- [3] Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки [Текст] – М.: Металлургия. – 1995. – 368 с.
- [4] Roberts W.L. Cold rolling of steel[Текст] – New York: Marcell Dekker Inc. – 1978.
- [5] Liu Y., Lee W.H. Mathematical model for the thin strip cold rolling and temper rolling process with the influence function method [Текст]// ISIJ International. –2005. – No45(8), – P. 1173–1178.
- [6] Liu Xiaochan, Zang Yong, Gao Zhiying, Zeng Lingqiang Multidirectional regenerative chatter model of tandem rolling mills and its application // Journal of Central South University (Science and Technology) Mar. 2017Vol. 48 No.3. p.p. 635-643. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2017.03.011
- [7] Mohammad Reza Niroomand, Mohammad Reza Forouzan, Ali Heidari Experimental analysis of vibration and sound in order to investigate chatter phenomenon in cold strip rolling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2019) 100:673–682, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2639-9>
- [8] A.V. Kozhevnikov, I.A. Kozhevnikova, N.L. Bolobanova Simulation of Cold-Rolling Process in Dynamic Conditions // Metallurgist, Vol. 61, Nos. 7–8, November, 2017. pp. 519-522. DOI 10.1007/s11015-017-0526-5
- [9] A. Kozhevnikov, I. Kozhevnikova, N. Bolobanova, A. Smirnov Chatter prevention in stands of continuous cold rolling mill // Metalurgija (Metallurgy) 59 (2020) 1, p.p. 55-58.
- [10] Кожевникова И.А., Кожевников А.В., Болобанова Н.Л. Исследование и раскрытие механизма возникновения вибраций в клетях непрерывного стана холодной прокатки // Проблемы черной металлургии и материаловедения. - №3. - 2017. - С. 39-42.
- [11] I.A. Kozhevnikova, A.V. Kozhevnikov, G.A. Sorokin, and N.A. Markushevskii Damping of vibrations in the primary drives of cold-rolling mills // Steel in Translation, 2016, Vol. 46, No. 10, pp. 739–741.

УДК 643.32:669

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНГИБИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ В ОБОРОТНОЙ ВОДЕ

Должанова А. А.^{1,2}, Козлов С. В.¹, Фарафонова О. В.¹

¹*Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

²*ООО НПО «Экотехнологии», Липецк, Россия*

STUDY OF THE POSSIBILITY OF KINETIC INHIBITION OF THE FORMATION OF CALCIUM CARBONATE IN REWARDED WATER

Dolzhanova Alina A.^{1,2}, Kozlov Sergey V.¹, Farafonova Olga V.¹

¹*Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

²*ООО NPO Ecotechnologies, Lipetsk, Russia*

Аннотация: В работе представлены исследования различных ингибиторов коррозии на Ст3. Установлено, что метод комплексометрического титрования не позволяет определять кальций в жидкой фазе после добавления реагентов ингибирования. Максимальным значением в модельных системах характеризуются реагенты ECOTECH® ING1010, ECOTECH® ING1020 (85%). Проведена апробация на реальном промышленном объекте.

Ключевые слова: коррозия, ингибитор, атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, электропроводность.

Abstract: The paper presents studies of various corrosion inhibitors at St3. It was found that the complexometric titration method does not allow the determination of calcium in the liquid phase after the addition of inhibition reagents. The maximum value in model systems is characterized by reagents ECOTECH® ING1010, ECOTECH® ING1020 (85%). Approbation was carried out at a real industrial facility.

Key words: corrosion, inhibitor, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, electrical conductivity.

Введение

Организация на промышленных предприятиях систем оборотного и замкнутого водоснабжения является необходимой частью современного производственного процесса, как из экономических, так и экологических соображений. Эксплуатация оборотных систем предприятий показывает, что эффективность работы снижается, во-первых, из-за коррозии, которая приводит к преждевременному выходу оборудования из строя, во-вторых, из-за биообращений и солеотложений, приводящих к значительному перерасходу энергетических и водных ресурсов. В России по причине коррозии теряется до 30% выпус-

каемого металла. Решение проблемы предотвращения этих нежелательных явлений достигается в использовании ингибиторов. Реагентная обработка воды для предотвращения солеотложений, биообрастаний и коррозии является наиболее эффективной и доступной, поскольку не требует значительных капитальных вложений, а узлы приготовления и дозирования реагентов достаточно просты и надежны в эксплуатации [1, 2].

В настоящее время занимаются активным поиском веществ, которые наиболее эффективны в качестве ингибиторов карбонатной жёсткости: доступны, экономичны, экологичны, устойчивы к агрессивной среде и не образуют собственных отложений [3].

Образование солей кальция обусловлено осаждением трудно растворимых веществ, в первую очередь, определяющих общую и карбонатную жесткость, в результате изменения щелочности и роста температуры воды. Всё это приводит к необходимости поиска прогрессивных методов защиты оборудования от накипи со стороны охлаждающей воды, что подразумевает использование эффективных ингибиторов солеотложения. Таким образом, целью данного исследования является кинетическая оценка эффективности ингибиторов солеотложения и выявления наиболее оптимального ингибитора для технической воды с высоким содержанием солей жесткости.

Характеристика объектов исследования

Блок оборотной воды №1 является одной из систем охлаждения комплекса оборудования ООО "РН-Туапсинский НПЗ" и предназначен для охлаждения оборудования и технологических систем. Система полуоткрытая с испарительным охлаждением, содержит в своем составе секционную вентиляторную градирню, приемную камеру охлажденной воды, нефтеотделители и группу насосных агрегатов для подачи охлажденной воды потребителям. Подпитка системы осуществляется артезианской водой.

Характеристика ингибиторов солеотложения. В ходе лабораторных испытаний применялись химические реагенты различного состава и механизма действия, как отечественного, так и импортного производств.

Иностранные фирмы представляли реагенты фирмы BASF (Германия) линейки Antiprex[®] AD и реагенты фирмы GE (США) линейки DeposiTrol[®].

В качестве отечественных образцов была использована линейка реагентов ECOTECH[®] фирмы ООО «НПО «Экотехнологии».

Изучение методов определения кальция в системах, содержащих ингибитор коррозии

Для исследования использовали два способа: метод комплексометрического титрования [4], указанный во всех нормативных документах, как основной и методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Результаты сравнивали между собой по значению Э(D) – защитный эффект при дозировке (D) ингибитора (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение эффективности различных ингибиторов по Э(D)

Название	Э(D), % методом КТ	Э(D), % методом АЭС
BASF Antiprex® AD 1020 P	51±2	75±1
BASF Antiprex® AD 3030	47±1	55±1
GE DeposiTrol® BL 5400	32±3	47±2
GE DeposiTrol® BL 6501	54±2	55±1
ECOTECH® ING1010	78±1	85±2
ECOTECH® ING1020	76±2	85±1
ECOTECH® ING1040	64±2	74±1
ECOTECH® ING1050	23±1	55±1

Анализ полученных данных показал сильное расхождение между результатами определения комплексометрического титрования и спектральных методов. Поэтому следующей стадией работы стала оценка ошибок этими методами. Проверка правильности определения кальция в растворах методом «введено-найдено» показала, что при использовании титрования наблюдается занижения результатов (табл. 2), что может быть объяснено более сильным комплексообразованием кальция с ингибитором, чем кальция с ЭДТА. Поэтому далее в работе для оценки содержания кальция использовали только метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

Изучение силы ингибирования при обычных испытаниях и ускоренной коррозии

По результатам, полученным в модельной системе наилучшими результатами обладали две добавки ECOTECH® ING1010 и ECOTECH® ING1020. Однако для точности эксперимента исследовали все представленные ингибиторы. Результаты проведенного эксперимента представлены на рисунке 1.

В результате эксперимента, наилучший эффект проявил DeposiTrol BL6501 (смесь фосфоновых кислот с полимерами) при дозировке 50 мг/л. Снижение скорости коррозии составило 98 %. При дозировке в 5 мг/л наилучшим образом показал себя ECOTECH ING1020 (на основании ФБТК). Снижение скорости коррозии в этом случае составило 76 %. DeposiTrol BL5400

при большой дозировке произвел обратный эффект, увеличив скорость коррозии на 22 % (за счет ортофосфорной кислоты). Так же свой результат ухудшил Antiprex AD 3030 (на основании ATBS), снижавший скорость коррозии на 22 % при 5 мг/л, при 50 мг/л он снизил скорость лишь на 8 %.

Таблица 2. Проверка правильности определения

Введено, мг/дм ³	Найдено КТ, мг/дм ³	Найдено АЭС, мг/дм ³
50,0	35,8±0,6	48,9±0,8
55,0	47,3±0,9	55,3±0,5
60,0	48,9±2,1	59,7±0,6
80,0	65,3±1,7	80,1±0,5

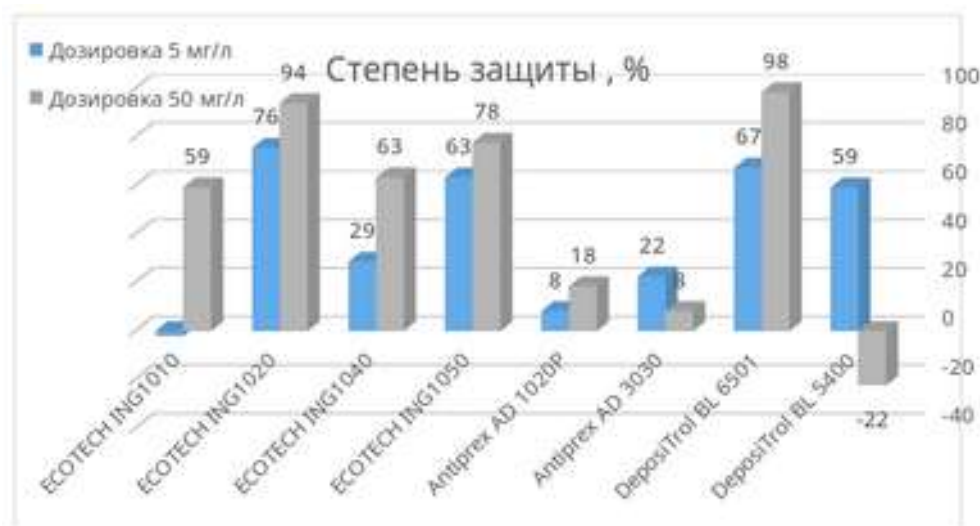


Рисунок 1. Графическое представление изменения скорости коррозии

Наиболее экономически эффективным является ECOTECH ING1020, показавший лучший результат при небольшой дозировке и второй результат при дозировке в 50 мг/л, ввиду более низкой его себестоимости, отечественного производства и упрощенной логистики.

Апробация полученных результатов на реальном объекте промышленных испытаний

Основой защиты оборудования от коррозии и образования карбонатных отложений является применение ECOTECH ING1020 - ингибитор коррозии и неорганических отложений в технических системах оборотного водяного охлаждения. Комплексоны данного реагента защищают металлы только в жестких водах, где они образуют соединения с катионами Ca²⁺ и Mg²⁺. В состав

ECOTECH ING1020 входит антиокислитель и пластификатор, в связи с чем реагент обладает высокой термической и химической устойчивостью.

Достаточный диапазон дозировок продукта зависит от фактического качества оборотной воды, подпиточной воды, состояния теплообменного оборудования и составляет 2-12 мг/л. В период опытно-промышленных испытаний реагентной обработки компанией ООО «НПО «Экотехнологии» блока оборотной воды №1 (УОВ) гарантийные показатели по скорости коррозии, уровню микробиологического загрязнения, предотвращению образования отложений находились в пределах нормируемых значений. В ходе работы были достигнуты следующие результаты:

Средняя скорость коррозии образца из Ст 3 установленный сотрудниками ООО "РН-Туапсинский НПЗ" за период с 13.06.2019 по 01.08.2019:

Скорость коррозии Блока оборотной воды №1 (УОВ) – 0,005 мм/год.

При осмотре на ОСК, до очистки от продуктов коррозии, присутствовала защитная пленка, коррозионные поражения в местах крепления с купон держателем отсутствуют, минеральные отложения на поверхности отсутствуют, следы нефтепродуктов не обнаружены.

В период с 05.08.2019 по 12.09.2019 значения Транспорта кальция (Тр Са), Удельной электропроводности (УЭП), Общей жесткости (Жоб) скорости коррозии находились в пределах нормируемых значений, указанных в техническом задании, при этом среднее значение расхода ингибитора коррозии и отложений ECOTECH ING1020 составило 3,5 кг/сут (1280 кг/год с учетом тарности продукта).

Список литературы

- [1] Григорович Д.А., Фарафонова О.В. Изучение поведения ингибитора коррозии на основе толилтриазолана углеродистой стали. - В книге: Школа молодых ученых. Материалы областного профильного семинара. - 2019. - С. 36-39.
- [2] Васильева А.В., Фарафонова О.В. Оптимизация способов определения дихромат-ионов в гальванических электролитах. - В сборнике: Современная металлургия нового тысячелетия. сборник научных трудов международной научно-практической конференции. - 2015. - С. 320-323.
- [3] Стоякина А.А., Рябичева Л.Р., Фарафонова О.В., Должанова А.А. Влияние больших концентраций молибдена на спектрофотометрические способы определения железа. - В книге: Повышение эффективности металлургического производства. Сборник тезисов докладов XXVI областной научно-технической конференции. - 2018. - С. 69-72.
- [4] Должанова А.А., Харитонов А.А., Фарафонова О.В. Определение оптимального ингибитора коррозии для водооборотной системы ЭСПЦ. - В книге: Повышение эффективности металлургического производства. Сборник материалов XXVII областной научно-технической конференции. 2019. С. 115-117.

УДК 621.747

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО И НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Еронько С. П.¹, Вишневский Д. А.², Ткачев М. Ю.¹, Назаренко В. В.²

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

²Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

COMPREHENSIVE USE OF COMPUTER AND NATURAL MODELING IN DESIGN OF METALLURGICAL EQUIPMENT

Eron'ko Sergey¹, Vishnevsky Dmitry², Tkachev Mikhail¹, Nazarenko Victor²

¹Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

²Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

Аннотация: Обоснована целесообразность комплексного применения компьютерного и натурального моделирования при разработке новых образцов металлургического оборудования, позволяющего реализовать передовые технологические процессы производства металлопродукции. На примере создания систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ рассмотрены особенности метода проектирования, предполагающего предварительную конструктивную проработку принятого технического решения на выполненной объемной компьютерной модели и последующую проверку его правильности на действующем натурном образце проектируемой системы, изготовленном в уменьшенном масштабе и функционирующем в условиях соблюдения физической сущности имитируемой с его помощью технологической операции. Использование такого инновационного метода проектирования на практике позволило избежать ошибок при подготовке конструкторской документации, предназначенной для изготовления опытно-промышленных установок, обеспечивающих механизированную подачу порошкообразных и мелкогранулированных шлакообразующих смесей в кристаллизаторы трех слябовых

Abstract: The feasibility of the integrated use of computer and field modeling in the development of new samples of metallurgical equipment, which allows for the implementation of advanced technological processes for the production of metal products, is substantiated. Using the example of creating systems for mechanized feeding slag-forming mixtures into crystallizers of continuous casting machines, we consider the features of the design method, which involves a preliminary constructive study of the adopted technical solution on a completed three-dimensional computer model and subsequent verification of its correctness on an actual full-scale model of the designed system, made on a reduced scale and functioning in conditions of observance of the physical essence imitated with its help. Technological operation. Using this innovative design method in practice made it possible to avoid mistakes in the preparation of design documentation intended for the manufacture of pilot plants providing mechanized supply of powdered and finely granulated slag-forming mixtures to crystallizers of three slab continuous casting machines in the conditions of converter shops of two metallurgical plants in the Donetsk region, as well as to the minimum necessary improvements to their design.

МНЛЗ в условиях конвертерных цехов двух металлургических комбинатов Донецкого региона, а также свести к минимуму необходимые доработки их конструктивного исполнения

Ключевые слова: шлакообразующая смесь, компьютерная модель, натурный образец
Keywords: slag-forming mixture, computer model, natural sample

Введение

Начальная стадия процесса создания перспективного образца машины или агрегата, предназначенного для реализации эффективных технологических процессов металлургического производства, предполагает предварительную конструктивную проработку принятого нового решения и последующую проверку его правильности. В современных условиях в распоряжении разработчика имеются компьютерные программы, позволяющие создать объемную модель проектируемой механической системы, на которой можно проконтролировать относительное положение и взаимосвязь ее структурных элементов и благодаря этому избежать серьезных просчетов и ошибок. Вместе с тем для выполнения расчетов геометрических и энергосиловых параметров создаваемых машин, агрегатов, устройств или установок необходимо также иметь информацию о возможных технологических нагрузках, возникающих при взаимодействии рабочих органов проектируемой механической системы с твердыми, жидкими или газообразными средами во время реализации производственного процесса. В случаях, когда ведется конструирование новой системы, принцип ее работы и условия функционирования могут существенно отличаться от известных аналогов, что не позволяет использовать имеющийся опыт их применения и увеличивает вероятность необходимых доработок опытного образца после завершения его испытаний. Связанные с этим временные и материальные издержки явились побудительной мотивацией начала использования в комплексе с компьютерным натурного моделирования, предполагающего проведение эксперимента на действующей модели с сохранением физической сущности явлений, протекающих в реальных условиях.

Модели и методы

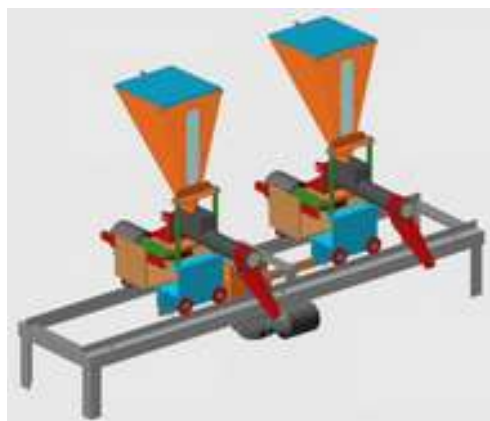
Постановка задачи

В рамках соглашения о научно-техническом сотрудничестве между кафедрами «Механическое оборудование заводов черной металлургии» Донецкого

национального технического университета и «Машины металлургического комплекса» Донбасского государственного технического университета с 2015 года ведутся разработки новых образцов технологических машин и агрегатов с целью решения задачи импортозамещения в сталеплавильном производстве. При этом используется комплексный метод проектирования, предполагающий конструктивную проработку предложенного технического решения на основе трехмерного компьютерного моделирования самого изделия и порядка его сборки, а также последующую проверку в динамике на изготовленной натурной модели эффективности функционирования его структурных механизмов и установление характера силового взаимодействия их рабочих органов с транспортируемым мелкодисперсным материалом. В качестве наглядного примера на рис. 1 *а* показана 3D-модель установки, для подачи ШОС в кристаллизатор при отливке заготовок крупного сечения, созданная с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР), а на рис. 1 *б* приведена фотография ее натурной модели, изготовленной в масштабе 1:2,5 к промышленному образцу.

Материалы исследования

Комплексное использование компьютерного и физического моделирования при проектировании по заказу ООО «НПКП Солотвин» системы механизированной подачи ШОС, предназначенной для применения на одном из ручьев слябовой МНЛЗ (фирмы «Siemens – VAI») в условиях конвертерного цеха Алчевского металлургического комбината, позволило в течении 6 месяцев выполнить проектирование и изготовить опытно-промышленную установку (фото на рис. 2 *а*), внедрение которой не потребовало доработок, поскольку она в полной мере соответствовала всем требованиям, предусмотренным техническим заданием НИОКР. Установка включает раму, смонтированную на самоходной тележке промежуточного ковша с тыльной стороны кристаллизатора. На самой раме закреплены две продольные балки, на которых установлена каретка, имеющая возможность относительного перемещения с помощью цепного привода и несущая расходный бункер, снабженный шнековым питателем [1]. Полученные экспериментальные данные об особенностях работы опытно-промышленного образца предложенной системы послужили основой при конструировании по заказу НПО «Доникс» второй установки такого же типа, предназначенной для применения на слябовой МНЛЗ № 6 (фирмы «Danieli») в конвертерном цехе металлургического комбината «Азовсталь».



а

б

Рисунок 1. Компьютерная (а) и натурная (б) модели разрабатываемой системы механизированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ при производстве заготовок особо крупного сечения



а

б

Рисунок 2. Спроектированные отечественные образцы установок механизированной подачи ШОС в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ конструкции фирм «Siemens – VAI», «Danieli»(а) и НКМЗ (б)

Разработка системы подачи ШОС для МНЛЗ № 5 (производитель НКМЗ) этого цеха потребовала принятие другого конструктивного решения, учитывающего особенности конструкции ее поворотного стола, осуществляющего замену промежуточного ковша. Из-за отсутствия свободного места для размещения рамы установки, несущей каретку с питающим бункером, приняли вариант компоновки структурных блоков системы, располагаемой с передней стороны промежуточного ковша. В ее состав (фото

на рис. 2 б) входит рама, снабженная четырьмя ходовыми колесами, попарно установленными на двух путевых балках, уложенных на рабочей площадке перпендикулярно к широкой стенке кристаллизатора. Благодаря возможности перемещения по этим балкам на расстоянии 2 м, установка может занимать две фиксированные позиции: рабочую и парковочную. При ее нахождении в рабочей позиции подающий носок шнекового питателя располагается над передней широкой стенкой кристаллизатора, а сам питатель, установленный вместе с расходным бункером на самоходной каретке, имеет возможность перемещения по двум направляющим вдоль рамы параллельно кристаллизатору. При необходимости выполнения операций по обслуживанию разливочного узла промежуточного ковша установку откатывают в позицию парковки, обеспечивая тем самым свободный доступ к устройству быстрой смены погружного стакана.

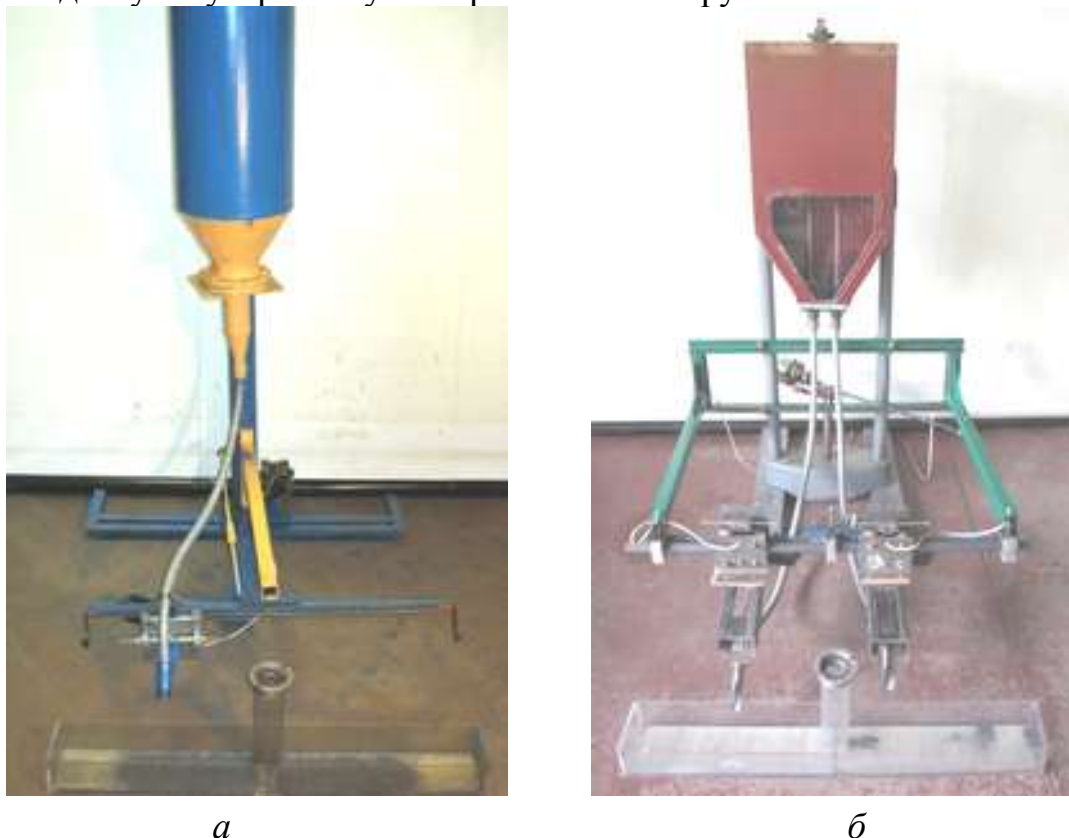


Рисунок 3. Опытные образцы систем нового поколения для реализации механизированной подачи ШОС в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ для отливки заготовок крупного (а) и особо крупного (б) сечений

Использование натуральных моделей позволило в кратчайшие сроки выполнить исследования рабочих параметров установок нового поколения [2, 3], у которых механизированная подача ШОС в кристаллизатор МНЛЗ для отливки слябов шириной до 2 м осуществляется из стационарно размещенного бункера

по гибкому металлорукаву спиральным шнеком через носок, закрепленный на каретке, совершающей возвратно-поступательное перемещение вдоль широкой стенки кристаллизатора (фото на рис. 3 а), а при получении слябов особо крупного сечения подачу смеси на зеркало металла выполняют через два носка, совершающих с помощью комбинированного привода одновременно продольное и поперечное перемещение в зоне между погружным стаканом и узкой стенкой кристаллизатора (фото на рис. 3 б). Благодаря этому обеспечивается равномерное распределение ШОС на большой площади свободной поверхности жидкой стали [5].

Обсуждение полученных результатов

Авторский надзор за работой систем механизированной подачи ШОС, проводившийся в течении 3-х лет, и результаты сопоставительного анализа показателей технико-экономической эффективности, достигнутых при их использовании в сравнении с подачей смесей вручную, позволили установить следующее. При механизированной подаче шлакообразующей смеси, благодаря более равномерному ее распределению на свободной поверхности жидкой стали в кристаллизаторе и образованию жидкой шлаковой прослойки по всему периметру поперечного сечения заготовки, улучшились условия взаимодействия ее корочки с рабочими стенками кристаллизатора, что снизило колебания нагрузки на привод механизма его качания, а также способствовало повышению качества поверхности отливаемой слябовой заготовки. Результаты статистической обработки данных о расходе шлакообразующей смеси свидетельствуют о том, что по мере освоения механизированной подачи ШОС в сравнении с подачей вручную ее расход снизился на 15%. Наряду с этим наличие модуля поиска и анализа данных в системе АСУ ТП обслуживаемых МНЛЗ позволило выполнить сравнительную оценку по ходу литья на них заготовок таких технологических параметров функционирования кристаллизатора, как тепловой поток и его асимметрия по узким стенкам при ручной и механизированной подаче ШОС. Установлено, что в случае механизированного ввода шлакообразующей смеси колебание теплового потока в кристаллизаторе уменьшается в 1,5 раза, а асимметрия теплового потока по противоположным узким стенкам кристаллизатора в – 1,6 раза. Это обусловлено стабилизацией толщины слоя ШОС в зазоре между поверхностью слитка и стенками кристаллизатора благодаря равномерному распределению смеси по всему зеркалу жидкой стали, что в итоге положительно сказалось на качестве отливаемой заготовки. Финансовые

затраты на внедрение установок механизированной печи ШОС окупаются в течение 10 месяцев за счет экономии дорогостоящих смесей.

Выводы

Таким образом комплексное использование компьютерных и натуральных моделей при конструировании металлургического оборудования позволили создать отечественные образцы систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок, не уступающие по эффективности функционирования зарубежным аналогам на различных типах МНЛЗ. Их внедрение в производство позволило повысить степень механизации труда разливщиков стали, снизить на 15 % потребление ШОС и улучшить качество поверхности отливаемых заготовок.

Список литературы

- [1] Еронько, С.П. Расчет и конструирование системы дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ при производстве слэбов сверхкрупного сечения [Текст] / С.П. Еронько, М.В. Ющенко, С.В. Шлемко // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – №1(23). – С. – 10 – 16.
- [2] Еронько, С.П. Экспериментальные исследования рабочих параметров спиральных шнеков для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ [Текст] / С.П. Еронько [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 9 (Т 57). – С. 33 – 40.
- [3] Improvement in the reliability of mechanical flux feed systems for continuous slab-casting machine molds [Text] / S.P. Eron'ko [e. a.] // Metallurgist. Vol. 62, Nos 9 – 10, January, 2019 pp. 892 – 899.
- [4] System for Mechanized Supply of Slag-Forming Mixtures to a Mold in Casting of Slab with a Very Large Cross Section [Text] / S.P. Eron'ko [e. a.] // ISSN0036-0295, Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2018.- № 12.- P. 72 – 76.

УДК 621.74

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ МНЛЗ

Кузьмин Г. О.¹, Левченко Э. П.¹

Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX CONTROL OF CCM COOLANT

Gleb Kuzmin¹, Eduard Levchenko¹

Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

Аннотация: Предложен способ обеспечения качества охлаждающей воды МНЛЗ посредством постоянного контроля её параметров. С помощью обратной связи на базе программируемого модуля решена задача своевременного оповещения об изменении качественных параметров охлаждающей воды.

Ключевые слова: МНЛЗ, водяное охлаждение, аппаратно-программный комплекс.

Abstract: This article proposes a way to ensure the quality of cooling water in a CCM using continuous monitoring of its parameters. Using the programmable module, the task of timely notification of a change in the quality parameters of cooling water was solved.

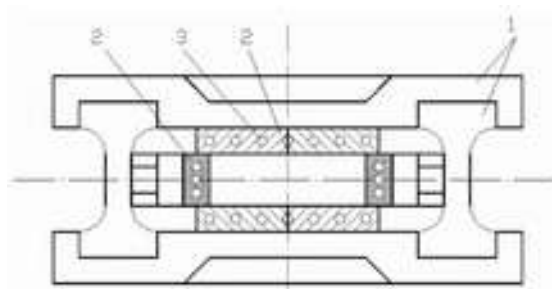
Key words: CCM, water cooling, hardware and software complex

Жидкостное охлаждение вальцового кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения (ЗВО) слабовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) обеспечивается за счет циркуляции воды в каналах высокотеплопроводных медных стенок рабочей полости кристаллизатора и комбинированных роликов, а также путем орошения водой, разбрызгиваемой для охлаждения заготовки.

Кристаллизатор МНЛЗ работает как теплообменник, задача которого состоит в быстром отводе тепла от стали, проходящей через него (рис. 1). К краю кристаллизатора корка отливки начинает утолщаться, при этом изнашивая поверхность кристаллизатора. Кроме того, диффузия меди из кристаллизатора приводит к появлению брака — трещин на поверхности отливок. Для равномерного первичного охлаждения температура воды в каналах медных стенок должна быть в пределах 10–60°C [1].

Вскипание воды ведет к отложениям накипи на стенках, что увеличивает сопротивление теплопередачи от корочки слитка к воде и вызывает перегрев стенок (например, отложения известковой накипи толщиной 0,1 мм способствуют увеличению температуры стенки почти на 100 °С). Повышение температуры медной стенки выше температур рекристаллизации меди неизбежно приводит к их деформации в районе мениска жидкого металла и, соответственно,

искажению профиля рабочей поверхности кристаллизатора. При обычном протекании процесса разливки температура внутренних стенок кристаллизатора не превышает 260 °С (то есть, ниже температуры разупрочнения меди), однако в случаях малой скорости протока воды в кристаллизаторе, неравномерного охлаждения или значительных отложений накипи на внешних поверхностях температура может достигать 300–400 °С, что вызывает грубую деформацию кристаллизатора [2].



1 – стальной каркас; 2 – медные стенки; 3 – каналы для охлаждающей воды
Рисунок 1. Составной толстостенный кристаллизатор для отливки слябов

Вода подводится снизу со скоростью 5–8 м/с, расход составляет 100–120 м³/час. Такая скорость проточной воды необходима для эффективного отвода тепла и предотвращения возможного кипения воды на внутренней поверхности каналов. Допустимый износ медной пластины по толщине до 1 мм. Расход меди достигает 0,09–0,15 кг/т стали [1, 3].

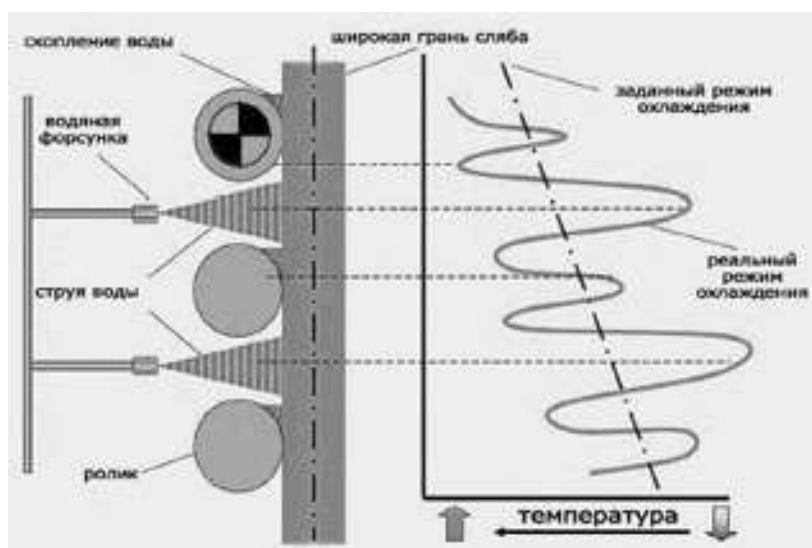


Рисунок 2. Характер отвода тепла от заготовки в ЗВО

Отвод тепла от поверхности заготовки в ЗВО осуществляется путем интенсивного опрыскивания ее поверхности водой или водовоздушной смесью, отвода тепла к поддерживающим роликам с внутренним охлаждением, а также вследствие конвекции и лучеиспускания в окружающую среду (рис. 2).

Как видно из рисунка 2, наиболее интенсивно тепло отводится в областях прямого действия форсунки и контакта опорного ролика с поверхностью заготовки (где скапливается часть подаваемой на охлаждение воды), а минимальный отвод тепла имеет место в зоне под роликами, куда практически не попадает распыляемый охладитель. Принято считать, что доля суммарного теплоотвода в ЗВО составляет 75–78%, причем 38–40% тепла передается подаваемому форсунками охладителю, приблизительно 30% поддерживающим роликам с внутренним охлаждением и около 8% вследствие лучеиспускания и конвекции в окружающую среду.

Наиболее неблагоприятными условиями охлаждения являются колебания температуры заготовки в области аустенитного превращения, поскольку они провоцируют возникновение горячих поверхностных трещин. Заготовка должна охлаждаться равномерно, а появление темных или ярких пятен на ее поверхности служит показателем неудовлетворительной работы форсунок или системы в целом [4].

Для обеспечения равномерного охлаждения заготовки по длине ЗВО предусматривается несколько секций с различной интенсивностью отвода тепла. Для достижения требуемой интенсивности теплоотвода применяются следующие основные методы подачи охлаждающего вещества: струями воды или водовоздушной смесью, направляемой между опорными роликами через специально устанавливаемые форсунки; а также охлаждение на воздухе посредством излучения.

При этом температурное состояние непрерывнолитой заготовки может достаточно полно быть оценено на математических теплофизических моделях.

Опорные ролики слябовых МНЛЗ работают в достаточно сложных условиях, поскольку находятся в зоне повышенных температур и испытывают высокие нагрузки, связанные с поддержкой заготовки. При этом рабочая поверхность роликов постоянно контактирует с горячей поверхностью заготовки, и ролики соответственно подвергаются сильному температурному воздействию. Ролики состоят из трех обечаек, опирающихся на четыре подшипника качения, установленные в подушках. Внутри оси выполнен канал охлаждения, в противоположные концы которого установлены специальные верт-

люги для подвода и отвода охлаждающей воды. В подушках подшипников также выполнены каналы охлаждения для защиты наружного кольца подшипника [3].

Если интенсивность водяного охлаждения оказывается недостаточной, то термические нагрузки на поверхность роликов приводят к появлению на их рабочей поверхности трещин (так называемый «разгар»), которые отрицательно влияют на качество поверхности заготовки, а также приводят к поломке роликов. Дополнительным фактором, влияющим на качество поверхности заготовки в случае недостаточного охлаждения роликов, выступает «налипание» окалины на их рабочую поверхность, травмирующее поверхность сляба, оставляя в нем соответствующие вмятины.

С целью снижения износа оборудования МНЛЗ и вероятности выхода его из строя, а также для получения заготовки должного качества, предполагается применение аппаратно-программного комплекса (далее АПК) контроля охлаждающей жидкости. Это позволит сократить расходы на обслуживание и ремонт участков МНЛЗ, а также снизит производство бракованной продукции, что благоприятным образом скажется на экономике промышленного предприятия.

АПК представляет собой устройство непрерывного мониторинга состояния и качества охлаждающей воды. Принцип его работы заключается в контроле температуры, мутности, водородного показателя (рН), общей минерализации и электропроводности, а также своевременного оповещения в режиме реального времени, в случае если указанные показатели выйдут за установленные нормы. Кроме того, с помощью обратной связи возможно обеспечение системы охлаждения путем перераспределения потоков воды с неблагоприятными показателями ее качества с точки зрения рационального протекания процесса кристаллизации путем замены источника водоснабжения с нужными характеристиками.

Охлаждающая вода кристаллизаторов и роликов постоянно циркулирует в локальном замкнутом контуре и подвергается охлаждению в теплообменниках. В системе используется умягченная или полностью обессоленная вода, качество которой не ниже требований, изложенных в таблице 1.

АПК расположен в контуре перед непосредственной подачей воды в охлаждающие каналы и форсунки. Мониторинг осуществляется в режиме реального времени и дает возможность оператору контролировать качество охлаждающей жидкости. Например, если уровень рН окажется ниже 7, то устройство моментально оповестит об этом, а также предложит рекомендации (или автомати-

чески примет меры) по повышению щелочности до рекомендуемых значений, применяя обогащение воды гидрокарбонатами-ионами (калия и натрия).

Таблица 1 — Показатели качества охлаждающей воды на кристаллизаторы

Наименование параметра	Единица измерения	Количественный показатель
Щелочность (общая)	Мг·экв/л	<2,5
Жесткость: общая карбонатная	Мг·экв/л	<0,7
Сульфаты	мг/л	<250
Хлориды	мг/л	<150
Масла	мг/л	не допускаются
рН	-	7-9
Количество частиц	мг/л	<10
Крупность частиц	мм	<0,2
Солесодержание	мг/л	<1000
Содержание железа	мг/л	<0,3
Электропроводность	МкОм/см	<600
Температура на входе	°С	<35

На современной МНЛЗ предусмотрена также подпитка контура водяного охлаждения с учетом потерь воды при замене оборудования, а также система аварийного охлаждения кристаллизаторов, обеспечивающая безопасное прекращение процесса непрерывной разливки стали в ситуации, когда произошло внезапное прекращение подачи воды от основной системы охлаждения.

Таким образом внедрение системы АПК в процесс непрерывной разливки стали позволит гарантированно повысить уровень культуры производства получения непрерывно литых заготовок, обеспечить нужное качества производимой продукции, а также увеличить межремонтный период работы оборудования.

Список литературы

- [1] Смірнов, О. М. Безперервне розливання сталі [Текст]: підручник / О. М. Смірнов, С. В. Куберський, Є. В. Штепан. — Алчевськ: ДонДТУ, 2011. — 520 с.
- [2] Дюдкин, Д. А. Современная технология производства стали [Текст]: учебное пособие для вузов / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. — Москва: Теплотехник, 2007. — 528 с.
- [3] Целиков, А. И. Машины и агрегаты металлургических заводов [Текст]: учебник для вузов в 3-х т.: Т. 2 / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник и др. — 2-е изд. — Москва: Металлургия, 1988. — 432 с.
- [4] Кудрин, В. А. Металлургия стали [Текст]: учебник для вузов / В. А. Кудрин. — Москва: Металлургия, 1989. — 560 с.
- [5]

УДК 669.14

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ, УПРОЧНЕННОЙ МЕТОДОМ ПРЕРВАННОЙ ЗАКАЛКИ

Джаксымбетова М. А.¹, Мазур И. П.², Канаев А. Т.¹

¹*Казахский агротехнический университет им.С.Сейфуллина, Нур-Султан,
Казахстан*

²*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ROD REINFORCED STEEL HARDENED BY HARDENING INTERRUPTION

Макпал Жахымбетова¹, Igor Mazur², Amangeldy Kanayev¹

¹*S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

²*Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

Аннотация: Анализ литературных данных по направлению улучшения качества сортового проката убедительно показывает высокую эффективность использования в различных отраслях экономики страны деформационно-термически упрочненного сортового проката: снижение расхода металлопроката до 20-45%, экономия дорогих и дефицитных легирующих элементов, повышение надежности и долговечности деталей машин, механизмов и металлоконструкций, возможность использования упрочненных изделий при низких температурах. Поэтому создаваемые сегодня и действующие сортовые прокатные станы оснащаются установками ускоренного и регулируемого охлаждения. Это позволит коренным образом улучшить уровень механических свойств, а, следовательно, качество и конкурентоспособность массовых видов как углеродистого, так и легированного сортового проката [1,2].

Ключевые слова: сталь, закалка, сортовой прокат.

Abstract: Analysis of the literature on improving the quality of long products clearly shows the high efficiency use in different sectors of the economy of deformation and heat-strengthened rolled steel: reduction of metal to 20-45%, saving expensive and scarce alloying elements, increasing the reliability and durability of details of machines, mechanisms and structures, the use of hardened products at low temperatures. Therefore, the existing long-range rolling mills are equipped with accelerated and controlled cooling units. This will radically improve the level of mechanical properties, and, consequently, the quality and competitiveness of mass types of both carbon and alloy rolled products [1,2].

Key words: steel, quenching, rolled products.

Введение

Для производства деформационно-термически упрочненного сортового проката необходимо в технологическом потоке производства совмещение

горячей прокатки с последующей высокотемпературной термической обработкой. При этом особого внимания заслуживают особенности формирования зеренной структуры в процессе параллельно идущих рекристаллизационных явлений. В этой связи важно отметить, что благоприятное влияние совмещения горячей пластической деформации с фазовыми превращениями на структуру и конечные свойства материалов устраняется только собирательной рекристаллизацией. Если же процессы рекристаллизации не достигают стадии нормального роста зерна, т.е. собирательной рекристаллизации, то формирование окончательной структуры происходит в условиях повышенной плотности несовершенств кристаллического строения, в первую очередь, границ зерен, которые на начальных стадиях первичной рекристаллизации могут играть основную роль. Если горячая деформация осуществляется при температурах, превышающих температуру рекристаллизации, то это не означает неизбежного получения рекристаллизованного (полностью разупрочненного) состояния. Когда имеют в виду, что процесс деформации идет выше температуры рекристаллизации, это означает лишь, что при данной температуре может быть получено полностью рекристаллизованное состояние. Однако следует заметить, что как возврат (отдых, полигонизация), так и рекристаллизация (первичная, собирательная) – многостадийные процессы, идущие во времени, их развитие может быть в значительной степени подавлено даже при высоких температурах. Поэтому как показывают многочисленные исследования, варьируя четыре основных параметра деформации - степень, скорость, температуру деформации и длительность последеформационной паузы (ПДП) между окончанием прокатки и началом интенсивного охлаждения, - можно получить полный набор структурных состояний, начиная от состояния горячего наклепа до полного рекристаллизованного (разупрочненного) состояния [3,4].

Модели и методы. Постановка задачи

Упрочняющую термическую обработку с прокатного нагрева проводили на опытно-промышленной установке [2] на класс прочности Ат-V1 по ГОСТ 10884-2011 путем быстрого охлаждения (~ 500 °C/c) арматуры с 1050°C до 350 °C. Продолжительность паузы между окончанием горячей прокатки и началом интенсивного охлаждения составляла 2-3с. Для сравнительных исследований арматуру той же стали подвергали термическому упрочнению с отдельного нагрева. При этом в целях получения величины действительного зерна аустенита, близкой к таковой в случае термоупрочнения с

прокатного нагрева, термоупрочнение с отдельного нагрева проводили путем закалки образцов с 950°C при выдержке 15 мин. Отпуск проводили в интервале температур 300-600 °С в течение 1 часа. Исследовали арматуру диаметром 12 мм из стали химического состава, %: 0,21 С; 1,30 Mn; 1,00 Si.

Механические свойства образцов, подвергнутых деформационно-термическому упрочнению определяли на установке «Инстрон», предварительно подготовив образцы по ГОСТ 1497-2004. Отдельные механические испытания дублировали методом неразрушающего контроля образцов от готовых арматурных профилей феррозондовым коэрцитиметром КИФМ-1, который основан на принципе устойчивых корреляционных связей между механическими (прочность, твердость) магнитными (коэрцитивная сила) свойствами проката.

Для микроструктурного анализа образцы изготавливали по стандартной методике, исключающей возможное нарушение структуры.

Полученные результаты и их обсуждение

а) Анализ влияние постоянных примесей стали (углерода, марганца и кремния)

Из всех элементов, вводимых в сталь для достижения после упрочняющей термической обработки определенного комплекса физических, механических, технологических и других характеристик, углерод является главным компонентом, определяющим закаливаемость, т.е. повышение твердости при закалке. Однако повышение твердости и прочности мартенсита с ростом содержания углерода в стали достигается ценой снижения пластичности и особенно ударной вязкости.

Поэтому принято, что при разработке оптимального химического состава стали для массового производства термически упрочненной арматуры с прокатного нагрева используется низкоуглеродистая сталь с содержанием углерода в пределах 0,16-0,22% (по ГОСТ 380-2004).

Выбор такого интервала содержания углерода позволяет:

- осуществлять технологический процесс термического упрочнения с прокатного нагрева по способу прерванной закалки с получением высокопрочного, но достаточно пластичного мартенсита без необходимости проведения специального отпуска термоупрочненной стали;

- получить в сочетании с низким легированием достаточно широкий интервал температур самоотпуска, в пределах которого наблюдается медленное разупрочнение. Это является важным условием для обеспечения стабильности технологического процесса термоупрочнения арматуры с прокатного нагрева;

- полностью исключить опасность трещинообразования при закалке и достигнуть после термического упрочнения с прокатного нагрева достаточно высокой конструктивной прочности арматурной стали, в частности, ее сопротивляемости хрупкому разрушению.

Не менее важную роль в определении химического состава материала для производства термоупрочненной арматуры с прокатного нагрева выбор оптимального количества марганца и кремния, как постоянных примесей сталей и вводимых в сталь в качестве раскислителей.

Проведенный краткий анализ свидетельствует о том, что влияния марганца и кремния на соотношение прочности, пластичности и склонности стали к хрупкому разрушению неоднозначно. Оно находится в сложной зависимости от содержания углерода и других элементов в стали, технологии ее производства и термической обработки. Поэтому по справочным данным выбрать оптимальное содержание этих элементов применительно к термически упрочняемой с прокатного нагрева арматурной стали не представляется возможным.

Систематические исследования разных химических составов сталей показывают, что с точки зрения технологичности при термоупрочнении с прокатного нагрева и получении достаточно однородных свойств по длине прутков наиболее подходящим материалом для производства высокопрочной термоупрочненной арматуры является низкоуглеродистая сталь с $\sim 1\%$ Mn и $\sim 1\%$ Si.

б) Свойства арматурной стали, термически упрочненной с отдельного и прокатного нагревов

При изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций широко применяют электротермический способ натяжения, при котором термически упрочненная арматурная сталь не должна терять исходные прочностные свойства, по которым она должна быть использована в готовых изделиях. Поэтому обеспечение этого требования является одним из важнейших условий при выборе стали для изготовления термически упрочненной стали.

Кроме того, представляет интерес результаты сравнительного исследования свойств арматурной стали, термически упрочненной с прокатного и отдельного нагревов для выяснения эффекта высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) при термоупрочнении с прокатного нагрева. Исследовали арматуру диаметром 12 мм из стали химического состава, %: 0,21 C; 1,30 Mn; 1,00 Si.

Изменения физико-механических свойств (коэрцитивной силы, предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения) при

отпуске арматурной стали термоупрочненной с прокатного и отдельного нагревов представлены на рисунках 1- 4.

Как видно из рисунков, свойства стали, упрочненной с прокатного и отдельного нагрева неодинаковы. При несущественном различии в прочностных свойствах и коэрцитивной силе, пластичность арматурной стали термически упрочненной с прокатного нагрева по сравнению с той же сталью, закаленной с отдельного нагрева в 2 раза выше. Вплоть до температуры отпуска 400°C пластичность арматурной стали термически упрочненной с прокатного нагрева, продолжает оставаться более высокой, чем у стали, термически упрочненной с отдельного нагрева. Повышение пластичности при термическом упрочнении с прокатного нагрева оказывается тем более заметным, чем выше прочность стали после такой обработки. На повышение пластичности арматурной стали при термическом упрочнении с прокатного нагрева указано и в работах, причем, этот эффект возрастает с уменьшением продолжительности последеформационной паузы (менее 20с). Следует подчеркнуть, что указанное повышение пластичности в разной степени обнаруживается на различных углеродистых и низколегированных сталях, поэтому оно является типичным эффектом, присущим процессу термического упрочнения с прокатного нагрева при малых (3-5с) последеформационных паузах и больших скоростях последующего охлаждения стали.

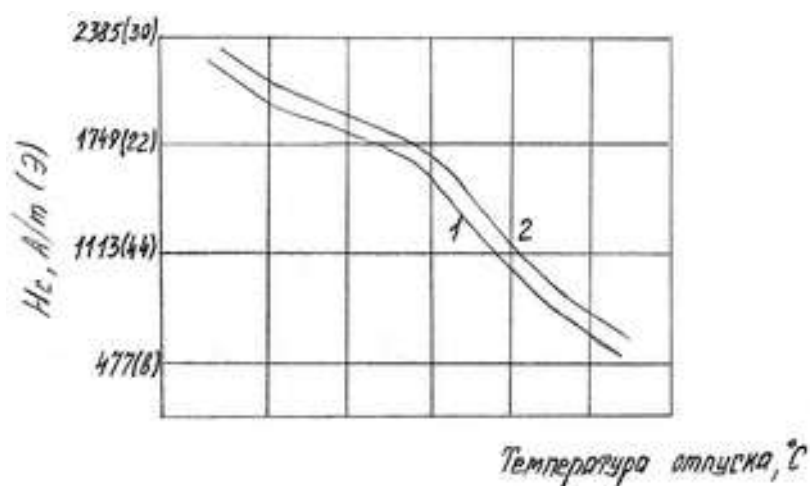


Рисунок 1. Изменение коэрцитивной силы - А/м (Э) при отпуске арматурной стали диаметром 12 мм термически упрочненной с отдельного (1) и прокатного (2) нагревов

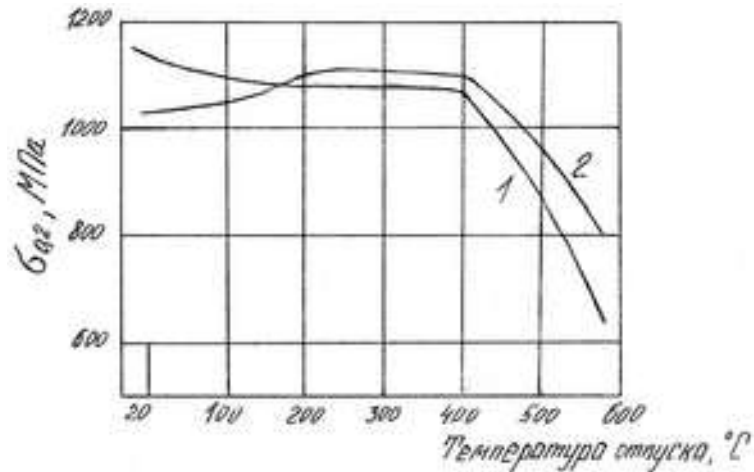


Рисунок 2. Изменение предела текучести - $\sigma_{0,2}$ при отпуске арматурной стали диаметром 12 мм термически упрочненной с отдельного (1) и прокатного (2) нагревов

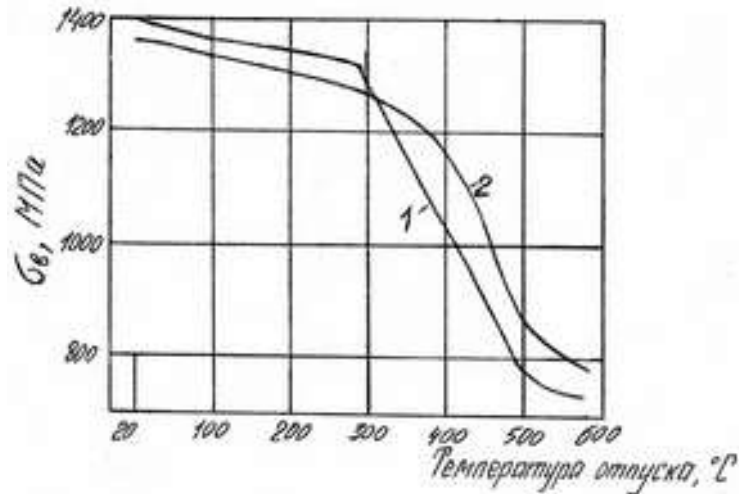


Рисунок 3. Изменение временного сопротивления - σ_v при отпуске арматурной стали диаметром 12 мм термически упрочненной с отдельного (1) и прокатного (2) нагревов

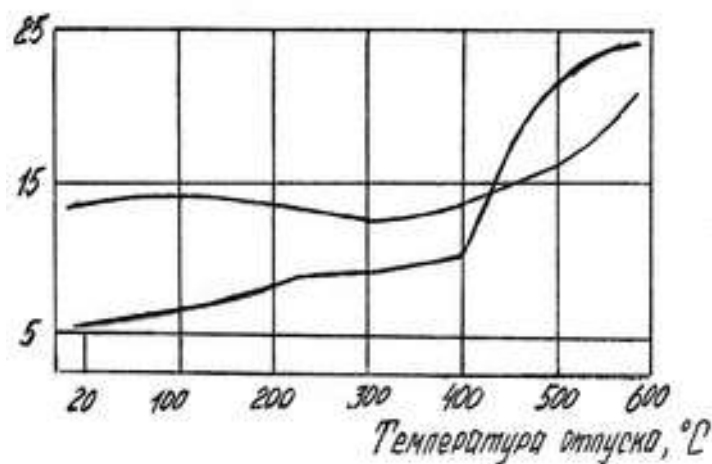


Рисунок 4. Изменение относительного удлинения - δ_5 при отпуске арматурной стали диаметром 12 мм термически упрочненной с отдельного (1) и прокатного (2) нагревов

При отпуске 450°C и выше арматура, термически упрочненная с прокатного нагрева, обнаруживает заметно большее сопротивление разупрочнению при отпуске, чем в случае термического упрочнения с отдельного нагрева. Более высокая сопротивляемость отпуску сталей, закаленных после горячей пластической деформации, обнаружена и другими исследователями.

Выводы

1. Из всех элементов, вводимых в сталь для достижения после упрочняющей термической обработки определенного комплекса физических, механических, технологических и других характеристик, углерод является главным компонентом, определяющим закаливаемость. Однако повышение твердости и прочности мартенсита с ростом в стали содержания углерода достигается ценой снижения пластичности и особенно ударной вязкости.

2. Влияние марганца и кремния на соотношение прочности, пластичности и склонности стали к хрупкому разрушению неоднозначно. Оно находится в сложной зависимости от содержания углерода и других элементов в стали, технологии ее производства и термической обработки.

3. Свойства стали, упрочненной с прокатного и отдельного нагрева неодинаковы. При несущественном различии в прочностных свойствах и коэрцитивной силе, пластичность арматурной стали термически упрочненной с прокатного нагрева по сравнению с той же сталью, закаленной с отдельного нагрева в 2 раза выше

4. При температуре отпуске 450°C и выше арматурная сталь, термически упрочненная с прокатного нагрева, обнаруживает большее сопротивление разупрочнению при отпуске, чем в случае термического упрочнения с отдельного нагрева.

Список литературы

- [1] Канаев А.Т., Канаев А.А., Токтанаева А.А. Технология термической обработки металлических материалов. Павлодар: Арман-ТВ, 2007, - 388 с.
- [2] Канаев А.Т., Богомолов А.В., Решеткина Е.Н. Исследование дефектов и термическое упрочнение арматурного проката непрерывнолитых заготовок // Международный научно-технический журнал «Сталь», №6, 2010, - с.87-91.
- [3] Перспективные технологии, оборудование аналитические системы для материаловедения и наноматериалов. Материалы Международной Казахстанско-Российско-Японской научной конференции. Москва, Усть-Каменогорск, 2008, стр.537- 540, 541-544.
- [4] Ч. Пул-МЛ., Ф.Оуэнс. Мир материалов и технологий. М.: Техносфера, 2009, - 335 с.

УДК 621.76.549.22

ГРАДИЕНТНО-СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПРИ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ

Косанова И. М.¹, Мазур И. П.², Канаев А. Т.¹

¹Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан

²Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

GRADIENT-LAYERED STRUCTURES FORMED DURING SURFACE-PLASMA HARDENING OF WHEEL STEEL

Kossanova Indira Muratovna¹, Mazur Igor 'Petrovich², Kanaev Amangel'di Tokeshovich¹

¹S.Seifullin Kazakh Agrotechnical university, Nur-Sultan. Kazakhstan

²Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: Показано, что при высокоскоростном нагреве и охлаждении, имеющем место при поверхностной плазменной закалке, в упроченной зоне (~3 мм) колесной стали, образуется градиентно-смешанная структура, формирование которой ориентируется различным механизмом фазового ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращения в сечении зоны теплового влияния. Отмечается, что в поверхностной зоне реализуется промежуточный механизм с преобладанием превращения аустенита в смешанные структуры троосто-мартенсита и сорбита, в центральной зоне превращение переохлажденного аустенита проходит по диффузионному механизму. Формирование в поверхностном слое колесной стали градиентно-слоистой структуры дает возможность исключить образование резкой грани перехода от структур мартенсита к троосто-мартенситным.

Ключевые слова: структурообразование, микротвердость, аустенит, мартенсит, термокинетическая диаграмма, скорость нагрева и охлаждения.

Absrtact: It is shown that during high-speed heating and cooling, which occurs during surface plasma quenching, in the hardened zone (~ 3 mm) of the wheel steel, a gradient-mixed structure forms, the formation of which is guided by a different mechanism of phase ($\gamma \rightarrow \alpha$) transformation in the cross section of the heat-affected zone. It is noted that in the surface zone intermediate mechanism is realized in the transition zone with the predominance of the transformation of austenite into mixed structures of troost-martensite and sorbitol, in the central zone the transformation of supercooled austenite proceeds by the diffusion mechanism the formation of a usual ferrite-pearlite structure, the dispersion of which is 2 points higher than in the hot-rolled state. The formation of a gradient-layered structure in the surface layer of wheel steel makes it possible to exclude the formation of a sharp edge of the transition from martensite structures to trosto- structure.

Key words: structure formation, microhardness, austenite, martensite, thermokinetic diagram, heating and cooling rate.

Введение

Исследования особенностей структурообразования и формирования прочностных характеристик конструкционных сталей при поверхностной

плазменной обработке является одной из важных задач современного теоретического и прикладного материаловедения, поскольку лежат в основе разработки и создания эффективных способов повышения служебных характеристик изделий. Так, для повышения эксплуатационного ресурса железнодорожных колес на сегодняшний день все шире применяется перспективный способ поверхностной обработки колес низкотемпературной плазмой. Преимуществом этого способа является локальность нагрева и высокая концентрация тепловой энергии в зоне нагрева, что дает возможность получать на поверхности изделия модифицированный слой с высоким комплексом механических свойств. Модернизация структуры и свойств поверхностного слоя происходит в условиях сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения (10^3 – 10^5 К/с) и кратковременности воздействия на обрабатываемый материал (10^{-2} – 10^{-4} К/с). При таких параметрах скоростей нагрева и охлаждения, а также кратковременности воздействия теплового потока на обрабатываемый материал, характерных для плазменной обработки, процессы гомогенизации и распада твердого раствора при охлаждении не успевают завершиться. Вследствие этого конечные структуры поверхностного слоя стали неоднородны по химическому составу, структуре, физико-механическим свойствам[1].

Поэтому при плазменной обработке особое значение приобретают нестационарные неравновесные процессы, которые имеют важное, в ряде случаев определяющее, значение при формировании конечной структуры и свойств материала. Такое локальное воздействие на поверхностные слои стали кардинально меняет ее зеренную и субзеренную структуру и физико-механические и эксплуатационные свойства конечных изделий.

Материалы и методы исследования

Плазменно-термическому упрочнению подвергали цельнокатаные колеса, изготовленные из углеродистой стали марки 2 (ГОСТ 10791-2011).

Исследовали микроструктуру образцов, глубину упрочненного слоя, показатели механических свойств и распределение микротвердости по сечению. Микрошлифы для исследования готовили по стандартной методике, исключая вероятное нарушение исходной микроструктуры. Микроскопические исследования проводили на оптическом микроскопе Axio Observer D1m Carl Zeiss при увеличении $\times 200$ на микрошлифах, вырезанных в поперечном направлении из сегмента с условием сохранения упрочненного слоя. Прочностные и

пластические характеристики определяли на испытательной установке «Инстрон», предварительно подготовив образцы по ГОСТ 1497- 94.

С целью исследования особенностей формирования в упрочненном слое слоистой структуры проводили эксперименты, направленные на выяснение влияния слоисто-градиентной структуры в колесной стали на износостойкость и сопротивляемость хрупкому разрушению. Макроскопические исследования проводили на поперечном темплете бандажа с высотой гребня 28 мм впоследствии травления 50% водным раствором серной кислоты.

Измерение микротвердости упрочненного слоя проводили на микрошлифе до травления на устройстве ПМТ-3 при нагрузке 1,962Н (200гс). Измерение на поперечном шлифе проводилось в направлении, перпендикулярном к касательной образующей гребня с максимальной глубиной упрочненного слоя. Значения микротвердости приведены в табл.- 1.

Таблица 1. Изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя

Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость, HV ₀₂	Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость, HV ₀₂
0,10	837	0,95	540
0,20	792	1,25	414
0,30	673	1,55	359
0,40	608	1,70	330
0,50	594	1,90	310
0,60	594	2,10	287
0,70	566	2,30	282

Как видно из таблицы 1, изменение микротвердости происходит в диапазоне от 860 HV₀₂ до 280HV₀₂. На глубине 0,05-0,30 мм имеется мартенситная структура с микротвердостью 860-673 HV₀, на глубине 0,40-1,40 мм троосто-мартенситная структура с микротвердостью 608-414 HV₀₂, затем трооститная структура на глубине 1,55-1,70 мм с микротвердостью 359-330 HV₀₂, сорбитная на глубине 1,90-2,30 мм с микротвердостью 310-282 HV₀₂, далее структура основного металла с феррито-перлитной структурой. Формирование градиентно-слоистой структуры находится разным механизмом фазового ($\gamma \rightarrow \alpha$) изменения в сечении арматурных стержней при прерванной закалке[2].

Изменения микроструктуры стали, подвергнутой поверхностной плазменной закалке, демонстрирует, что по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон разной микротвердости. На поверхности располагается зона, химический состав которой соответствует составу стали с содержанием углерода 0,63%. При резком охлаждении происходит ее превращение в игольчатый мартенсит с дисперсностью 5-15 мкм. За ней следует зона преобразованного в твердом состоянии аустенита в троостомартенсит. В микроструктуре этих слоев наблюдается присутствие небольшого количества остаточного аустенита, количество которого колеблется и зависит от глубины закаленного слоя.

Структура остается феррито-сорбитной и затем плавно переходит в феррито-перлитную. Суммарная микротвердость снижается до исходной. Исходная структура представляет собой смесь ферритных и перлитных зерен с объемной долей каждой фазы соответственно 40-60%.

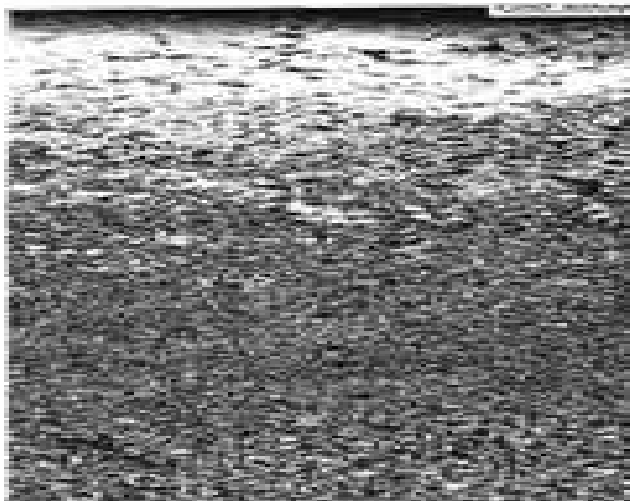


Рисунок 1. Градиентно-слоистая структура упрочненной зоны цельнокатаного колеса из стали марки 2 по ГОСТ 10790-2011

Обсуждение полученных результатов

Следует подчеркнуть, что при непрерывном охлаждении не удастся разграничить процессы образования чистого троостита, сорбита или перлита, так как скорость конфигурации температуры по сечению охлаждаемого изделия не остается неизменной, она переменна и меняется по определенному закону, зависящему от теплофизических показателей стали. В реальности процессы превращения могут накладываться один на другой по температуре и времени

своего развития, что ведет к формированию, как правило, смешанных структур в виде мартенсит + троостит, троостит + сорбит или же сорбит + перлит (рис.1).

С данных позиций рассмотрим кинетику и закономерности формирования градиентно-слоистой структуры на базе обычной схемы термокинетической диаграммы доэвтектоидной углеродистой стали. Сплошные линии соответствуют распаду аустенита при непрерывном охлаждении (термокинетические), пунктирные – распаду аустенита при постоянной температуре (изотермические) [3].

Видно, что термокинетическая диаграмма при температурах выше мартенситной точки M_n ($\sim 260^\circ\text{C}$) характеризуется лишь только одним кинетическим максимумом, что означает отсутствие промежуточного механизма распада аустенита (незаштрихованная часть диаграммы). Из рисунка 1 следует, что при охлаждении аустенита со скоростью V_3 (критическая скорость закалки) и выше образуется пакетный мартенсит, при меньшей скорости охлаждения V_2 переохлажденный аустенит превращается в троосто-мартенсит частично по перлитному (диффузионному), частично по мартенситному (бездиффузионному) механизму. При еще меньших скоростях охлаждения V_1 превращение развивается по диффузионному механизму с образованием сорбита и перлита.

Снимки структур стали, образованные различным механизмом ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращения снятые оптическим и электронным микроскопами приведены на рис.2

Сравнение кинетики превращения аустенита в изотермических критериях и в процессе непрерывного охлаждения показывает, что соответствующие линии на термокинетических диаграммах находятся правее и ниже аналогичных линии изотермической диаграммы. Это свидетельствует о том, что устойчивость переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении немного больше и превращение протекает при более низких температурах, чем в случае изотермического распада переохлажденного аустенита. На практике это отображается на величине межпластиночного расстояния, являющегося важнейшей структурным показателем конструкционных сталей. Межпластиночное расстояние представляет собой усредненную сумму толщин 2-х соседних пластин феррита и цементита перлитных структур. Чем больше скорость охлаждения, тем меньше межпластиночное расстояние и тем дисперснее получающаяся феррито-карбидная смесь, тем выше микротвердость (твердость) стали [4].

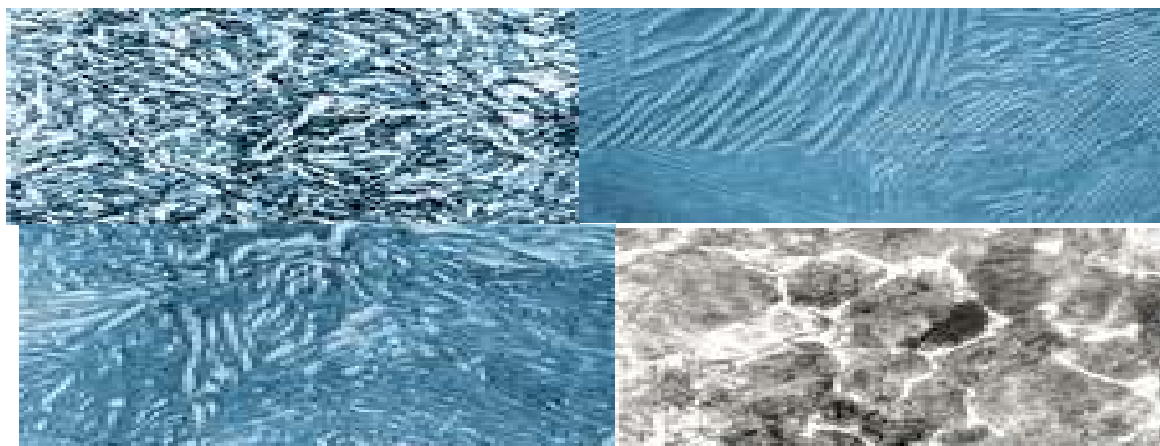


Рисунок 2. Микроструктуры стали, образованные различным механизмом($\gamma \rightarrow \alpha$) превращения

а) мартенсит -x500, б) троостит -x5000, в) сорбит -x5000, г) перлит с ферритной сеткой-x200

Заметим, что при анализе структурных превращений важно отметить, что разделение феррито-цементитных структур на перлит, сорбит или троостит носит условный характер и между этими структурами, как правило, нет четкой границы. Это объясняется тем, что на практике не удастся разграничить процессы образования чистого троостита, сорбита или перлита, так как скорость изменения температуры по сечению охлаждаемого изделия в процессе непрерывного охлаждения не остается постоянной, как выше отмечалось, она переменна и меняется по определенному закону, зависящему от теплофизических свойств стали[5].

Микроструктуры, приведенные на рисунке 2, показывает наложение мартенситного превращения на перлитное. Так, при скорости охлаждения V_2 в температурном интервале $\sim 550-460$ °С часть аустенита диффузионным механизмом превращается в троостит, оставшаяся часть ниже точки M_n (~ 260 °С) бездиффузионно переходит в мартенсит. Поэтому далеко не всегда удастся наметить температурные границы, в которых превращение протекает только по одному какому-нибудь механизму (перлитно-диффузионному, промежуточному или мартенситно-бездиффузионному) и четко разграничить структурные зоны образования троостита, сорбита или перлита. В действительности процессы превращения переохлажденного аустенита могут накладываться один на другой по температуре и времени своего развития, что приводит к формированию смешанно-слоистых структур различной морфологии.

Выводы

1. Показано, что при скоростном нагреве и охлаждении, имеющем место при поверхностной плазменной закалке, в упрочненной зоне (~ 3 мм) колесной

стали, образуется градиентно-смешанная структура, формирование которой определяется различным механизмом фазового ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращения в сечении зоны термического воздействия.

2. В поверхностной зоне трансформация переохлажденного аустенита (γ -фазы) происходит по бездиффузионному мартенситному механизму, в переходной зоне реализуется промежуточный механизм с преобладанием превращения аустенита в смешанные конфигурации троосто-мартенсита, в основной зоне превращение переохлажденного аустенита проходит по диффузионному механизму с образованием типичной феррито-перлитной структуры, дисперсность которой на 2 балла выше, чем в горячекатаном положении.

3. Формирование в поверхностном слое плазменно-упрочненной колесной стали градиентно-слоистой структуры дает возможность исключить образование резкой грани перехода от структур мартенсита к троосто-мартенситным и смешанным пластинчатым структурам. Это считается одним из основных факторов, повышающих контактно-усталостную прочность колесной стали и способствующих ее трещиностойкости.

Список литературы

- [1] Богданов В.М., Захаров С.М. Современные проблемы системы колесо-рельс. Железные дороги мира, 2014 – №1, с.57- 62
- [2] Балановский А.Е. Основные вопросы плазменного поверхностного упрочнения металлов. Упрочняющие технологии и покрытия. 2016, № 2, с.20-30
- [3] Канаев А.Т., Богомолов А.В. Структурообразование в плазменно-упрочненных металлических материалах. Астана, 2014, ТОО «Политон» 2015. – 185 с.
- [4] Канаев А.Т. Упрочняющая термическая обработка железнодорожных колес. - Астана: Изд-во «Мастер-ПО», 2016. –237 с.
- [5] Быков Е.Г., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структурно-фазовых состояний при эксплуатации прокатных валков. Известия вузов, серия Черная металлургия, 2010, № 12, с.35-37

УДК 669.18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ УНРС ПРИ ПОДАЧЕ АРГОНА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ БАЛКУ

*Роготовский А. Н.¹, Шипельников А. А.¹, Скаков С. В.¹, Бобылева Н. А.¹,
Тюленев Е. Н.², Кононыхин Г. Н.², Глебов В. П.²*

¹*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*

²*ПАО «НЛМК», Липецк, Россия*

SIMULATION OF HYDRODYNAMICS OF STEEL IN THE INTERMEDIATE LADLE CONTINUOUS CASTER, WITH THE ARGON FLOW THROUGH THE POROUS BEAM

*Rogotovskiy Alexander¹, Shipelnikov Alexey¹, Skakov Sergey¹, Bobyleva Natalia¹,
Tyulenev Evgeny², Kononikhin Grigory², Glebov Vladimir²*

¹*Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

²*PJSC «NLMK», Lipetsk, Russia*

Аннотация: Представлены результаты компьютерного моделирования течения жидкого металла в рабочем пространстве 50-ти тонного промежуточного ковша слябовой УНРС. Показано влияние продувки аргоном через пористую балку на гидродинамику ванны.

Ключевые слова: моделирование, гидродинамика, промежуточный ковш, расплав, аргон, балка.

Abstract: The results of computer simulation of the flow of liquid metal in the working space of a 50-ton intermediate bucket of a slab CCM are presented. The effect of argon blowing through a porous beam on the hydrodynamics of the bath is shown.

Key words: modeling, hydrodynamics, intermediate bucket, melt, argon, beam.

Введение

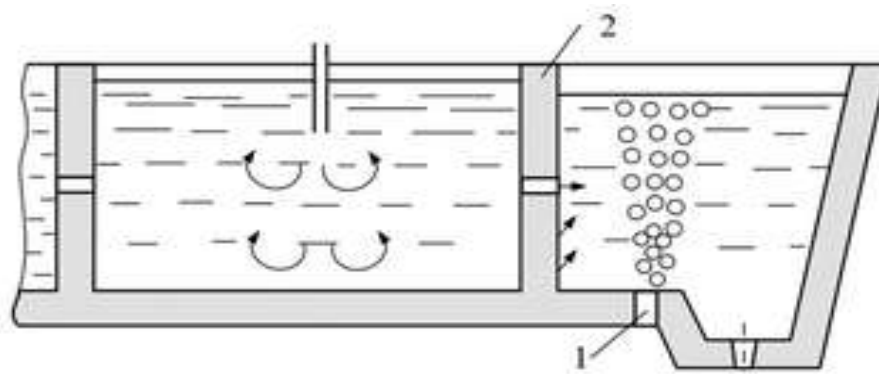
На сегодняшний день одним из наиболее широко используемых в металлургической практике методов удаления неметаллических включений и перемешивания жидкой стали из является продувка аргоном в ковше. Например, при необходимости производства стали с высокими требованиями по чистоте от неметаллических включений в днище промежуточного ковша УНРС устанавливаются специальные пористые блоки, которые обеспечивают вдувание в расплав инертного аргона с заданным объемных расходом. Эффект удаления неметаллических включений достигается созданием за вертикальной перегородкой в разливочной камере промежуточного ковша эффекта сплошной «аргоновой завесы» (рисунок 1) из газа, подаваемого вертикально через пористый

блок. При расширении двухфазной струи в затопленном пространстве, создаваемом этим блоком, образуется поглощающая дисперсные частицы газожидкостная эмульсия, переносящая их вертикально вверх.

По данным различных исследователей [1, 2], продувка инертным газом в промежуточном ковше позволяет сократить количество неметаллических включений размером более 50 мкм на 70 %, а включений размером 25-50 мкм на 40 %. Между тем эффект рафинирования достигается преимущественно при продувке жидкой ванны в пузырьковом режиме. При этом увеличение расхода более определенных (критических) значений приводит к снижению эффекта рафинирования вследствие турбулизации перемешивания металла и шлака в области выхода пузырьков аргона [3].

Развитие этой технологии в последнее время фокусировалось на достижении двух целей: обеспечение хорошего перемешивания, способствующего увеличению площади поверхности раздела фаз «газ–жидкость–включения» и направленной транспортировки включений к шлаковому покрову. Непосредственно механизм флотации неметаллических включений пузырями аргона из жидкой стали можно обобщенно свести к следующим процессам:

- 1) подход пузыря к включению;
- 2) формирование тонкой металлической пленки между включением и пузырем;
- 3) скольжение включения по поверхности пузыря; прорыв пленки и образование линии контакта трех фаз (пузырь–включение–пленка);
- 4) флотация агрегата включение–пузырь [4].



1 – продувочная фурма; 2 – фильтрационная перегородка

Рисунок 1. Схема универсальной фильтрационной системы удаления включений в промежуточных ковшах УНРС

Важное значение в механизме удаления включений играет направление и скорость сформированных модификаторами потока (металлоприемники, перегородки, балки) потоков расплава, которые должны помогать действующей

подъёмной силе выталкивать твёрдо-жидкие образования на границу раздела «металл-шлак». Проанализировать гидродинамику ванны при различных условиях применения модификаторов сегодня становится возможным с помощью специализированных пакетов компьютерных программ.

1. Модели и методы

Компьютерное моделирование гидродинамики ванны промежуточного ковша слябовой МНЛЗ проводилось в лаборатории компьютерного моделирования металлургических процессов кафедры металлургических технологий МИ ЛГТУ, оснащенной лицензионным программным обеспечением. Разработка трехмерной модели промежуточного ковша и находящихся в его объеме модификаторов потока производилась в САД-системе «Компас 3D V14». В качестве аппаратного обеспечения моделирования использовалась инженерная станция на базе «IntelCore i7», 3600 ГЦ, 64 Гб, HDD 1 Тб.

На основе разработанной трехмерной геометрической модели была построена гексагональная структурированная расчетная сетка, состоящая из более чем 600 000 элементов (рисунок 2).

Моделирование проводилось с расходом аргона от 10 до 20 л/мин при уровне заполнения промежуточного ковша 800 мм с высотой слоя шлака 30 мм. На входе в защитную трубу устанавливалось граничное условие «Inlet», на выходе из погружного стакана устанавливалось граничное условие «Pressure Outlet». Скорость на входе защитную трубу была задана в соответствии с массовым расходом металла для обеспечения скорости разливки 1,1 м/мин на двухручьева слябовой УНРС.

В модели приняты следующие допущения:

1. Жидкие фазы являются ньютоновскими, вязкими и несмешивающимися с постоянной плотностью и вязкостью, а поток в ковше – изотермическим.
2. Принималось, что в начальный момент времени сталь и шлак находятся в состоянии покоя без продувки аргоном.
3. Предполагается, что пузырьки аргона отражаются от стенок стального ковша и удаляются, попадая в воздушную фазу.
4. Процесс теплопередачи при моделировании не учитывался, предполагалось, что аргон сразу нагревается до температуры жидкой стали.

Объемные доли всех фаз, участвовавших в моделировании, были рассчитаны в каждом из контрольных объемов расчетной области. Это позволило провести оценку границ раздела фаз.

Для описания динамики жидких фаз стали и шлака была применена модель объема жидкости (VOF), а для моделирования поведения дискретной фазы пузырьков аргона использовалась дискретная фазовая модель (DPM) [5].

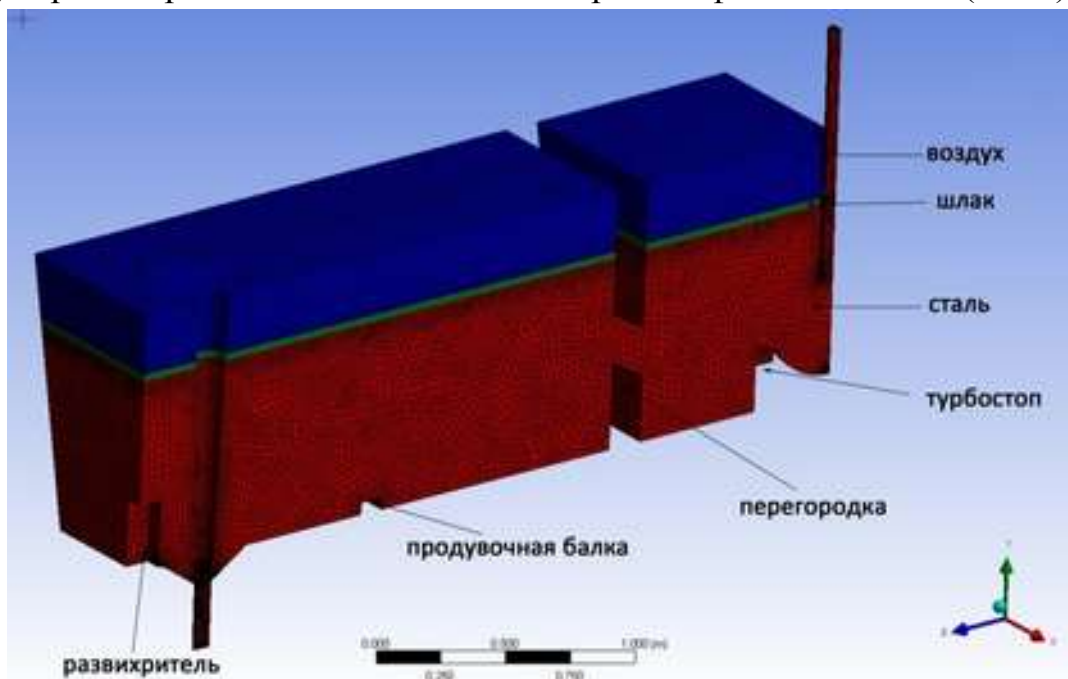


Рисунок 2. Сеточная модель промежуточного ковша

2. Обсуждение полученных результатов

Всего было выбрано пять вариантов проведения расчетов:

- 1) базовый вариант – промежуточный ковш с двумя симметричными полнопрофильными перегородками и цилиндрическим квадратным металлоприемником типа «турбостоп» (рисунок 6а);
- 2) промежуточный ковш базового варианта с донной поперечной продувочной балкой сечением 80x80 мм, расположенной вблизи перегородки;
- 3) промежуточный ковш базового варианта с донной поперечной продувочной балкой, расположенной по центру разливочной камеры;
- 4) промежуточный ковш базового варианта с донной балкой, расположенной вблизи сталевыпускного отверстия ковша. Расход аргона во 2-4 вариантах принимался одинаковым и равным 10 л/мин.

5) промежуточный ковш с донной продувочной балкой, расположенной по центру разливочной камеры, оборудованный перегородками, сферическим «турбостопом», развихрители, расход аргона 20 л/мин.

На рисунках 3-12 представлены: расчетная 3D-модель, поля распределения скорости потоков в различных сечениях ковша и распределение «застойных зон» по варианту конструкции промежуточного ковша с цилиндрическим турбостопом, перегородкой и подачей аргона с расходом 20 л/мин. Данный вариант полностью идентичен варианту конструкции промежуточного ковша со сферическим турбостопом, перегородкой и продувкой аргоном 20 л/мин с заменой типа турбостопа. Влияния аргона на перемешивание и усреднение скорости движения потоков расплава в разливочной камере промежуточного ковша ярко выражено, особенно в зоне расположения стопа, что можно заметить при сравнении полей распределения скоростей в сечении по сталевыпускному отверстию (рисунок 5).

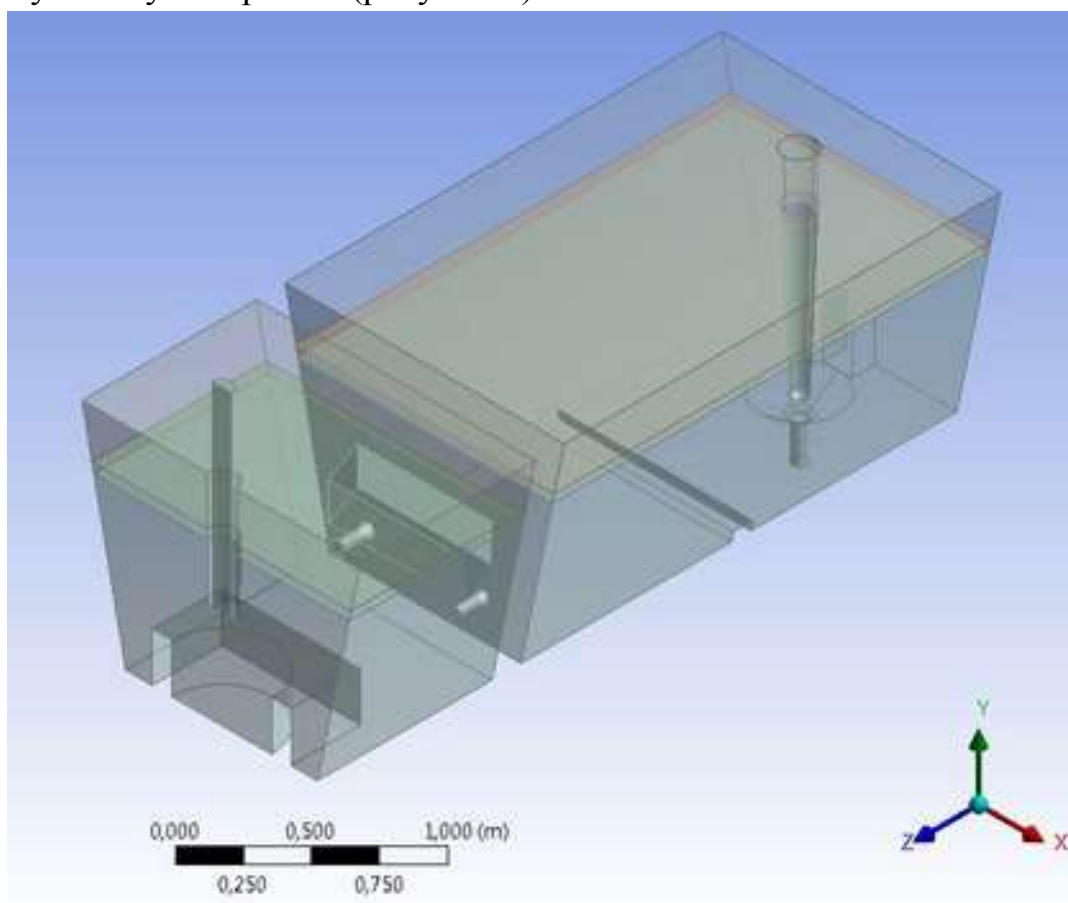


Рисунок 3. Трехмерная модель расчетной области

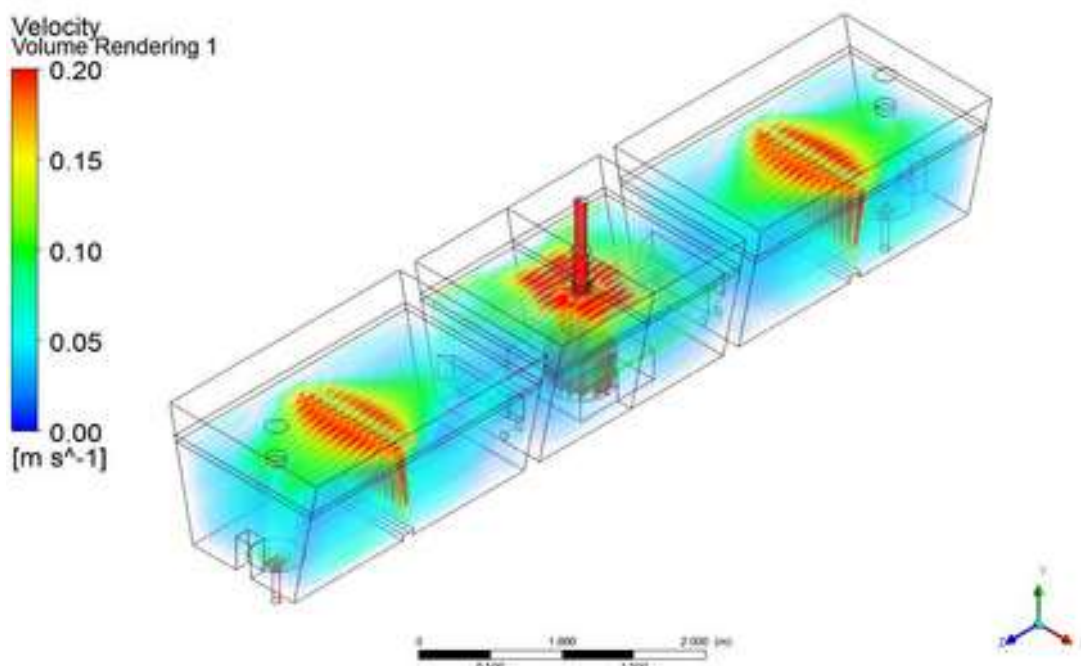


Рисунок 4. Поле скоростей в объеме промежуточного ковша

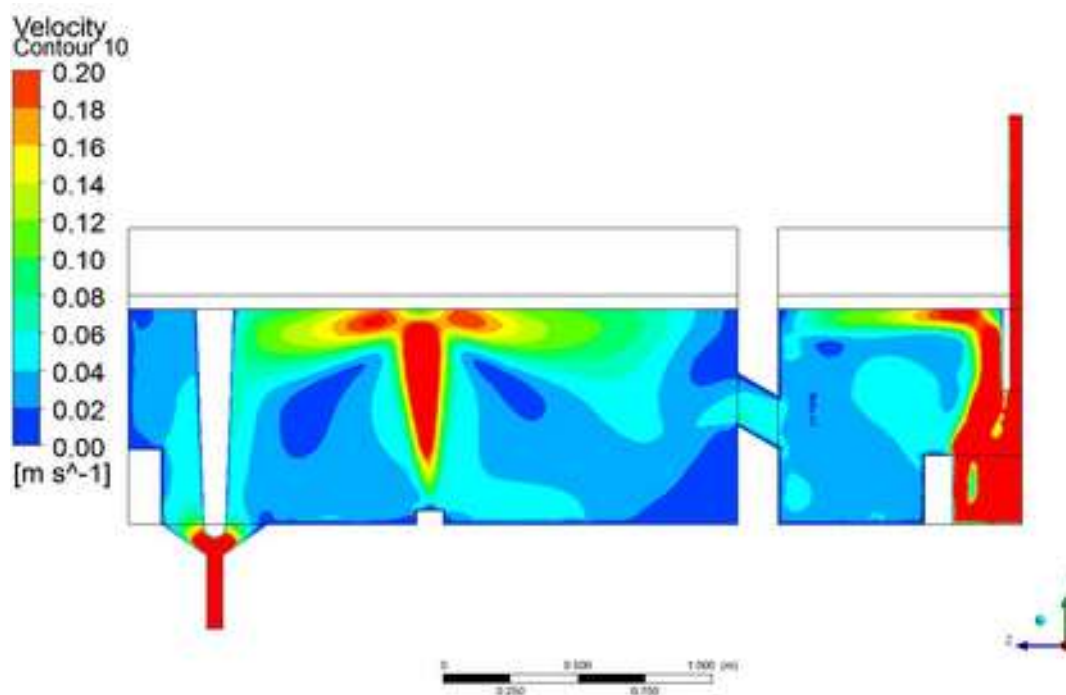


Рисунок 5. Поле скоростей – фронтальное сечение

Установлено, что применение аргона оказывает значительное влияние на изменение скорости и направление потоков расплава в разливочной камере. При таком расположении продувочных устройств большое количество пузырьков аргона в расплавленной стали не только ускоряет столкновение между включениями, но также увеличивают вероятность улавливания включения пузырьками,

что приводит к увеличению размера включения и ускорению их всплытия и удаления. С другой стороны, значительное расстояние от продувочной балки до сталевыпускного отверстия может увеличивать продолжительность удаления неметаллических включений из стали [6, 7].

При одновременном использовании перегородки и балки наблюдается картина равномерно-направленного распределения потоков стали практически по всему рабочему пространству ковша. Установлено образование «застойных зон» в донной части после перегородки, что является неустранимым. Средняя скорость потоков составляет от 0,04 до 0,010 м/с, что несколько выше чем в варианте со сферическим турбостопом, перегородкой и продувкой аргоном.

Количество «застойных зон» крайне мало: неизбежно образуется одна зона срезу после перегородки в придонной части разливочной камеры. Зон несколько меньше, чем в варианте со сферическим турбостопом. Наблюдается незначительное разрушение шлакового покрова в разливочной камере в зоне выхода потока газа.

Данный вариант организации рабочего пространства промковша с цилиндрическим металлоприемником, перегородкой и продувочной балкой можно считать рабочим вариантом для дальнейшего апробирования и внедрения, однако также громоздким в реализации. По количеству «застойных зон» этот вариант лучше, чем вариант со сферическим металлоприемником.

Список литературы

- [1] Zhong L., Li Y., Wang B. et al. // *Ironmaking and Steelmaking*. 2008. – Vol. 35. No. 6. – P. 436 – 440.
- [2] Chattopadhyay K., Hasan M., Isac M., Guthrie R.I.L. // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010. – Vol. 41. No. 1. – P. 225 – 233.
- [3] Satish Kumar D., Rajendra T., Ranjan M. // *Ironmaking and Steelmaking*. 2009. Vol. 36. No. 6. P. 470 – 475.
- [4] Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В. Исследование условий всплытия неметаллических включений при продувке аргоном жидкой ванны промежуточного ковша МНЛЗ. Сообщение 1 // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия* 2013. – № 11. – С. 8-13.
- [5] L. Teixeira Costa and R. Parreiras Tavares. Multiphase Mass Transfer in Iron and Steel Refining Processes / *Mass Transfer – Advancement in Process Modelling*. 2015. – pp. 149-167.
- [6] Шипельников А. А., Роговский А. Н., Бобылева Н. А., Скаков С.В., Тюленев Е.Н., Кононыхин Г.Н., Глебов В.П. Особенности гидродинамики расплава в процессе продувки аргоном в сталеразливочном ковше // *Вестник Липецкого государственного технического университета*. – 2020. № 2 (43). – С. 73-81.
- [7] Тюленев Е.Н., Глебов В.П., Кононыхин Г.Н., Роговский А.Н., Шипельников А.А., Бобылева Н.А., Скаков С.В. Исследование продувки стали аргоном в сталеразливочном ковше // *Металлург*. – 2020. № 3. – С. 58-63.

УДК 621.771.068

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОГО ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ НА СТАНЕ 2000 ПАО «НЛМК»

Горбунов К. С.¹, Бахаев К. В.¹

¹ Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

RESEARCH OF ASYMMETRIC ROLLING PROCESS AT NLMK MILL 2000

Kirill Gorbunov¹, Konstantin Bakhaev¹

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: Статья посвящена исследованию асимметричного процесса прокатки тонких полос. Описана технология прокатки на лабораторном стане. Представлены результаты лабораторных работ.

Ключевые слова: асимметричная прокатка, разные диаметры валков, изгиб полосы, улучшение плоскостности ленты, уменьшение давления прокатки.

Abstract: The article is devoted to the study of the asymmetric process of rolling thin strips. The technology of rolling on a laboratory mill is described. The results of laboratory work are presented.

Key words: asymmetric rolling, different roll diameters, strip bending, improved flatness of the belt, and reduced rolling pressure.

Введение

Повышение требований к качеству листового проката требует появление новых или усовершенствованию существующих технологий. Процессы горячей прокатки в промышленных условиях являются асимметричными. Например, рассмотрим процесс горячей прокатки на стане 2000 ПАО «НЛМК»:

- на слябе из-за неравномерного нагрева появляются глоссажные метки, что в последствии приводит к неравномерности обжатий, колебаниям усилия прокатки и неравномерному нагреву бочки рабочих валков;
- окалина на полосе способствует изменению коэффициента трения при контакте с валком;
- разные диаметры валков и разные профилировки валков способствуют неравномерности обжимной силы и появлению различных дефектов (волна, короб);
- разность окружной скорости валков может быть вызвана износом передаточных элементов клетки (двигателей, редукторов, шестерённых клеток, шпинделей).

Задача

Для устранения образования дефектов формы полосы и выполнения повышенных требований по допуску по толщине плоских изделий их производители вынуждены ввести системы, влияющие на стабилизацию и улучшение геометрических размеров этих изделий. Это достигается путем более тщательного подбора размеров подката, сведения к минимуму влияния изменения общего усилия прокатки на величину расстояния между валками, обеспечения неизменной геометрии проката в результате регулирования процесса. Стабилизация геометрии путем регулировки процесса заключается путем использования соответствующих систем, т.е.:

- 1 системы гидравлической установки валков;
- 2 системы гидроизгиба рабочих валков;
- 3 системы асимметричной прокатки.

При проведении модельных и экспериментальных исследований обнаружено, что улучшение качества геометрии горячекатаного листа можно получить путем использования в прокатных цехах технологии асимметричной прокатки, которая заключается в целевом изменении состояния напряжения и деформации в очаге деформации, в результате чего на поверхности контакта металла с валками возникают зоны опережения и отставания разной длины. В очаге деформации со стороны каждого валка возникают зоны касательных напряжений разного направления.

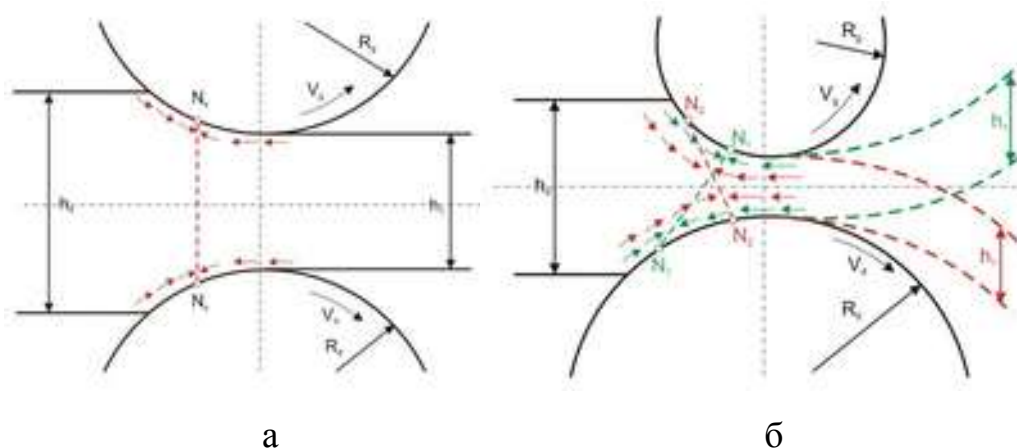


Рисунок 1. Схема симметричного и асимметричного процесса прокатки (а- симметричный процесс, б- асимметричный процесс прокатки).

Длина этих зон зависит от величины введенной асимметрии и в частном случае может занимать весь очаг деформации. Появление зон, в которых вектор силы трения на верхнем и нижнем валках имеют разное направление, а их действие можно приравнять к действию сил натяжения и противонапряжения,

является полезным для процесса прокатки, т.к. они влияют на снижение общей силы давления металла на валки и одновременно на уменьшение упругой деформации элементов прокатной клетки. Благодаря этому, появляется возможность получения проката с меньшими отклонениями геометрии по длине и по ширине.

Однако следует отметить, что кроме положительных сторон в асимметричном процессе прокатки могут появиться и отрицательные стороны, которые могут отразиться на перегрузке приводов стана и проскальзывании металла в очаге деформации. Поэтому асимметричную прокатку нужно осуществлять при таких условиях, при которых не возникнут дефекты, либо их вероятность будет минимальной.

Полученные результаты

В процессе учебной практики в Ченстоховском политехническом университете с помощью математического моделирования в программе Transvalor Forge NXT и на лабораторном стане 300 исследовали ассиметричный процесс прокатки.

В течение нескольких лет на кафедре обработки металлов давлением и инженерной безопасности ченстоховского технологического университета ведутся исследования по улучшению процесса прокатки плоских изделий. Проводится анализ влияния многих параметров (марка стали, температура полосы, величина обжатия, значение сопротивления деформации для отдельных марок стали, скорости вращения валков и диаметры валков) на геометрические характеристики металлопроката и его прочностные и пластические свойства.

Для численного моделирования процесса прокатки были приняты рабочие валки диаметром 300 мм и постоянной скоростью вращения нижнего рабочего валка, равной $n = 80$ об/мин. Диапазон используемых относительных обжатий составлял $\epsilon = 0,15 \div 0,30$.

Процесс асимметричной прокатки был представлен следящим образом:

- изменение окружной скорости валков (кинетическая асимметрия).

Диапазон изменения коэффициента скорости вращения валков $A_v = V_v / V_n$ составил $1,00 \div 1,15$. $h = 2$ мм, температура прокатки $T = 900$ °С.

Таким образом, в процессе учебной практики проведенные исследования показали, что симметричного процесса прокатки не может быть в промышленных условиях по многим факторам, например, разная температура по всей длине полосы, поверхности валков, различные коэффициенты трения,

окружные скорости валков, неравномерность обжатия в клети, качество отделки поверхности и профиль валков, а также другие немаловажные факторы.

При испытаниях на лабораторном стане 300 и математическом моделировании не была нарушена геометрия образцов, при этом различие усилий прокатки между программой Transvalor Forge NXT и лабораторными исследованиями не превышало 12%. Удалось получить изгиб переднего конца в сторону верхнего валка (скорость на верхнем валке была меньше на 5-15%, чем на нижнем). При искусственном введении асимметрии полное давление было уменьшено до 6%. Результаты исследования приведены в таблице 1, а на рисунках 2-3 показан изгиб полосы и уменьшение плоскостности полосы.

Таблица 1. Результаты исследования

Толщина на входе (h , мм)	Толщина на выходе (h_1 , мм)	Окр. скорость верхнего/нижнего валка (V_v/V_n , об/мин)	Обжатие (ϵ , %)	Максимальное давление (P_{max} , КН)	Изгиб полосы
8	6.4	800/800	20	932	вверх
		680/800		902	вверх
2	1,4	8000/800	20	906	вверх
		680/800		836	вверх

Обсуждение полученных результатов

Таким образом, установлено, что использование процесса асимметричной прокатки привело к уменьшению среднего удельного давления на 6 %, что в свою очередь привело к уменьшению упругого изгиба валков. В результате чего появляется возможность увеличения производительности за счет уменьшения износа рабочих валков, а также снижение неплоскостности при прокатке тонких полос.



Рисунок 2. Изменение плоскостности $h=2$ мм.



Рисунок 3. Изменение плоскостности $h=8$ мм.

Список литературы

- [1] *Кавалек А.А., Дыя Х.И.* Процесс асимметричной прокатки толстого листа. – Ченстохова, Польша. – С. 345-348.
- [2] *Салганик В.М., Песин А.М.* Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теорий, технологии и новые решения. – Москва: МИСиС. 1997.
- [3] *Варшавский Е.А., Храпов М.А., Барусов В.М.* Система автоматического управления изгибом переднего конца раската в черновой клетки с индивидуальным приводом. Международная конференция прокатчиков. – Магнитогорск. 2017. – С. 57-62.
- [4] *Бельский С.М.* Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

УДК 621.777

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК В РАВНОКАНАЛЬНОЙ СТУПЕНЧАТОЙ МАТРИЦЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Найзабеков А. Б.¹, Лежнев С. Н.¹, Панин Е. А.², Салько О. Ю.¹, Куис Д. В.³

¹Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан;

²Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан;

³Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Белоруссия

ANALYSIS OF THE PRESSING PROCESS OF BLANKS IN AN EQUAL CHANNEL STEP MATRIX OF A NEW DESIGN

Abdrakhman Naizabekov¹, Sergey Lezhnev¹, Evgeniy Panin², Oxana Salko¹, Dmitry Kuis³

¹Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan;

²Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan;

³Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

Аннотация: Уже не одно десятилетие интерес вызывает использование интенсивной пластической деформации для получения ультрамелкозернистых материалов. Данная работа посвящена исследованию процесса деформирования стальных заготовок в равноканальной ступенчатой матрице, в которой средний канал расположен под углом к входному и выходному каналам, не в двух, а в трех плоскостях. Исследования показали, что осуществление процесса прессования заготовок в матрице данной конструкции, позволяет добиться более равномерного распределению накопленной деформации по всему сечению заготовки, и соответственно позволяет получать металл с ультрамелкозернистой структурой при меньшем количестве циклов и более высоком коэффициенте использования металла.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, равноканальная ступенчатая матрица, ультрамелкозернистая структура.

Abstract: For more than a decade, the use of severe plastic deformation to produce ultra-fine-grained materials has been of interest. This work is devoted to the study of the deformation process of steel billets in an equal-channel step matrix, where the middle channel is located at an angle to the input and output channels, not in two, but in three planes. Studies have shown that the implementation of the process of pressing blanks in a matrix of this design, allows for a more uniform distribution of accumulated strain over the entire section of the workpiece, and therefore allows you to get a metal with an ultra-fine-grained structure with fewer cycles and a higher coefficient of metal use.

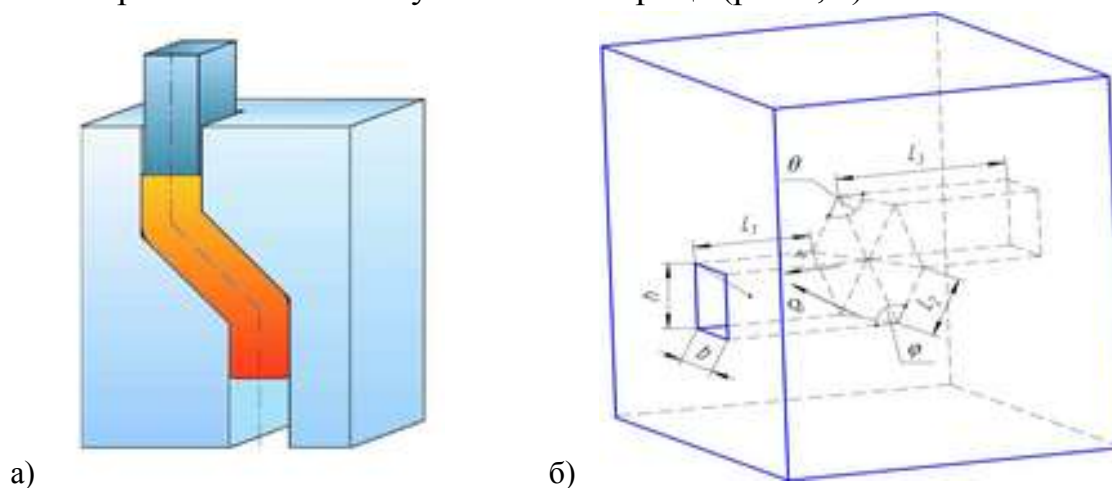
Key words: severe plastic deformation, equal-channel step matrix, ultra-fine-grained structure.

Введение

Уже не одно десятилетие большой интерес вызывает использование интенсивной пластической деформации для получения, как черных, так и

цветных металлов и сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Ведь УМЗ материалы чаще всего по своим свойствам значительно превосходят своих крупнозернистых «собратьев», имеющих аналогичный химический состав. При этом материалы с ультрамелкозернистой структурой очень часто проявляют и весьма необычные свойства [1], Так, например, может меняться модуль упругости и модуль сдвига, удельная теплоемкость, температуры Кюри и Дебая, и некоторые другие свойства [1- 4].

Среди большого множества существующих в настоящее время способов реализации интенсивной пластической деформации в объемных заготовках, наибольшее распространение получил способ равноканального углового (РКУ) прессования [5-6], который позволяет получать однородную УМЗ структуру в различных металлах и сплавах практически без изменения размеров поперечного сечения исходных заготовок. Для реализации РКУ-прессования на данный момент, разработано большое количество матриц различных конструкций [7-11], деформирование в которых имеет, как свои преимущества, так и недостатки. Одной из простых и более универсальных таких матриц для РКУ-прессования, является матрица, которая имеет три канала одинакового поперечного сечения, два из которых (входной и выходной) параллельны друг другу, а средний канал расположен под углом к входному и выходному каналам [12], так называемая равноканальная ступенчатая матрица (рис.1, а).



а – известная конструкция; б – предлагаемая конструкция

Рисунок 1. Равноканальная ступенчатая матрица для прессования

При прессовании заготовок в данной равноканальной ступенчатой матрице возможно получение металла с ультрамелкозернистой структурой при меньшем количестве циклов по сравнению с прессованием даже в обычной угловой матрице с углом стыка каналов 90° [1] и при меньших энергозатрат, за

счет реализации знакопеременной и сдвиговой деформации на двух стыках каналов матрицы [13]. Но все-таки недостатком данного устройства является невысокая степень упрочнения за один цикл деформирования. И еще одним существенным недостатком данного устройства является невозможность получения на данном устройстве заготовок с прямоугольными торцами. При деформировании характер течения является таким, что заготовка имеет заостренные под углом около 30° торцы. Для получения прямоугольных торцов необходимо механической обработкой удалять значительную часть металла, что существенно снижает коэффициент использования металла (КИМ). При многоцикловогой обработке КИМ снижается еще больше, т.к. требуется операция по подравниванию торцов перед каждым циклом деформирования. В противном случае, из-за недостаточной устойчивости заостренной части заготовки при ее деформировании возникают дефекты типа зажим, которые также необходимо удалять механической обработкой.

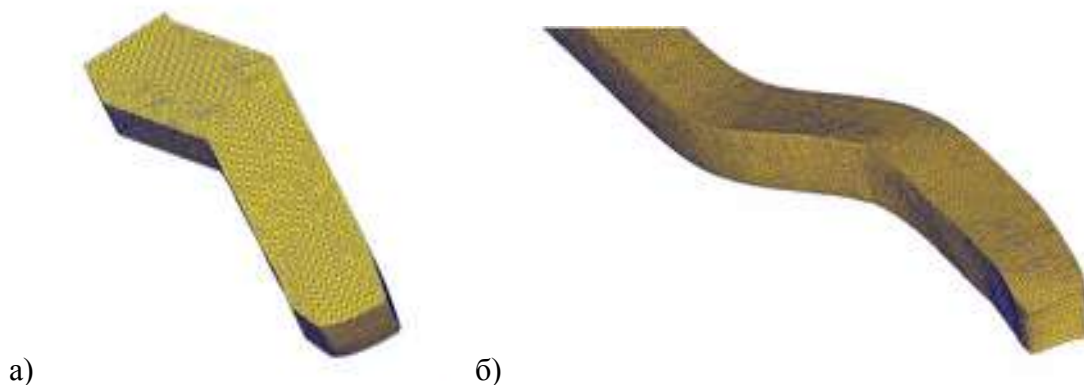
2. Разработка и исследование

Для повышения производительности процесса прессования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице, а именно, для повышения эффективности упрочнения при интенсивной пластической деформации, увеличения коэффициента использования металла и снижения трудоемкости, нами была предложена новая конструкция равноканальной ступенчатой матрицы [14]. Предлагаемая матрица для прессования отличается от ранее известной равноканальной ступенчатой матрицы [12] тем, что в ней средний канал расположен под углом к входному и выходному каналам, не в двух, а в трех плоскостях (рис. 1, б).

Наличие в матрице среднего канала, расположенного под углом к входному и выходному каналам в трех плоскостях, позволяет развивать значительные сдвиговые деформации во всем объеме обрабатываемой заготовки при незначительном изменении ее начальных размеров. При этом реализуется два акта интенсивной пластической деформации: при первой интенсивной пластической деформации происходит опережение слоев боковой и нижней граней заготовки, а при второй интенсивной пластической деформации - опережение слоев второй боковой и верхней граней. При этом искажение торцевых участков оказывается минимальным.

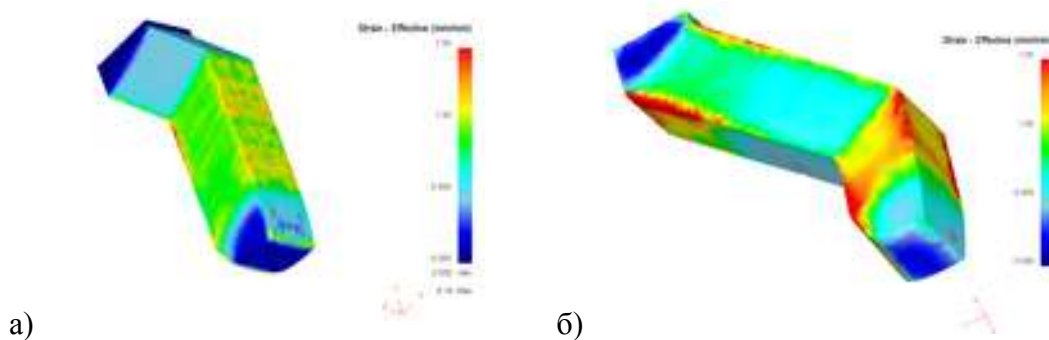
Для проверки эффективности деформирования заготовок в предлагаемой конструкции равноканальной ступенчатой матрицы по сравнению с ранее известной конструкцией было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе DEFORM-3D процесса прессования заготовок в предлагаемой и ранее известной равноканальной ступенчатой матрице. В обоих случаях моделировали деформирование заготовки размерами 15×20×150 мм. В качестве материала произвольно из базы данных DEFORM-3D была выбрана сталь 15, нагретая до температуры 1100 °С. Угол стыка каналов в продольном направлении в обеих матрицах принимался равный 135 градусов, как наиболее оптимальный при равноканальном ступенчатом прессовании [13]. Угол стыка каналов в поперечном направлении в ранее известной матрице был равен нулю, а в предлагаемой матрице он был равен 25 градусов.

Чтобы показать эффективность реализации прессования в предлагаемой конструкции равноканальной ступенчатой матрицы, было исследовано формоизменение переднего конца заготовок для определения степени заострения торцевых участков (рис.2) и проведено сравнение распределения накопленной деформации в заготовках, продеформированных в предлагаемой и ранее известной конструкции равноканальной ступенчатой матрицы (рис. 3).



а – известная конструкция; б – предлагаемая конструкция

Рисунок 2. Формоизменение переднего конца заготовок при прессовании в равноканальной ступенчатой матрице



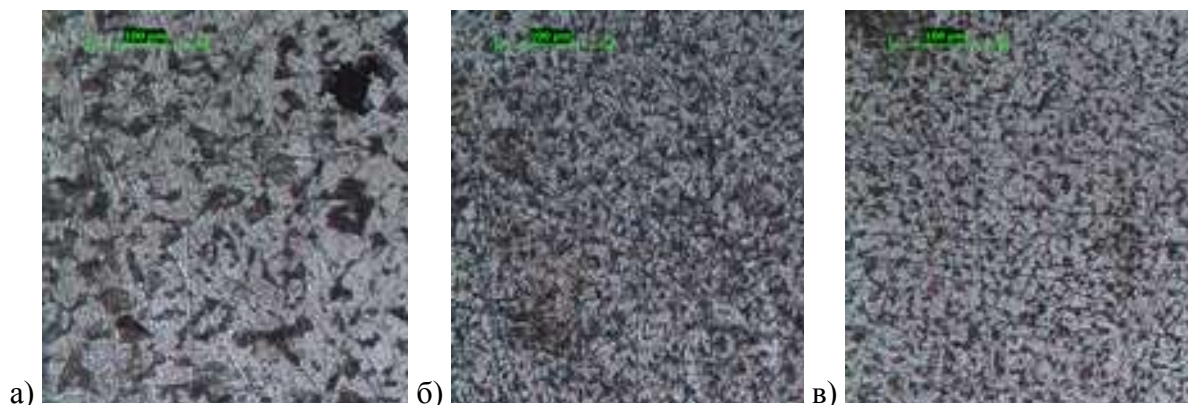
а – известная конструкция; б – предлагаемая конструкция
 Рисунок 3. Распределение накопленной деформации при прессовании в равноканальной ступенчатой матрице

Для подтверждения возможности добиться на практике более интенсивного измельчения зерна при использовании равноканальной ступенчатой матрицы новой конструкции был проведен физический эксперимент. В ходе лабораторного эксперимента образцы размерами $15 \times 20 \times 150$ мм из стали 40X подвергали циклическому деформированию в предлагаемой и ранее известной равноканальной ступенчатой матрице с углами стыка принятыми при моделировании. Деформирование осуществляли при температуре 1000°C . Количество циклов деформирования составило 6.

Исследования микроструктуры были проведены на оптическом микроскопе Leica DM IRM HC. Результаты исследования микроструктуры приведены на рисунке 4.

3. Обсуждение полученных результатов

Из результатов металлографических исследований видно, что исходная структура в нормализованном состоянии поставки имеет типичную для данного вида сталей крупнозернистую феррито-перлитную структуру с размером зерен 50-60 мкм. Микроструктура стали 40X, подвергнутой циклическому деформированию в равноканальной ступенчатой матрице ранее известной конструкции после 6 проходов имеет преимущественно равноосный характер со средним размером зерен около 15 мкм. Микроструктура этой же стали, подвергнутой 6-ти циклам деформирования в предлагаемой равноканальной ступенчатой матрице, также имеет преимущественно равноосный характер, но уже с более мелким зерном, имеющим среднее значение 8-10 мкм.



а – исходная; б – после 6 циклов прессования в матрице известной конструкции; в – после 6 циклов прессования в матрице предлагаемой конструкции

Рисунок 4. Макроструктура стали 40Х

Вывод: Проведенные на основе компьютерного моделирования исследования показали, что реализация схемы трехкратного изменения направления течения металла, при осуществлении процесса прессования в равноканальной ступенчатой матрице предлагаемой конструкции, позволяет добиться более равномерного распределению накопленной деформации по всему сечению заготовки и получить более высокий коэффициент КИМ по сравнению с прессованием в равноканальной ступенчатой матрице ранее известной конструкции. Экспериментальные исследования в свою очередь доказали, что использование для прессования заготовок предлагаемой конструкции матрицы позволяет добиться более существенного измельчения исходного размера зерна металл (за одинаковое количество циклов) по сравнению с использованием для прессования ранее известной конструкции данной матрицы.

Список литературы

- [1] Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: ЛОГОС, 2000. - 272 с.
- [2] Валиев Р.З., Исламгалиев Р.К. Структура и механическое поведение ультрамелкозернистых металлов и сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение. 1998. - Т.85. - С. 161-177.
- [3] Салищев Г.А., Галеев Р.М., Малышева С.П., Михайлов С.Б., Мышляев М.М. Изменение модуля упругости при отжиге субмикроструктурного титана // Физика металлов и металловедение. 1998. -Т.85. - С. 178-181.
- [4] Морохов И.Д., Трусков А.И., Лаповок В.И. Физические явления в ультрадисперсных средах. М.: Наука, 1984. - 320 с.
- [5] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, Prog. Mater. Sci., 2006, 51, p 881–981.

- [6] Xiaohua Zhang, Xiaojing Liu, Jingze Wang, Yuansheng Cheng, Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing, Mater. Sci. Eng., A, 2016, 676, p 65-72.
- [7] Патент РФ №2356679. Устройство для равноканального углового прессования. Половников В.М., Кандаров В.В., Кандаров И.В., Латыш В.В., 2009.
- [8] Патент РФ №2333062. Устройство для обработки металлов давлением угловым прессованием. Кучкин В.В., Осокин Е.П., Рыбин В.В., Рыбин Ю.И., Щербель Р.Д., 2008.
- [9] Патент РФ №2492950. Устройство для много-равноканального углового прессования заготовки. Иванов А.М., Александрова Е.С., 2013.
- [10] Патент РФ 2477662. Устройство для многомаршрутного равноканального углового прессования заготовки. Иванов А.М., 2013.
- [11] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon. Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains // Materials Science and Engineering A, Volume 281, Issues 1-2, 15 April 2000, p. 82-87.
- [12] Патент РФ № 2181314. Устройство для обработки металлов давлением. Рааб Г.И., Кулясов Г.В., Полозовский В.А., Валиев Р.З., 2002.
- [13] Найзабеков А.Б., Ашкеев Ж.А., Лежнев С.Н., Толеуова А.Р. Исследование процесса деформирования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице.// Изв. вузов. Черная металлургия, Москва, 2005 №2. - С. 16-18.
- [14] Патент Республики Казахстан №25864. Устройство для прессования металла. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., 2013.

УДК 621.777.073

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ В РАВНОКАНАЛЬНОЙ СТУПЕНЧАТОЙ МАТРИЦЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Панин Е. А.¹, Лежнев С.Н.², Пищиков В. Е.², Тымченко А. А.¹

¹ *Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан*

² *Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан*

STUDY OF THE DEFORMATION PROCESS IN AN EQUAL-CHANNEL STEP MATRIX OF A NEW DESIGN BASED ON COMPUTER SIMULATION

Evgeniy Panin¹, Sergey Lezhnev², Vladislav Pishchikov², Alexandra Tymchenko¹

¹ *Karaganda State Industrial university, Temirtau, Kazakhstan*

² *Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan*

Аннотация: В работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса деформирования в равноканальной ступенчатой матрице, отличительной особенностью которой является расположение промежуточного канала под двумя углами к входному и выходному каналам. Рассмотрены модели со значениями угла наклона в продольном направлении (угол α) 135 градусов и углами наклона в поперечном направлении (угол β) 15, 25 и 35 градусов. Анализ параметров напряженно - деформированного состояния показал, что наиболее оптимальная схема деформации возникает при повышении угла β , т.е. в матрице с углом $\beta=35^\circ$.

Ключевые слова: моделирование, равноканальная ступенчатая матрица, напряжение, деформация.

Abstract: The paper presents the results of computer simulation of the deformation process in an equal-channel step matrix, the distinctive feature of which is the location of the intermediate channel at two angles to the input and output channels. Models with values of the angle of inclination in the longitudinal direction (angle α) of 135 degrees and angles of inclination in the transverse direction (angle β) of 15, 25 and 35 degrees are considered. Analysis of the parameters of the stress-strain state showed that the most optimal deformation scheme occurs when the angle β increases, i.e. in a matrix with an angle $\beta=35^\circ$.

Key words: simulation, equal-channel step matrix, stress, strain.

Введение

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из наиболее известных способов интенсивной пластической деформации, позволяющим получать объемные заготовки с ультрамелкозернистой структурой. Данный способ известен уже более 40 лет [1] и до сих пор активно исследуется [2-5]. Несмотря на то, что к настоящему времени уже разработан целый ряд новых

устройств и технологий [6-9], в основе которых лежит принцип РКУП, подавляющее большинство этих идей не нашло широкого применения в промышленности. Причиной этому являются недостатки РКУП, присущие большинству разрабатываемых технологий: сравнительно небольшие размеры получаемых заготовок, дискретность процесса деформации и необходимость осуществления большого числа циклов деформирования для формирования УМЗ-структуры. И если с первыми двумя недостатками успешно справляются путем разработки так называемых «совмещенных» процессов [10-13], где действует принцип непрерывной деформации длинномерных образцов, то последний недостаток достаточно сложно преодолеть. Суть его заключается в том, что для получения УМЗ-структуры в деформируемом материале необходимо обеспечить реализацию высоких степеней деформации для измельчения зерна. Исходя из этого, для снижения требуемого числа циклов деформирования необходимо обеспечить рост уровня накопленной деформации за один проход. Для этого необходимо совершенствовать конструкцию деформирующего инструмента. При этом эффективным способом повышения проработки металла при РКУП является кантовка образца. Так, в работе [14] всесторонне исследован данный фактор: выявлено, что наиболее оптимальный метод кантовки – это маршрут ВС (кантовка на 90° вдоль продольной оси образца, т.е. смена горизонтального направления деформации в поперечном сечении на вертикальное).

Целью данной работы является исследование процесса деформирования в равноканальной ступенчатой матрице новой конструкции, отличительной особенностью которой является расположение промежуточного канала под двумя углами к входному и выходному каналам, т.е. деформация происходит не в горизонтальном или вертикальном направлениях, а в обоих одновременно (диагональное направление), в частности, исследование влияния величины угла наклона в поперечном направлении β на напряженно-деформированное состояние заготовки. По сути, деформирование в матрице такой конструкции представляет собой обычное РКУ- пресование с частичной кантовкой образца. Схематично диагональное движение металла в данной матрице показано на рисунке 1а.

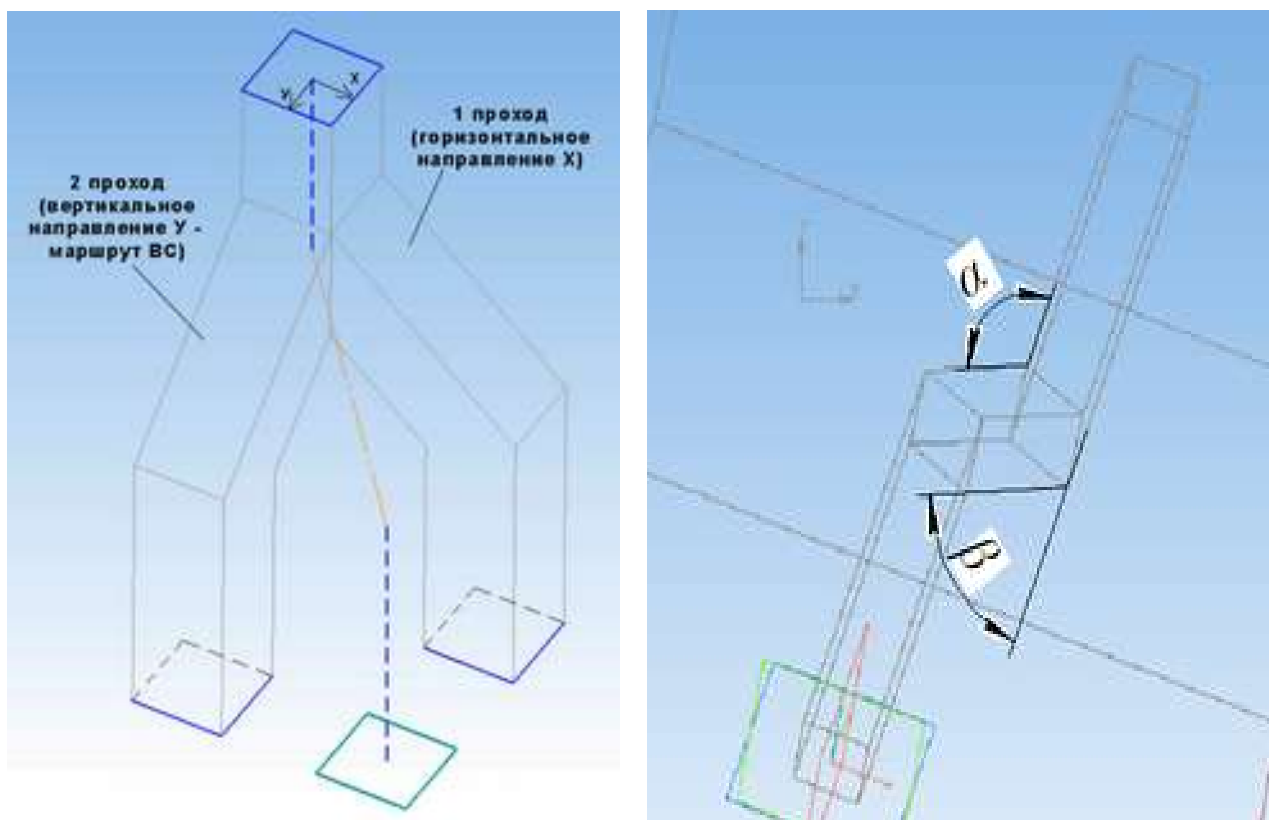


Рисунок 1 – Схема конструкции каналов в матрице с течением в 3 плоскостях

1. Модели для исследования

Для проведения моделирования равноканального ступенчатого прессования с использованием матриц с течением в 3 плоскостях в программе «КОМПАС» были построены 4 модели матриц. Первая матрица имела «классическую» равноканальную ступенчатую конструкцию, в которой направление течения металла менялось лишь в 2 плоскостях. Остальные 3 матрицы имели схожую с первой конструкцию, с той лишь разницей, что в них направление течения металла осуществляется не в двух, а в трех плоскостях. Угол стыка каналов в продольном направлении (угол α) во всех матрицах принимался равный 135 градусов, как наиболее оптимальный при равноканальном ступенчатом прессовании [15]. Угол стыка каналов в поперечном направлении (угол β) в первой матрице был равен нулю, в остальных трех матрицах он был равен соответственно 15, 25 и 35 градусов (рисунок 1б). Исходная заготовка имела размеры 20 x 20 x 100 мм. На данную модель была нанесена сетка конечных элементов, равномерно распределенных по всему объему заготовки. Средний размер конечного элемента составил 1,3 мм, количество узлов – 30699, количество элементов – 96024. В качестве материала заготовки была выбрана сталь 35,

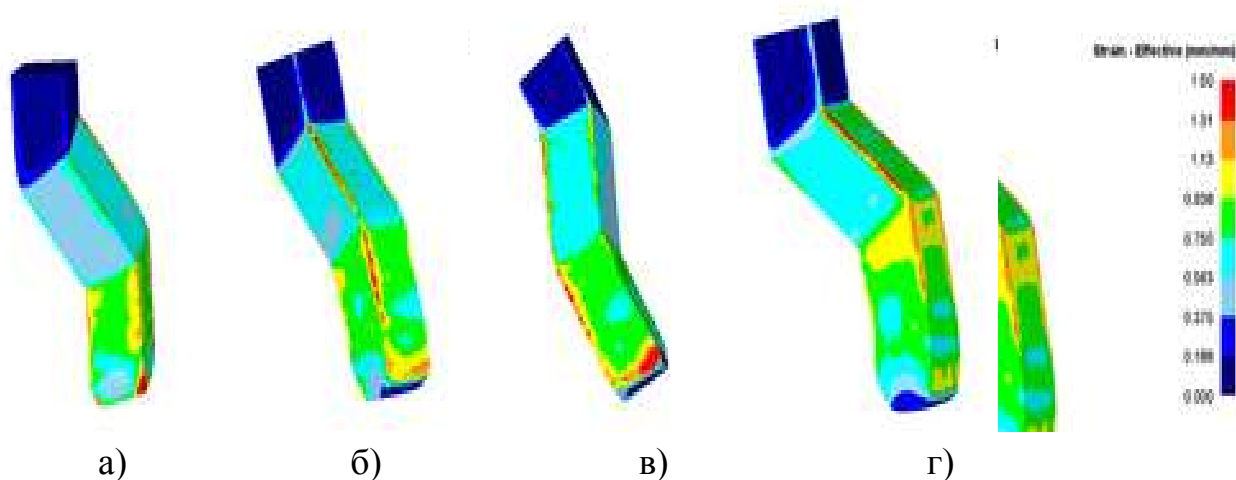
нагретая до температуры 1100°C. Реологические свойства материала были взяты из базы данных Deform. Был выбран неизотермический тип расчета, т.е. помимо отдачи тепла инструменту, заготовка еще отдавала тепло в окружающую среду, температура которой была принята 20°C. При ранее проведенном исследовании равноканального ступенчатого прессования было установлено, что от значения коэффициента трения в матрице будет зависеть требуемое усилие, необходимое для стабильного протекания процесса деформирования. Для минимизации его значения было взято значение коэффициента трения равное 0,1.

Для изучения напряженно-деформированного состояния были рассмотрены следующие параметры: эквивалентная деформация (интенсивность деформаций) и эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений).

2. Полученные результаты

2.1. Изучение эквивалентной деформации

Накопление эквивалентной деформации происходит при движении заготовки во втором и в третьем каналах матрицы. В матрице с углом $\beta = 0^\circ$ распределение эквивалентной деформации, как и на первом этапе, имеет неравномерный характер (рисунок 2), отчетливо видны зоны разных значений деформации, значение которой колеблется в диапазоне $0,7 \div 1$. С повышением значения угла β распределение эквивалентной деформации по длине заготовки становится более равномерным, а его численное значение увеличивается. В матрице с углом $\beta = 15^\circ$ значение эквивалентной деформации на втором этапе равно $0,75 \div 1,07$; в матрице с углом $\beta = 25^\circ$ оно равно $0,85 \div 1,1$; в матрице с углом $\beta = 35^\circ$ оно равно $0,92 \div 1,22$.

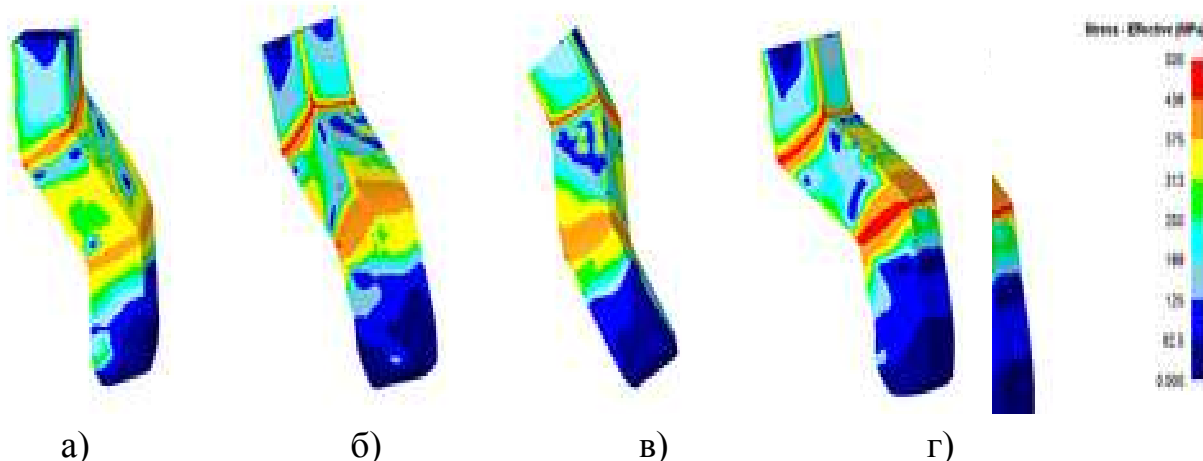


а – матрица с углом $\beta = 0^\circ$; б - с углом $\beta = 15^\circ$; в – с углом $\beta = 25^\circ$; г - с углом $\beta = 35^\circ$.

Рисунок 2 - Распределение эквивалентной деформации

2.2. Изучение эквивалентного напряжения

Распределение эквивалентного напряжения находится в двух ярко выраженных зонах: в зоне стыка первого и второго каналов и в зоне стыка второго и третьего каналов (рисунок 3). В матрице с углом $\beta = 0^\circ$ в пристыковочной зоне значение эквивалентного напряжения колеблется в диапазоне 180÷200 МПа. В зоне стыка каналов значение эквивалентного напряжения возрастает и находится в диапазоне 420÷450 МПа. С повышением значения угла β численное значение эквивалентного напряжения увеличивается. В матрице с углом $\beta = 15^\circ$ значение эквивалентного напряжения в пристыковочной зоне равно 220÷250 МПа; в зоне стыка каналов - 430÷470 МПа. В матрице с углом $\beta = 25^\circ$ значение эквивалентного напряжения в пристыковочной зоне равно 260÷320 МПа; в зоне стыка каналов - 460÷490 МПа. В матрице с углом $\beta = 35^\circ$ значение эквивалентного напряжения в пристыковочной зоне равно 290÷340 МПа; в зоне стыка каналов - 480÷500 МПа.



а) – матрица с углом $\beta = 0^\circ$; б) - с углом $\beta = 15^\circ$; в) – с углом $\beta = 25^\circ$; г) - с углом $\beta = 35^\circ$.

Рисунок 3 - Распределение эквивалентного напряжения

3. Обсуждение полученных результатов

Как видно из данных, представленных на рисунках 2-3, с увеличением величины угла β все характеристики напряженно-деформированного состояния увеличиваются в своем абсолютном значении.

Из-за отсутствия обжатия в РКУ-матрицах как такового, рост эквивалентной деформации в данном процессе происходит исключительно за счет реализации схемы сдвига на наклонных плоскостях, соединяющих соседние

каналы. Поэтому ключевым фактором, определяющим возникающий уровень деформаций за один проход, является величина угла (в нашем случае - углов) наклона данных плоскостей к входному и выходному вертикальным каналам. При увеличении угла β с 0 до 35 градусов происходит рост эквивалентной деформации в среднем на 22÷25%

Эквивалентные напряжения имеют схожее распределение в обеих зонах – с увеличением угла β происходит увеличение данного параметра. Однако изменение в зонах стыка каналов идет более плавно, чем в пристыковочных зонах. Это объясняется тем, что зоны стыка каналов, где собственно реализуются сдвиговые деформации, имеют довольно малую протяженность по сравнению с длинами каналов матрицы. В результате концентрация напряжения в этих зонах происходит в строго заданных промежутках, чего нельзя сказать о пристыковочных зонах, протяженность которых может достигать до половины длины каналов.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальная схема деформации возникает при повышении угла β , т.е. в матрице с углом $\beta=35^\circ$.

Заключение

В работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса деформирования в равноканальной ступенчатой матрице, отличительной особенностью которой является расположение промежуточного канала под двумя углами к входному и выходному каналам. Рассмотрены модели со значениями угла наклона в продольном направлении (угол α) 135 градусов и углами наклона в поперечном направлении (угол β) 15, 25 и 35 градусов. Анализ параметров напряженно - деформированного состояния показал, что наиболее оптимальная схема деформации возникает при повышении угла β , т.е. в матрице с углом $\beta=35^\circ$.

Список литературы

- [1] *Cegal B.M.* Способ прессования. А.с. СССР № 575892; опубл. 1977.
- [2] *Shaeri M.H., Salehi M.T., Seyyedain S.H., Abutalebi M.R., Park J.K.* Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment // *Materials & Design*. 2014. Vol. 57. pp. 250-257.
- [3] *Zhang Xiaohua, Liu Xiaojing, Wang Jingze, Cheng Yuansheng.* Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing // *Materials Science and Engineering A*. 2016. Vol. 676. pp. 65-72.
- [4] *Wei W., Wang S.L., Wei K.X., Alexandrov I.V., Du Q.B., Hu J.* Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature // *Journal of Alloys And Compounds*. 2016. Vol. 678. pp. 506-510.

- [5] *Mostaed E., Fabrizi A., Bonollo F., Vedani M.* Microstructural, texture, plastic anisotropy and superplasticity development of ZK60 alloy during equal channel angular extrusion processing // *Metallurgia Italiana*. 2015. Iss. 11-12. pp. 5-12.
- [6] *Zhao Xiaolian, Chen Na, Zhao Ningning.* Numerical Simulation of equal channel angular pressing for multi-pass in different routes // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 268-270. pp. 373-377.
- [7] *Gzyl M., Rosochowski A., Yakushina E., Wood P., Olejnik L.* Route Effects in I-ECAP of AZ31B Magnesium Alloy // *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 554-557. pp. 876-884.
- [8] *Krivtsova O., Talmazan V., Arbuz A., Sivyakova G.* Study the process of equal-channel angular pressing with quasi-ultra-small angles of joint channels using computer modeling in program complex DEFORM // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1030-1032. pp. 1337-1341.
- [9] *Tavakkoli V., Afrasiab M., Faraji G., Mashhadi M.M.* Severe mechanical anisotropy of high-strength ultrafine grained Cu–Zn tubes processed by parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 625. pp. 50–55.
- [10] *Raab G.I., Fakhretdinova E.I., Valiev R.Z., Trifonenkov L.P., Frolov V.F.* Computer study of the effect of tooling geometry on deformation parameters in the plastic shaping of aluminum wire rod by Multi-ECAP-Conform // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59. Iss. 11-12. pp. 1007-1014.
- [11] *Chembarisova R.G., Aleksandrov I.V.* Simulation of the Elastoplastic Behavior of Grade-4 Ti in the ECAP-C Process // *Metal Science and Heat Treatment*. 2016. Vol. 58. Iss. 3-4. pp. 236-244.
- [12] *Корчунов А.Г., Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г.* Принципы проектирования непрерывного способа получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. № 1. С. 43-46.
- [13] *Фастыковский А.Р.* Экспериментальное изучение процесса прокатки – прессования // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2010. №11. С. 11-14.
- [14] *Valiev R.Z., Langdon T.G.* Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progress in Materials Science*. 2006. №51. pp. 881–981.
- [15] *Найзабеков А.Б., Ашкеев Ж.А., Лежнев С.Н., Толеуова А.Р.* Исследование процесса деформирования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2005. №2. С. 16-18.

УДК 669.18

**О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТЬЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ
МЕТАЛЛОВ ПУТЁМ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО И ИНДУКЦИОННОГО МЕТОДОВ**

Осинин А.В.¹, Осинин В.Ф.¹, Лупова И.А.¹, Герасименко Т.А.¹

¹Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

**ON INCREASING THE EFFICIENCY OF CASTING OF BLACK AND NON-
FERROUS METALS BY JOINT USE OF ELECTROHYDRAULIC AND
INDUCTION METHODS**

Osinin A. V.¹, Osinin V. F.¹, Lupova I. A.¹, Gerasimenko T. A.¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: В настоящей работе предлагается новый алгоритм функционирования очистки литья в целом, включающий как математический контроль работы литья, так и расширения возможностей очистки за счет внедрения нового индукционного метода.

Ключевые слова: литьё, электрогидравлический метод, индукционный метод

Abstract: In this paper, we propose a new algorithm for the functioning of casting cleaning as a whole, including both mathematical control of the casting operation and expanding cleaning capabilities through the introduction of a new induction method.

Key words: casting, electro-hydraulic method, induction method

В настоящее время в промышленности широко используется электрогидравлический метод очистки литья черных и цветных металлов[1], однако математического контроля функционирования таких систем не применяется в нужном объеме. Кроме того, для достижения поставленных целей применение одного указанного метода, по мнению авторов, является недостаточным.

В настоящей работе предлагается новый алгоритм функционирования очистки литья в целом, включающий как математический контроль работы литья, так и расширения возможностей очистки за счет внедрения нового индукционного метода.

Суть функционирования такого комплексного алгоритма очистки литья изложена на рисунке 1.

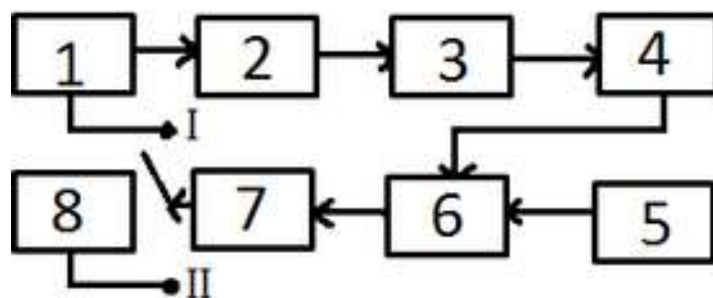


Рис. 1 Структурно-функциональная схема очистки литья металлов с использованием электрогидравлического (ЭГМ) и индукционного (ИМ) методов.

Обозначения:

блок 1 – отливки металла, подлежащие очистки от стержней и формовочных смесей;

блок 2 – электрогидравлический (ЭГМ) метод;

блок 3 – индукционный (ИМ) метод;

блок 4 – устройство оценки качества очистки отливок;

блок 5 – эталон качества для сравнения;

блок 6 – оценка качества очистки металла;

блок 7 – обратный канал связи по управлению качеством работы всей системы.

Реле – положение I – включается повторный цикл, положение II – остановка системы в случае достигнутого качества чистоты очистки отливок.

блок 8 – остановка процесса очистки литья при достижении нужного качества очистки отливок.

Отметим, что цель очистки нужного качества достигнута, если критерий качества (количество неровностей на единицу площади) совпадает и система выдает литые металлы на использование по назначению, а в случае, если требуемое качество очистки литья при единичном цикле применения не достигнуто, то реле вновь включается на очистку, подключая контакт реле I со входом блока 1.

Индукционный метод очистки литья металлов построен на работе бесконтактного низкочастотного индукционного электродвигателя возвратно-поступательного типа. В состав этого двигателя входит а) кольцевой проводящий контур с переменным током i частоты ω , создающим индукцию поля в центре кольца

$$\mathcal{E}_{k=\mu_0 \cdot \mu_e} = \frac{N \cdot i}{2 \pi r}, \text{ где } \mu_0 - \text{ магнитная проницаемость вакуума}$$

μ_e – вода, где находится контур с током i .

N – число последовательных витков в контуре радиуса r ;

i – ток в контуре б) постоянный магнит (BiFeMo – прямоугольный параллелепипед) с высокой коэрцитивной силой, расположен в плоскости контура с центром магнита в середине кольца контура – при этом вытянутая его часть с максимальной индукцией постоянного магнита $B_{\text{магн.}}$ расположена симметрично внутри контура и делит его пополам.

Сила Ампера [2] приложена к постоянному магниту и вызывает его колебания в третьей плоскости с частотой ω тока i_k . Снабжая колеблющийся постоянный магнит набором специальных щеток (металлических, волосяных и т.д.), получаем систему очистки литья металлов с заданным качеством, работающим согласно схеме, представленной на рис.1.

КПД установки достаточно велико, т.к. двигатель не содержит трущихся частей, а потери на тепло в проводах невелики, т.к. вода охлаждает обмотку кольцевого проводящего контура. Таким образом, предложенный новый способ повышения эффективности качества литья черных и цветных металлов по, нашему мнению, заслуживает внимания и может быть рекомендован для использования соответствующим ведомствам и предприятиям, занимающимися данной проблематикой.

Список литературы:

- [1] Л. А. Юткин. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986.— 253 с
- [2] Телеснин Р. В. и Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. 2-е изд., переработ. Учебное пособие для физ.-мат. Фак-тов пед. ин-тов. М., «Просвещение», 1969. - 235 с.

УДК 621.926.9

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОСТРОУГОЛЬНОЙ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ МЕТОДОМ РАЗРУШЕНИЯ «МОЛОТ ПО НАКОВАЛЬНЕ»

Павлиненко О.И.¹, Левченко Э.П.¹

¹ *Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина*

PREPARATION OF AN ORGANIZED STEEL CRUSHING BY THE DESTRUCTION METHOD OF THE «HAMMER ON ANVIL»

Olga Pavlinenko¹, Eduard Levchenko¹

¹ *Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine*

Аннотация: Описана необходимость применения для отделочных работ в машиностроительной отрасли металлического абразивного материала повышенной твердости и износостойкости в виде стальной дроби. Рассмотрены дробильно-измельчительные машины применимые для производства стальной колотой дроби, проанализированы их основные преимущества и недостатки. Акцентировано внимание на широком использовании на заводах стальной дроби мельниц барабанного типа со сферическими мелющими телами. Представлен простой и эффективный метод реализации прямого стесненного удара, обеспечивающий эффективный технологический процесс раскалывания стальной дроби округлой формы. Предложена принципиально новая конструкция измельчителя для приготовления стальной дроби остроугольной формы и определены ее основные конструктивные и технологические параметры. Для обоснования параметров ударного органа и его динамики составлено дифференциальное уравнение движения молота в рабочем пространстве измельчителя, решаемое численными методами с помощью специализированного программного пакета MathCad.
Ключевые слова: стальная колотая дробь, прямой стесненный удар, роторно-ударный измельчитель.

Abstract: The need for the use of metallic abrasive material of increased hardness and wear resistance in the form of steel shot for the finishing work in the engineering industry is described. The crushing and grinding machines applicable for the production of steel split shot are considered, their main advantages and disadvantages are analyzed. Attention is focused on the widespread use in steel plants of steel shot mills of drum type with spherical grinding bodies. A simple and effective method for realizing a direct constrained blow is presented, which provides an efficient technological process for splitting a round steel shot. A fundamentally new design of a grinder for the preparation of an acute-angle steel shot is proposed, and its main structural and technological parameters are determined.

To justify the parameters of the impact organ and its dynamics, a differential equation of the hammer motion in the grinder working space is compiled, solved numerically using the specialized MathCad software package.

Key words: steel split shot, direct cramped impact, rotary impact shredder.

Ведение

Во многих отраслях хозяйственной деятельности широко используется колотая стальная дробь остроугольной формы. Первоначально для ее получения отливают круглые дробинки разного диаметра (литую дробь), а затем их раскалывают на множество более мелких частиц. Полученные фракции отсеивают по размерам и получают дробинки, имеющие неправильную форму с острыми гранями. Особенностью колотой дроби является ее повышенная абразивная способность, вследствие чего обрабатываемая ею поверхность приобретает необходимую шероховатость. Благодаря наличию острых граней, колотая дробь хорошо подходит для подготовки поверхностей под дальнейшую обработку (покраску, эмалировку, изоляцию и т.д.). Это связано с тем, что абразивные части колотой дроби воздействуя на обрабатываемую поверхность придают ей определенную структуру на которую хорошо ложится краска, шпаклевка и тому подобные отделочные материалы. Благодаря обработке остроугольной дробью необходимая шероховатость придается всей поверхности изделия, что позволяет легко наноситься любому покрытию.

Дробеструйная обработка превосходит по своим качествам зачистку поверхности и гораздо ближе по своему характеру к кузнечному делу. Так, например при приложении сжимающего усилия к одной стороне листа металла он начинает закручиваться в сторону источника нагрузки, образуя изогнутые формы, необходимые в авиации.

При таком воздействии частицы дроби на большой скорости ударяются о поверхность металлической детали, создавая вмятины. Это создает напряжение сжатия и улучшает механические и потребительские свойства [1]

Дробь, выпускаемая на ООО «Алчевский завод стальной дроби», нашла широкое применение в производстве, однако используемая на заводе шаровая мельница не достаточно эффективна и приводит к переизмельчению готового продукта. Вследствие чего, необходимо внедрение принципиально новой установки, позволяющей наиболее результативно осуществлять процесс приготовления остроугольной стальной дроби [2]

1 Существующие методы

К измельчительным машинам ударного и раскалывающего действия, которые могут быть применимы для приготовления колотой стальной дроби

можно отнести барабанные, молотковые, роторные, центробежные, валковые и щековые [3]

Наибольшее применение в производстве колотой стальной дробы нашли барабанные мельницы с мелющей загрузкой в виде шаров, однако основным их недостатком является малая эффективность работы, обусловленная низким коэффициентом полезного действия и повышенными энергозатратами.

Проведенный анализ существующих способов и устройств для дробления и измельчения материалов показывает, что наиболее перспективным вариантом создания разрушающих усилий для раскалывания стальной сферической дробы является организация условий прямого стесненного удара, при котором при относительно малых скоростях падения мелющих тел накопленная ими потенциальная энергия максимально переходит в работу разрушения.

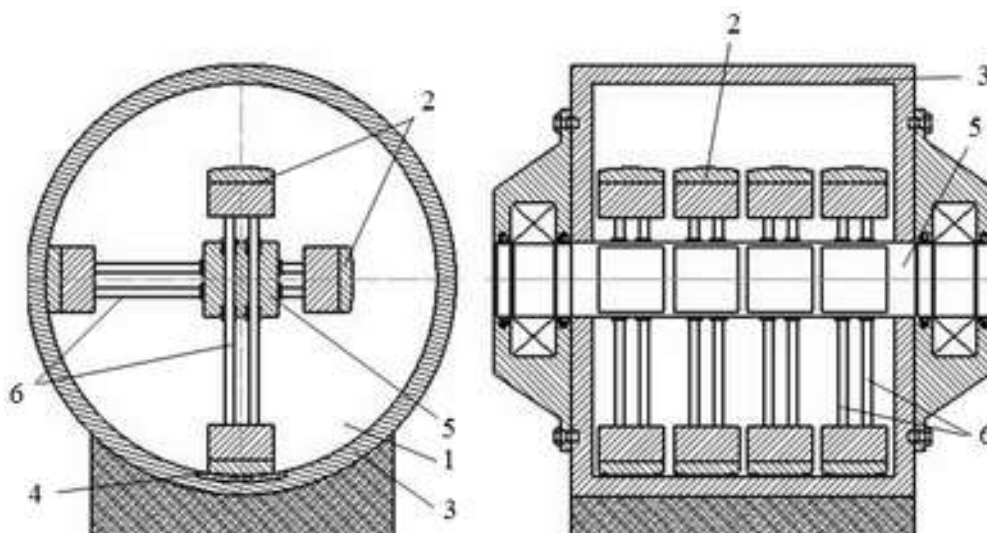
1.1 Постановка задачи

Основной задачей работы является создание и разработка принципиально нового устройства для раскалывания стальной сферической дробы, реализующего способ разрушения «молот по наковальне», как простой и эффективный метод обеспечения прямого стесненного удара, гарантирующего эффективный технологический процесс получения абразивного материала остроугольной формы.

1.2 Описание метода и устройства для его реализации

Изучение закономерностей разрушения материала предполагает выявление и создание таких условий, при которых процесс разрушения производителен при наименьших затратах энергии. В этой связи наиболее рациональным является разработка и создание роторно-ударного измельчителя, обеспечивающего подъем и падение мелющих тел в виде массивных грузов с прямыми рабочими поверхностями или же с формой поверхности близкой к рабочей поверхности наковальни, что по сути обеспечивает такое же воздействие на дробь, как и молот по наковальне.

Для реализации метода соударения между ударной поверхностью и жесткой поверхностью (наковальней) решено использовать ударную роторную дробилку с подвижными молотами (рис. 1), состоящую из корпуса, ротора и ударных элементов (молотов), перемещающихся в направляющих, расположенных в валу ротора[4]



1 – рабочая камера мельницы; 2 – молот; 3 – корпус мельницы; 4 – зона ударного раскалывания дробы; 5 – ротор; 6 – шток молота

Рисунок 1. Схема ударной роторной мельницы

Материал подлежащий измельчению подается в рабочую камеру 1, где попадает под действие падающих мелющих тел 2 и разрушается между ними и внутренней стенкой корпуса 3, которая может быть выполнена в виде износостойкой брони 4 из стали Гадфильда (110Г13Л), обладающей хорошей износостойкостью при ударе в результате ее упрочнения из-за наклепа. Так как мелющие тела 2 и рабочая поверхность внутренней стенки корпуса 3 имеют одинаковую геометрическую конфигурацию в местах контакта, то обеспечивается наиболее эффективный вариант разрушения материала прямым стесненным ударом, когда практически вся потенциальная энергия мелющих тел переходит в работу разрушения, чем достигается ударный контакт мелющих тел 2 с измельчаемым материалом под прямым углом или углом близким к прямому.

Для ориентировочного выявления основных параметров роторно-ударного измельчителя для раскалывания дробы прямым стесненным ударом согласно кинематической схеме (рис. 2.2) на основании требуемой производительности 1000 кг в час и предварительно проведенных экспериментальных исследований по определению энергии разрушения, выполнялись следующие расчеты, представленные в таблице 1. Это позволило выявить основные массогабаритные характеристики предлагаемой конструкции дробильно-измельчительной машины применительно к требованиям технического задания, согласованного с предприятием по производству стальной дробы.

Таблица 1. Основные параметры роторно-ударного измельчителя

Исходные данные	Формула	Результат
Масса наиболее тяжело разрушаемой частицы дробы диаметром 2,1 мм	$m_{2,1} = V_{ш} \cdot \rho_{см} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{2,1}^3 \cdot \rho_{см}$	$m_{2,1} = 0,3$ г
Количество частиц, необходимое для раскалывания за 1 час при производительности $Q_u = 1000$ кг/ч:	$N_{21} = \frac{Q_u}{m_{21}}$	3333333 шт.
Количество частиц дробы, раскалываемой за 1 минуту	$N_{мин21} = \frac{N_{21}}{60}$	55556 шт.
Количество частиц дробы разрушаемых за 1 цикл при наличии четырех измельчающих тел	$N_u = \frac{N_{мин21}}{4}$	13889 шт.
Время падения мелющего тела	$t = \sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}}$	0,45 с
Крутящий момент, при массе ударника $m_y = 250$ кг	$M = m_y \cdot R_{y1} - m_y \cdot R_{y2} = m_y \cdot (R_{y1} - R_{y2})$	1625 Н·м.
Крутящий момент, учитывающий четыре цикла разрушения	$M_n = M \cdot 4$	6500 Н·м.
Требуемая мощность на валу измельчителя, учитывающая четыре цикла разрушения	$P_{ва} = F \cdot V = M_n \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}$	10205 Н·м
Потребная мощность электродвигателя	$P_{дв} = \frac{P_{ва}}{\eta_u^2 \cdot \eta_{сп} \cdot \eta_{мх} \cdot \eta_{лс}^{16}}$	16894 кВт

При разработке конструкции и кинематической схемы измельчителя основополагающим фактором являлось простота изготовления и общая повышенная надёжность работы машины в целом при относительно низкой удельной массе по сравнению с существующей шаровой мельницей.

2 Моделирование работы измельчителя

Для обоснования параметров ударного органа и его динамики составлено дифференциальное уравнение движения молота в рабочем пространстве измельчителя [5]:

$$-\ddot{r}(t) + \omega^2 (r_p - R_u + 2 \cdot r(t)) + 2 \cdot g (\cos(\alpha_0 - \omega \cdot t) (1 - \sin(\alpha_0 - \omega \cdot t))) = 0; \quad (1)$$

где $r(t)$ – текущее положение ударного органа в полярной системе координат $O\gamma$,

$\gamma = \omega t$ – угловое положение молота во вращающемся роторе,

ω – угловая скорость вращения ротора;

r – внешний радиус ротора;

R_m – радиус центра тяжести ударной части молота в крайнем положении;

α_0 – угол поворота ротора, при котором начинается движение молота вдоль отверстия в роторе (зависит от коэффициента трения материалов ножки молота и ротора).

Уравнение (1) является расчетным. Это нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка решается численными методами с помощью пакета MathCad. Начальные и граничные условия для решения данного уравнения определяются размерами ротора, при котором обеспечивается указанная высота падения ударного органа 1 м при производительности процесса 1 тонна в час.

3 Полученные результаты

По сравнению с иными возможными способами раскалывания данная конструкция позволяет добиться повышения эффективности процесса раскалывания округлых частиц стальной литой дроби и увеличения производительности дробильного оборудования, вследствие простоты реализации прямого стесненного удара, а также обеспечить безопасность проведения работ из-за относительно низких скоростей соударения, которые на несколько порядков ниже, чем, например, в применяемой для этих целей мельнице разгонного ударного типа.

Список литературы

- [1] Hanson K. Shot peening offers cost-effective way to make stronger metal products. Articles & Columns (electronic journal). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ctemag.com/news/articles/shot-peening-offers-cost-effective-way-make-stronger-metal-products>.
- [2] Завод Стальной Дроби (ЗСД) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.shot-works.com/>.
- [3] Павлиненко О.И. Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дроби / О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, В.Г. Чебан // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Специальный выпуск «металлургические процессы и оборудование» Донецкая политехника – Донецк, 2016. – №4 (3). С. 38-44.
- [4] Павлиненко О.И. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторной ударной мельницы для производства колотой дроби / О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, Д.А. Власенко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 4(18). –С. 3–9.
- [5] Павлиненко О.И. Процесс разрушения стальной дроби центральным стесненным ударом / О.И. Павлиненко, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов.– Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 104 –108.

УДК 624.01

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПРОЧИСТКИ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ТРУБ

Петренко А. В.¹, Чернышов Е. А.¹, Иванова Е. О.¹, Левченко Э. П.¹

¹ *Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина*

EFFECTIVE METHOD OF CLEANING SEWER PIPES

Alexander Petrenko¹, Evgeny Chernishov¹, Ivanova E.O¹ Eduard Levchenko¹

¹ *Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine*

Аннотация: Рассмотрены вопросы создания механического устройства прочистки системы водоотведения. На базе электрической дрели разработано приспособление с гибким валом и буровой головкой шнекового типа, приводимой в действие с помощью специального редуктора. Разработанное устройство позволяет осуществлять очистку от загрязнений участков канализационной сети малого диаметра горизонтального, вертикального и наклонного расположения. Полная очистка трубы по длине проводится за несколько циклов, определяемых силой сопротивления движению шнека при его подаче и наличием вынимаемых загрязнителей. Приведен пример практической реализации чистки канализационных труб, демонстрирующий успешное применение указанного метода.

Ключевые слова: канализация, трубы, водоотведение, прочистка, механическая системы, технологичность прочистки.

Abstract: The questions of creation of mechanical device of clearing of the system of aking of water are considered. On the base of electric drill adaptation is worked out with a flexible billow and boring head of screw type, operated by means of the special reducing gear. The worked out device allows to carry out cleaning from contaminations of areas of sewage network of small diameter of horizontal, vertical and sloping location. The complete cleaning of pipe on length is conducted for a few cycles, determined by force of resistance motion of auger at his serve and by the presence of the taken out pollutants. An example of practical realization of cleaning of sewage-pipes, demonstrating successful application of the indicated method, is made.

Key words: sewage system, pipes, waters taking, clearing, mechanical systems, clearing manufacturability.

Введение

В связи со значительным временем эксплуатации, а также вследствие неустойчивой и непостоянной работы сетей водоотведения, вызванных, как боевыми действиями, там и запущенным состоянием канализационных труб все чаще становятся актуальными вопросы их приведения в должное работоспособное состояние [1].

При этом на первый план выдвигаются условия максимальной простоты и экономичности проведения таких работ, что вызвано недостатком матери-

альных средств и ресурсов в период становления экономики после развала социалистической плановой системы хозяйствования.

При расположении канализационных коммуникаций в земле на глубине, превышающей глубину замерзания грунта работы по прочистке труб, которым не уделялось внимание длительный период времени становятся сложным техническим заданием, требующим выемки большого количества грунта, извлечения трубопроводов, их замене или прочистке. Это сильно усложняет возобновление работы таких систем, требует значительного объема денежных вложений, а также времени на выполнение самих работ.

1 Существующие методы

Все большее предпочтение для возобновления централизованного водоотведения при аварийных ситуациях зачастую отдается бестраншейным технологиям восстановления, являющихся более экономичными по сравнению с традиционным проведением земляных работ [2].

Однако в условиях значительной засоренности, когда канализационная сеть не использовалась длительное время во внутренних полостях труб накапливается осадок, который по своим физико-механическим свойствам сильно подобен земляным отложениям, гидравлические способы очистки оказываются не эффективными. Причиной этому является как биологические процессы компостирования, так и нанос земляных и иных частиц в коллекторы и трубопроводы дождевыми и талыми водами с поверхности земли, особенно при отсутствии крышек колодцев, расхищенных вандалами на металлолом.

1.1 Постановка задачи

Основной задачей работы является создание и разработка инновационного метода изготовления, эксплуатации и восстановления трубопроводного оборудования для системы водоотведения, в т.ч. в металлургическом комплексе, обладающего простотой реализации и эффективностью действия при малых материальных затратах.

1.2 Описание метода и устройства для его реализации

При непосредственном участии производственного коллектива научно-исследовательского проектно-конструкторского института (НИПКИ) «Параметр» при Донбасском государственном техническом университете для очистки асбоцементных канализационных труб централизованной системы водоотве-

дения с целью упрощения работ было разработано специальное механическое устройство, представленное на рисунке 1.

Устройство включает в себя шнековую бурильную головку, на торцевой концевой части которой имеются резцы, облегчающие процесс бурения. Для организации медленного вращательного движения головки изготовлен специальная понижающая передача в виде редуктора, кинематически соединенного с электрической дрелью. В качестве гибкого вала применена металлопластиковая труба, вращение которой обеспечивается посредством цангового зажима (рис. 2), таким образом, что по мере внедрения шнековой навивки в засоренную канализационную трубу осуществляется перехват наружной цилиндрической поверхности металлопластиковой трубы для изменения длины ее подачи. Центрирование шнека относительно внутренней поверхности канализационной трубы осуществляется с помощью направляющей втулки-кондуктора, частично располагающейся внутри трубы. Для извлечения шнека при аварийной ситуации, например, поломки гибкого вала в качестве предохранительного устройства, облегчающего извлечение шнека, предусмотрен стальной трос, выведенный наружу, соединенный со шнеком.

С целью понижения частоты вращения рабочего органа разработан и изготовлен специальный редуктор с рукояткой держателем в виде общего привода с вращающим устройством.



Рисунок 1. Устройство для прочистки канализационных труб



Рисунок 2. Зажимная цанга

2 Практическая реализация метода

Внедрение шнека внутрь трубы по ее длине осуществляется при помощи мускульной силы работника (рис. 3), производящего очистку, а вращение шнека, нарезка и разрыхление отложений внутри трубы с помощью электрической дрели.



Рисунок 3. Реализация способа прочистки

Для очистки канализации шнек подается внутрь трубы на некоторую величину, зависящую от конкретных условий и навыков работника, осуществляющего чистку, после прекращения вращения и подачи шнека вперед производится вытягивание гибкого вала, что влечет за собой выемку земляной массы из полости трубы. Последующее удаление этих загрязнений осуществляется вручную выборкой их в специальную емкость для извлечения наружу.

Полная очистка трубы по длине проводится за несколько циклов, определяемых силой сопротивления движению шнека при его подаче вперед и наличием вынимаемых загрязнителей. При отсутствии загрязняющих веществ прочистка труб механическим путем считается законченной, что может служить поводом для гидравлической очистки разными, как современными способами [3, 4], так и обычной промывкой водой, как при обычной работе канализации.

3 Полученные результаты

При практическом применении разработанного устройства бестраншейным способом была очищена канализационная сеть производственного участка НИПКИ «Параметр», неиспользуемая несколько лет и полностью забитая земляными отложениями общей протяженности около 40 м, что позволило возобновить ее нормальную работу и сбросить в канализационную сеть стоковые воды, изливающиеся наружу из колодца, расположенного ниже по уровню земляной поверхности.

Таким образом предложенный малозатратный механический способ и устройство для очистки канализационных труб является эффективным и быстрым средством возобновления централизованного водоотведения, который наряду с бюджетной очисткой трубопроводов водоснабжения [5] позволяет эффективно устранять аварийные ситуации, связанные с водопроводными инженерными коммуникациями.

Список литературы

- [1] Алейнікова А. І., Волков В. М., Гончаренко Д. Ф та ін. Методологічні основи подовження експлуатаційного ресурсу підземних інженерних мереж: Монографія— Харків: Раритети України, 2017. — 320 с.
- [2] Гончаренко, Д. Ф., С. А. Забелин, А. И. Алейникова и др. Разработка и исследование гидромеханического метода очистки канализационных коллекторов от загрязнений. — URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/142639/153362> (дата обр. 29.02.2020).
- [3] Волобуев Д.А. Современные методы прочистки труб. — URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2051 (дата обр. 29.02.2020).
- [4] Гидродинамическая очистка труб — URL: <http://www.vodokanal-msk.ru/stati/gidrodinamicheskaya-promyivka-trub.html> (дата обр. 29.02.2020).
- [5] Петренко, А. В., Левченко Э. П. Технологичный механический метод прочистки труб. / Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленных производств: Сб. тезисов докл. III Международной научно-технической конференции. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2018. — С. 81–83.

УДК 621.7.08

АППРОКСИМАЦИЯ КОНТУРА ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ПОДКАТА

Шкарин А. Н.¹, Бельский С. М.¹, Пименов В. А.²

¹ Липецкий государственный технический университет, г.Липецк, Россия

² Новолипецкий металлургический комбинат, г.Липецк, Россия

APPROXIMATION PROBLEM OF HOT ROLLED TRANSVERSE PROFILE

Aleksandr Shkarin ¹, Sergey Belsky ¹, Vladimir Pimenov ²

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

² Novolipetsk Steel, Lipetsk, Russia

Аннотация: В данной статье рассматривается аппроксимация полиномами Чебышева профиля поперечного сечения горячего подката. Предложенная модель позволяет сохранить информацию как о прикромочных утолщениях, так и об особенностях средней части полосы.

Ключевые слова: горячекатаный прокат, математическая модель, профиль поперечного сечения, полиномы Чебышева

Abstract: This article deals with the approximation of hot-rolled transverse profile by Chebyshev polynomials. This mathematical model of the transverse profile will keep information about distortion of middle part of the strip and edges.

Key words: hot-rolled steel, mathematical model, transverse profile, Chebyshev polynomials.

Введение

Значительное влияние на плоскостность холоднокатаных полос оказывают особенности формы профиля поперечного сечения горячего подката [1-3]. На стане 2000 горячей прокатки профиль поперечного сечения измеряется профилемером Radiometrie RM-312 путем определения толщины по ширине полосы с шагом в 5 мм. Набор таких измерений удобно представить в виде вектора $H(x) = (H_{sc}^0, \dots, H_{sc}^m)$, где x – расстояние от середины полосы. В зависимости от длины полосы профилемер формирует от 50 до 200 таких векторов, а затем их усредняет:

$$H[x_i] = \left[\sum_{\ell=1}^q h_{sc}^{\ell 1} / q, \sum_{\ell=1}^q h_{sc}^{\ell 2} / q, \dots, \sum_{\ell=1}^q h_{sc}^{\ell p} / q \right],$$

где q – число измерений по длине полосы.

Согласно источникам [4-5], для параметризации результатов измерений толщины полосы профиль поперечного сечения аппроксимируют параболой второго порядка:

$$h(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2,$$

где $h(x)$ – толщина полосы.

Однако недостатком данной модели является недостаточная точность аппроксимации возле кромок [6]. Повышение степени полинома не приводит к улучшению точности аппроксимации, а при порядке многочлена >6 и вовсе могут появляться осцилляции между точками, если профиль поперечного сечения имеет форму отличную от пологой параболы.

1. Модели и методы

Необходимо построить математическую модель зависимости толщины профиля поперечного сечения $h(x)$ от удаления x от середины, которая сохранит его характерные особенности, а также с достаточной точностью приблизит кромки.

Проведенный анализ плоскостности холоднокатаных полос на выходе 5-клетьевого стана 2030 показал, что существует четыре основных типа профилей (рис. 1), которые оказывают влияние на дальнейшее формообразование полос при холодной прокатке. Профили поперечного сечения с выпуклой серединой (рис. 1,в) приводят к коробоватости. Профили горячего подката с прикромочными утолщениями (рис. 3,б,г) вызывают волнистость. Таким образом, дальнейшей прокатке рекомендуется подвергать профили, имеющую форму параболы, изображенную на рис. 3,а

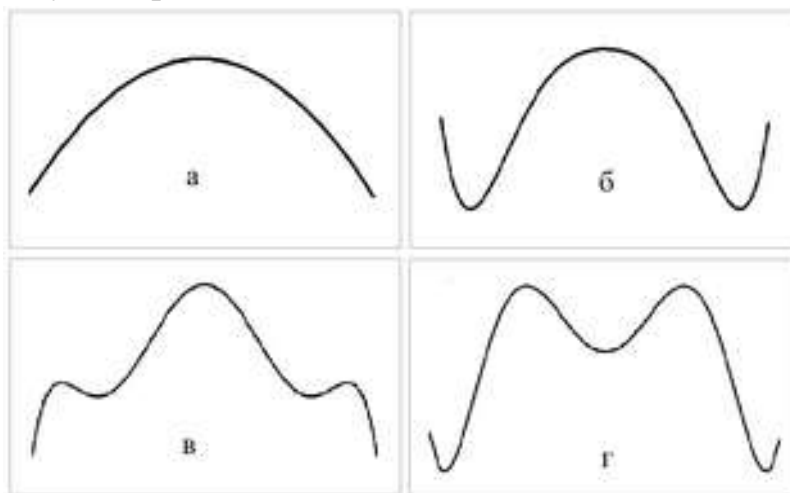


Рисунок 1. Характерная форма профилей поперечного сечения горячекатаных полос: а – без прикромочных утолщений; б – с прикромочными утолщениями; в – с пикообразной выпуклой серединой; г – вогнутый профиль с прикромочными утолщениями

Для выделения макро особенностей формы профиля применим полиномиальную регрессию. Запишем аппроксимирующий многочлен в обобщенной форме:

$$h(x) = a_0 g_0(x) + a_1 g_1(x) + \dots + a_n g_n(x) \quad (1)$$

где n – степень полинома; $a_0 \dots a_n$ – коэффициенты обобщенного многочлена.

В случае, если $g_n(x) = x^n$, получаем стандартную многомерную регрессионную модель, коэффициенты которой вычисляются с помощью метода наименьших квадратов (МНК). МНК уменьшает среднеквадратичную погрешность по всей кривой, но допускает отдельные высокие значения ошибок. Поэтому в качестве аппроксимационного полинома применим многочлены Чебышева.

Полиномами Чебышева на множестве точек называют ортогональные алгебраические многочлены, которые имеют следующие свойства: равномерно распределяют ошибку аппроксимации по всей заданной кривой (сводят к минимуму максимум ошибки); каждая функция $a_n g_n(x)$ является равно колеблющейся; определяются рекуррентными формулами:

$$a_k = \frac{\sum_{i=1}^m h(x_i) g_k(x_i)}{\sum_{i=1}^m g_k^2(x_i)},$$

где m – количество точек;

$$g_0(x) = 1;$$

$$g_1(x) = x - \lambda_1;$$

$$g_k(x) = (x - \lambda_k) g_{k-1}(x) - \beta_k g_{k-2}(x),$$

где

$$\lambda_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i;$$

$$\lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^m x_i g_{k-1}^2(x_i)}{\sum_{i=1}^m g_{k-1}^2(x_i)};$$

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^m x_i g_{k-2}(x_i) g_{k-1}(x_i)}{\sum_{i=1}^m g_{k-2}^2(x_i)}.$$

Для количественной оценки адекватности модели (1) вычислим значение средней ошибки аппроксимации \bar{A} . Данный коэффициент отображает среднее

отклонение приближенных значений $h(x_i)$ от фактических измерений $H(x_i)$. Адекватной считают модель, где средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} < 15\%$ [7-8]:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^m |H(x_i) - h(x_i)|}{m} \cdot 100\% \quad (2)$$

2. Обсуждение полученных результатов

При выборе порядка модели (1) применялась аппроксимация профилей поперечного сечения полиномами Чебышева четвертого ($n=4$) и шестого порядка ($n=6$). Расчет коэффициентов полинома Чебышева проводился в среде программирования R. Анализ выборки из 520 полос показал, что полином Чебышева четвертой степени не отображает существенных особенностей «седловидного» профиля (рис. 2). Поэтому в качестве аппроксимационного полинома будем использовать многочлен Чебышева шестой степени.



Рисунок 2. Аппроксимация профиля поперечного сечения с прикромочными утолщениями

Согласно формуле (2) вычислим среднюю ошибку аппроксимации для каждого из 520 профилей поперечного сечения. Результаты вычислений представим в виде гистограммы на рис. 3.

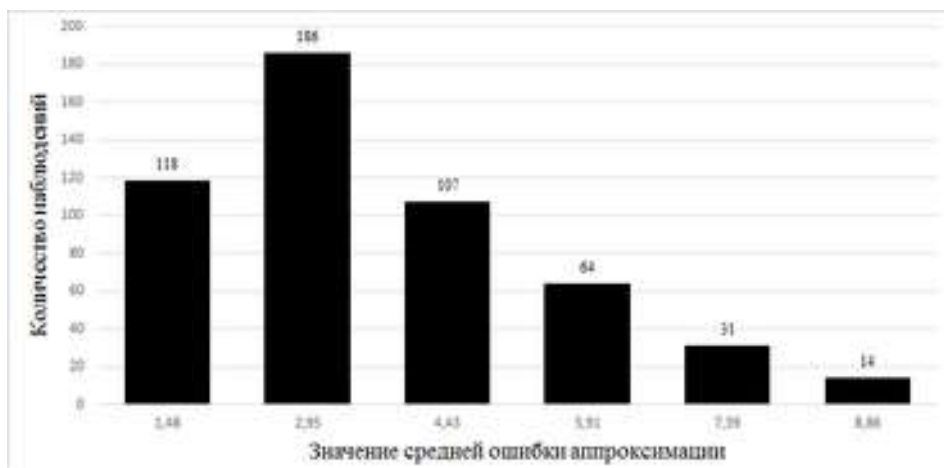


Рисунок 3. Гистограмма значений \bar{A}

Видим, что \bar{A} не превышает 15%, а значит модель (1) при $n=6$ достаточно точно аппроксимирует поверхность профилей поперечного сечения.

Таким образом, разработана адекватная математическая модель для параметризации макро особенностей профиля поперечного сечения горячего подката.

Список литературы

- [1] Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 1. // Производство проката. — 2015. — № 5. — С. 18 — 22.
- [2] Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 1. // Производство проката. — 2015. — № 5. — С. 18 — 22.
- [3] Пименов В.А., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Повышение точности аппроксимации формы поперечного профиля горячего проката // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2016. — № 9. — с. 130 — 138.
- [4] Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 2. // Производство проката. 2015. — № 6. — с. 10 — 13.
- [5] Пименов В.А., Перцева В.С. Разработка методов анализа и оценки точности поперечного профиля горячекатаного проката // Металлург. — 2014. — № 9. — с. 66 — 70.
- [6] Бельский С.М., Мухин Ю.А., Мазур С.И., Гончаров А.И. Влияние параметров профиля поперечного сечения горячекатаного подката на плоскостность холоднокатаных полос // Сталь. — 2013. — № 5. — с. 52 — 55.
- [7] Пименов В.А., Бельский С.М., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 1. // Производство проката. — 2018. — №1. — с. 11 — 15.
- [8] Пименов В.А., Бельский С.М., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 2. // Производство проката. — 2018. — №6. — с. 9 — 14.

УДК 621.967.1

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
РЕЗКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОСТЫХ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ
ФАСОННЫМИ НОЖАМИ**

Петров П. А.¹, Ульяницкий В. Н.¹

¹ *Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина*

**DISTRIBUTION ENERGY POWER PARAMETERS OF THE CUTTING
PROCESS WHILE PROCESSING SIMPLE VARIETAL PROFILES WITH
SHAPED KNIVES**

Pavel Petrov¹, Vasiliy Ulianitsky¹

¹ *Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine*

Аннотация: Выполнен анализ влияния формы и расположения разрезаемого сечения на силу резки и работу, затрачиваемую на разделительную операцию при обработке простых сортовых заготовок фасонными ножами.

Ключевые слова: сортовой металлопрокат, фасонные ножи, сортовые ножницы, сила резки, работа резки, квадрат, круг.

Abstract: The analysis of the influence of the shape and location of the cut section on the cutting force and the work spent on the separation operation when processing simple high-quality workpieces with shaped knives.

Key words: bar section, shaped knives, scissors, cutting force, cutting work, square, circle

Актуальность исследования. Разделительные операции, как элемент технологической цепи производства сортового металлопроката, являются весьма распространенными и необходимыми в современном прокатном производстве. При этом широкое применение, наряду с дисковыми пилами, получили ножницы различных конструкций. Многообразие механических схем резки усложняет выбор наиболее рационального способа разделения и требует учета влияния технологических факторов, основными из которых являются: способ и схема резки; тип ножей и скорость их перемещения; сила и работа, затрачиваемые на разделение профиля; механические свойства и форма сечения заготовки; степень затупления режущего инструмента. Рациональное использование потенциальных возможностей разделения сортового металлопроката на ножницах невозможно без проведения дополнительных исследований в данной области, способствующих усовершенствованию конструкции ножниц и расширению их технологических возможностей наряду с повышением качества отделки готового металлопроката.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы проектирования сортовых ножниц, а также задачи, связанные с разработкой методов расчета технологических параметров процесса поперечной резки сортового металлопроката на ножницах рассмотрены в работах [1–3]. Традиционно вычисление максимальной силы резки производилось по формулам, предложенным А.И. Целиковым и А.А. Королевым [2], в которых учитывается сопротивление резанию и площадь поперечного сечения разрезаемой заготовки. При этом равенство эквивалентных площадей круглой и квадратной заготовок будет давать одинаковый результат максимальной силы резки. Ввиду того, что, в представленных зависимостях, сечение заготовки характеризуется только площадью без учета ее формы и расположения на стеллаже резки. Однако, экспериментально установлено [1,3,4], что заготовки, даже с одинаковой площадью поперечного сечения и одинаковой формы (например, квадрат и квадрат по диагонали), имеют различный характер изменения силы за цикл резки и разные максимальные значения силы. Следовательно, отличаются и объемы, затрачиваемой на разделение энергии, что обуславливает необходимость дополнительного уточнения существующей методики.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является установление влияния формы разрезаемого сечения и относительного направления реза на эффективность разделительной операции, определяемой суммарной работой резки при обработке сложнопрофильного металлопроката сортовыми ножницами.

Основной материал исследования. Теоретические исследования технологии и оборудования процесса резки металла на сортовых ножницах базируются на одномерной математической модели процесса поперечной резки параллельными и фасонными ножами сложнопрофильного металлопроката в горячем и холодном состоянии. Модель основана на численном рекуррентном решении конечно-разностной формы статического равновесия по определению геометрических характеристик и энергосиловых параметров выделенного элементарного объема очага резки [3].

Формулы для определения силы резки P в зависимости от перемещения y режущего инструмента ножниц представлены в следующем виде [3]:

– для резки квадрата $H \times H$ параллельными ножами:

$$P(y) = \tau_{\max} \left(\frac{y}{\varepsilon_s \cdot H} \right)^{n_s} \left(1 - \frac{y}{H} \right) \cdot H^2 \quad (1)$$

– для резки квадрата по диагонали фасонными (фигурными) ножами:

$$P(y) = 2 \int_0^{x_0} \tau_{\max} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{0x}} \right)^{n_0} (\sqrt{2H - 2x - y}) dx \quad (2)$$

– для резки круга диаметром D фасонными (дугowymi) ножами:

$$P(y) = 2 \int_0^{x_0} \tau_{\max} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{0x}} \right)^{n_0} (\sqrt{D^2 - 4x^2 - y}) dx \quad (3)$$

где τ_{\max} , $\tau_{\max,x}$ – соответственно, максимальное сопротивление срезу для разрезаемого материала и максимальное сопротивление срезу по сечению заготовки на расстоянии x от оси симметрии;

x_0 – координата (расстояние от оси симметрии), при которой заканчивается сплошность металла разрезаемого сечения;

ε_{0x} – относительное внедрение до скола для разрезаемого материала, применимо только для плоских параллельных ножей;

ε_x – относительное внедрение ножей в металл при суммарном смещении ножей y для элементарного объема, расположенного на расстоянии x от оси симметрии заготовки;

ε_{0x} – относительное внедрение ножей до скола в зависимости от текущей толщины сечения заготовки и угла раскрытия режущих кромок ножа α ;

n_0 – степенной показатель, характеризующий форму распределения $\tau_{\max,x}$

Приведенные выражения могут быть использованы для определения суммарной работы $A_p = \int P(y) dy$ резки заготовки сортовыми ножницами [5].

Интегрирование выражений (2) и (3) в аналитическом виде представляется громоздким, поэтому использовалось численное решение. Программная реализация решения осуществлялась в среде программы MatCad. В качестве примера результатов численной реализации рассмотренной математической модели ниже приведены результаты расчета для свинцовых заготовок с пределом прочности $\sigma_p = 25$ МПа и относительным внедрением до скола $\varepsilon_{0x} = 0,8$ [3].

Расчетные зависимости силы резки квадратной заготовки сечением 10×10 мм из свинца марки С1 параллельными и фасонными ножами, а также цилиндрического профиля $\varnothing 12$ мм дугowymi (фигурными) ножами в зависимости от хода ножа представлены на рисунке 1.

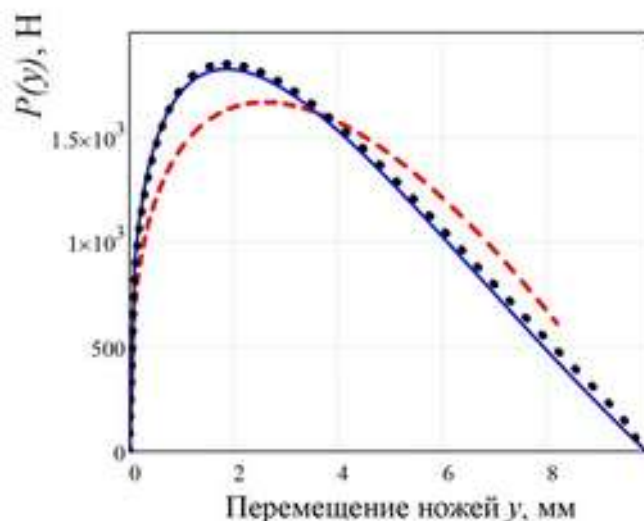


Рисунок 1. Зависимости силы резания от перемещения ножа через заготовку в случае резки квадрата 10×10 мм плоскими (---), фасонными (—) ножами и резания цилиндрического профиля $\varnothing 12$ мм дуговыми (••••) ножами

Предварительная оценка адекватности предложенной методики выполнялась путем сопоставления максимальных сил резки F_{\max}^2 квадратной заготовки плоскими ножами, полученных в ходе моделирования и вычисленных по формуле Королева А.А. (4) при следующих значениях [2]: коэффициент k_1 , характеризующий отношение максимального сопротивления срезу к пределу прочности ($\sigma_s = 25$ МПа), для пластичных материалов равен $k_1 = 0,6$, коэффициенты учета влияния затупления ножей ($k_2 = 1,2$) и увеличения бокового зазора между ножами ($k_3 = 1,25$), величина относительного внедрения ножей в заготовку $\epsilon_n = 0,25$, высота сечения заготовки $h = 10$ мм:

$$P_{\max} = k_1 k_2 k_3 \sigma_s (1 - \epsilon_n) h^2 \quad (4)$$

$$P_{\max} = 0,6 \cdot (1,15 \dots 1,25) \cdot (1,2 \dots 1,3) \cdot 25 (1 - 0,25) 10^2 = 1690 \text{ Н}$$

Можно констатировать, что в случае разделения квадратной заготовки плоскими (параллельными) ножами, полученные максимальные значения силы реза (1668 Н) незначительно отличаются от результатов, вычисленных по формуле (4), отклонение составило $1690 - 1668 = 22$ Н (около 1%). Однако в остальных случаях, при обработке фасонными ножами квадрата и круга, результаты вычисления максимальной силы резания значительно отличаются и достоверность их можно подтвердить только экспериментальным путем.

В качестве экспериментальной установки для исследования распределения силы резки при разделении квадратной и круглой заготовок использовался лабораторный гидравлический пресс ПГ-100 кафедры “Машины метал-

лургического комплекса” Донбасского государственного технического университета. Лабораторная установка ножниц (рис. 2) включала специальный контейнер (матрицу) в котором размещалась разрезаемая заготовка, закрепляемая от смещения и сдвига установочными винтами (моделирующими прижим). В пазах контейнера располагался верхний подвижный нож. Роль нижнего (несъёмного) ножа выполняла грань нижней части расточки контейнера. В качестве верхнего ножа использовались плоский прямой и фасонный ножи. Вдоль рабочей части фасонного ножа были выполнены расточки для отрезки круглой заготовки и квадратной заготовки в положении “на ребро”. Плоские ножи использовались только для поперечной резки квадрата вдоль его стороны. Экспериментальную силу резки заготовок лабораторными ножницами определяли как результирующую от давления жидкости в гидроцилиндре пресса (табл. 1). Давление в гидросистеме измеряли с помощью манометров, показания которых синхронизировались с ходом (внедрением) верхнего ножа в заготовку и дискретно фиксировалась. В качестве образцов для опытов использовались заготовки квадратного сечения размерами $H \times H = 10 \div 25 \times 10 \div 25$ мм; материал заготовки – свинцовый сплав С1. Величина коэффициента относительного внедрения ножей до скола для условий эксперимента составила: $\epsilon_{\text{н}} = 0,895 \dots 0,901$ – при использовании параллельных ножей и $\epsilon_{\text{н}} = 0,75 \dots 0,8$ – при разделении фасонными ножами.



Рисунок 2. Установка для резки заготовок на гидравлическом прессе

Для удобства сравнения и оценки адекватности результаты резки профилей плоскими и фасонными ножами представлены в таблице 1.

Анализируя полученные результаты для квадратных свинцовых заготовок следует отметить, что большие по величине значения силы резки соответствуют разделительным операциям, реализованным на ножницах с фасонными ножами. При резке квадрата $10,2 \times 10,2$ мм прямыми параллельными ножами максимальное значение экспериментальной силы составило 1824 Н, теоретическое, определяемое по формуле (1) – 1734 Н (расхождение составило 4,93%). В случае порезки квадрата $10,2 \times 10,2$ мм фасонными ножами максимальное значение экспериментальной силы резки, определяемое аналитической зависимостью (2) составило 1898 Н, что соответствует полученному экспериментальному значению.

Вычисление по зависимости (4) максимальной силы резки для цилиндрической заготовки потребовало определения стороны эквивалентного квадрата, исходя из равенства площадей поперечного сечения разрезаемой заготовки (круг $\varnothing 12$ мм) и заменяющего ее квадрата. В этом случае расхождение между максимальным экспериментальным 1903 Н и аналитическим 1851 Н значением силы резки составило 51 Н (менее 3%), что следует считать хорошим результатом.

Немаловажным показателем процесса, определяющим его энергоэффективность, является затрачиваемая на разделительную операцию работа. Результаты вычисления суммарной работы резки A_p при разделении указанных типов профилей плоскими и фасонными ножами представлены в таблице 1.

Таблица 1. Максимальные значения экспериментальной и теоретической силы разделения профилей плоскими и фасонными ножами

№ п/п	Разрезаемый профиль	Эксперимент, кН	Расчетные параметры					
			Сторона эквивалентного квадрата, мм	Сила резки по формуле (4), Н	Погрешность, %	Сила резки по разработанной методике [3], Н	Погрешность, %	Суммарная работа резки A_p , Дж
1	Квадрат $8,8 \times 8,8$ мм*	1266	8,8	1309	3,32	1295	2,29	9,33
2	Квадрат $8,8 \times 8,8$ мм	1428	8,8	1309	8,33	1419	0,63	9,56
3	Квадрат $10,2 \times 10,2$ мм*	1824	10,2	1759	3,56	1734	4,93	10,82
4	Квадрат $10,2 \times 10,2$ мм	1898	10,2	1759	7,32	1898	0	11,08
	Круг $\varnothing 12$ мм	1903	10,63	1907	0,21	1851	2,73	11,38

* Плоские (параллельные) ножи

Таким образом, сила резания, рассчитанная на основе предложенной методики с допустимым отклонением менее 5% (табл. 1) соответствует экспериментальным данным. Это позволяет рекомендовать ее использование в теории и практике моделирования подобных разделительных процессов.

Выводы

Представленные результаты позволят расширить теоретические и практические представления о процессе резки фасонных заготовок и упростят проведение инженерных и технологических расчетов, требующих определения предельных нагрузок на оборудование.

Список литературы

- [1] *Соловцов С. С.* Безотходная резка сортового проката в штампах. – М.: Машиностроение, 1985. – 175 с.
- [2] *Королев А. А.* Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с.
- [3] *Петров П. А.* Обоснование параметров и совершенствование конструкции ножей поперечной резки сортового проката: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Петров Павел Александрович; ГОУ ВПО «ДонНТУ» - Донецк, 2018. - 210 с.
- [4] *Ульяницкий В. Н.* Влияние формы сечения и расположения сортового металлопроката на энергосиловые параметры резки фасонными ножами / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров // Вестник ДонНТУ. Специальный выпуск «Металлургические процессы и оборудование». – 2016. – № 4 (4). – С. 45–49.
- [5] *Петров П. А.* Разделительные операции в прокатном производстве и оценка их энергоэффективности // Современная металлургия нового тысячелетия: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 23-25 ноября 2016 г. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. – С. 226–230.

УДК 669.162.1 674.8

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЕ ДРЕВЕСНОЙ ЩЕПЫ

Михайлов В. Г.¹, Мещеряков Н. С.¹, Ким Д. С.¹

¹ ПАО «НЛМК», г. Липецк, Россия

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF USING WOOD CHIPS IN AGGLOMERATION CHARGE

Valentin Mikhailov¹, Nikolai Meshcheriakov¹, Dmitrii Kim¹

¹ PJSC NLMK, Lipetsk, Russia

Аннотация: в лабораторных условиях провели эксперименты по оценке возможность применения в агломерационном процессе древесных отходов (щепы), её влияния на показатели спекания и качество агломерата, а также коэффициент замены коксовой мелочи.

Ключевые слова: агломерация, ресурсосбережение, древесная щепа, газопроницаемость аглошихты.

Abstract: in laboratory conditions, experiments were conducted to evaluate the possibility of using wood waste (wood chips) in the sintering process, its effect on sintering performance and sinter quality, as well as the coefficient of replacement of coke breeze.

Key words: agglomeration, resource saving, wood chips, sinter charge gas permeability.

Введение

В настоящее время мир вступил в эпоху глобального потепления, в период 1880–2012 годов средняя температура повысилась на 0,85 °С [1]. Одной из основных причин считается антропогенный фактор, а именно – выброс предприятиями, сельским хозяйством, свалками и транспортом парниковых газов. Согласно государственному докладу [2] в 2018г были зафиксированы очередные максимальные уровни концентрации диоксида углерода в атмосфере северных широт–среднегодовое превысило 410 млн⁻¹, а максимальное за год (с марта по май, в ноябре и декабре) превысило 415 млн⁻¹.

Постановлением правительства [3] было принято к руководству Парижское соглашение, стратегической целью которого является удержание прироста глобальной средней температуры к концу XXI века в пределах «намного ниже» 2 градусов Цельсия сверх доиндустриальных показателей и «приложение усилий» в целях ограничения роста температуры на уровне 1,5 градуса Цельсия. Одним из направлений по снижению эмиссии парниковых газов является вовлечение в переработку различных видов биотоплива. Биоэнергети-

ческие культуры способны уменьшить и компенсировать выбросы парниковых газов, непосредственно устранив из воздуха двуокись углерода в процессе своего роста и накапливая его в своей биомассе и почве.

В металлургии биотопливо применяется крайне ограничено. В качестве примера можно привести использование в ферросплавном производстве древесной щепы (практика ПАО «НЛМК») и древесного угля [4], вдувание пылеугольного древесного угля в доменные печи через фурмы [5, 6]. В агломерационном процессе прорабатывалось применение различных видов биотоплива, как правило, в лабораторных или опытно-промышленных условиях:

- торф [7, 8, 9];

- отходы сельского хозяйства и пищевой промышленности (фисташки, рисовая шелуха, скорлупа грецкого ореха, лузга подсолнечника и т.д) [10, 11, 12, 13];

- древесные отходы [14] и древесный уголь [15].

Применение биотоплива в агломерационном производстве сдерживается его низкой теплотворной способностью и низкой насыпной плотностью, что в итоге негативно сказывается на выходе годного агломерата и производительности. Однако экологическая и в отдельных случаях экономическая составляющая возвращают исследователей к данной проблематике.

1 Материалы и методы исследования

Исследования по спеканию агломерационной шихты проводили на агломерационной чаше диаметром 220/250 мм (низ/верх) при высоте спекаемого слоя 500 (в отдельных опытах 530 мм) с использованием постели толщиной 30 мм. Агломерационная чаша оборудована приборами для контроля температуры и разрежения в вакуум камере, количества отходящих газов и их компонентного состава. Зажигание осуществляется продуктами сгорания природного газа (1100 °С) в течение 120 с.

Контроль влажности окомкованной шихты проводится в соответствии с ГОСТ 12764-73, контроль крупности окомкованной шихты и готового агломерата – ГОСТ 27562-87, прочность готового агломерата – ГОСТ 15137-77. Выход годного агломерата определялся по соотношению фракции -5 мм к общей массе спека после дробления в щековой дробилке с размером щели 40 мм. Разрежение в процессе спекания поддерживали на одном уровне – 100-105

бар. Продолжительность спекания отмеряли от момента начала зажигания до достижения максимальной температуры отходящего газа и резкого снижения содержания CO_2 в отходящем газе.

Технологические показатели при спекании на агломерационной чаше оценивали по следующим выражениям:

- выход годного агломерата, %:

$$ВГ = \frac{m_{год}}{m_{спек}} 100\%, \quad (1)$$

- вертикальная скорость спекания, мм/мин:

$$V_{cn} = \frac{H}{\tau}, \quad (2)$$

- валовая удельная производительность по годному, $\text{т/м}^2 \cdot \text{ч}$:

$$q_{уд} = 1,382 \frac{m_{год}}{\tau}, \quad (3)$$

где $m_{год}$, $m_{спек}$ – масса годного агломерата и спека, соответственно, кг; H – высота спекаемого слоя, мм; τ – продолжительность спекания, мин.

Для исследования была подготовлена древесная щепа различной крупности (0-20 мм; 0-40 мм; 0-70 мм) из сухого соснового бруса (рис. 1а). Щепа имеет вытянутую форму, один из геометрических размеров в 5-10 раз превышает 2 других. Древесная щепа фракции 0-70 мм и 0-40 мм имеет насыпную плотность $0,192 \text{ т/м}^3$, а фракции 0-20 мм – $0,22 \text{ т/м}^3$. Удельная теплота сгорания древесины (сосна) составляет $19,8 \text{ кДж/кг}$.

Подготовка шихтовых материалов включала в себя следующие операции:

- подготовку по крупности (возврата 0-5 мм; железная руда 0-8 мм; известняк и доломит 0-3 мм; известь 0-5 мм);

- формирование единой железорудной смеси на все серии спеканий. В состав ЖРС входит, %: концентрат железорудный – 77; руда железная – 9,5; скрап стальной – 1,7; окалина – 2,5; пыль колошниковая – 0,4; сталеплавильный шлак – 3; известь – 5,6;

- отдельную навеску топлива двух фракций 0-0,5 мм и 0,5-3 мм в соотношении 30:70 на каждое спекание и последующее тщательное их смешивание.

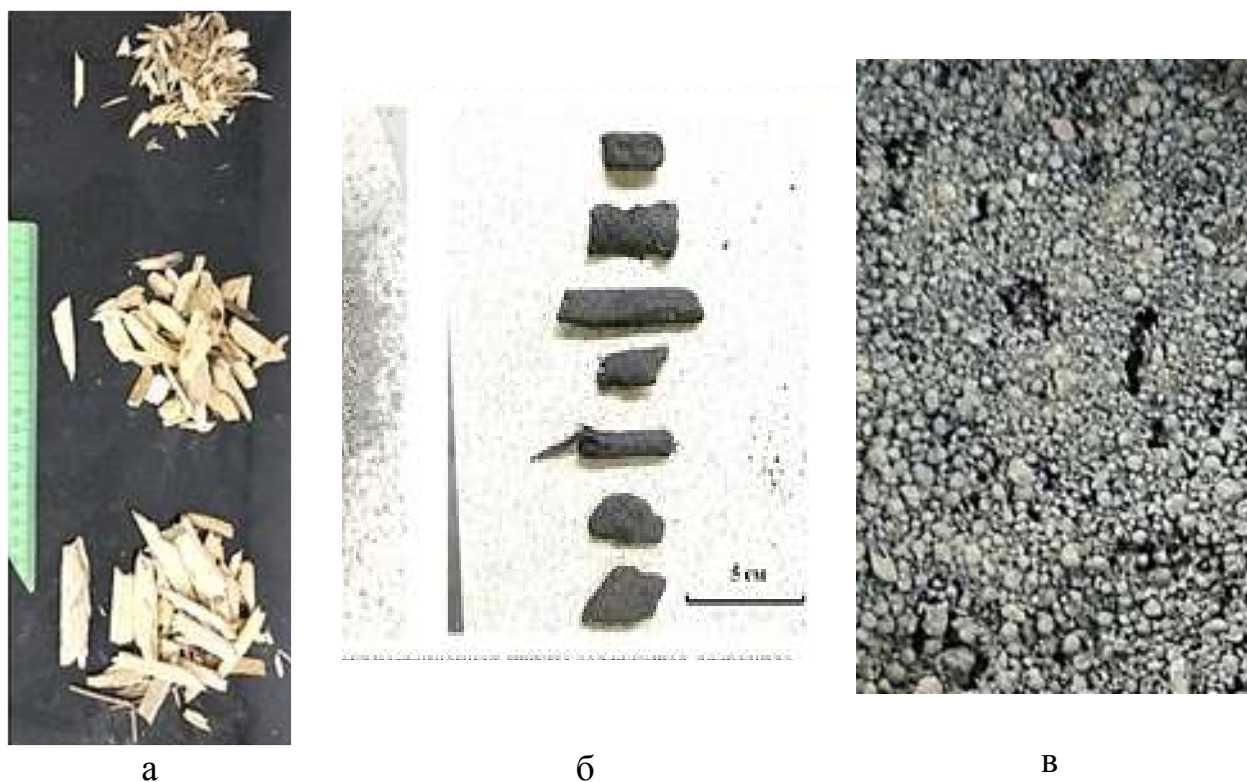
Навешенные материалы (ЖРС 56,6-56,9 %, сырые флюсы 12,7-12,9 %; возврат 26,7-26,9 %; кокс 3,14-3,17 %; щепа 0-1 %) смешивались в интенсивном смесителе и увлажнялись до 6-7 %. Окомкование проводилось в тарельчатом грануляторе, куда подавали тонкораспылённую воду из расчёта получения влажности около 8-8,5 %.

2 Результаты лабораторных исследований

2.1 Смешивание и окомкование

Сухая древесная щепа плохо смешивается с компонентами агломерационной шихты и располагается поверх материалов, уже в процессе окомкования она увлажняется и на неё накатываются мелкодисперсные материалы (в основном железорудный концентрат).

Среднегармонический диаметр окомкованной шихты при использовании щепы несколько возрастает (с 2,47 до 2,61 мм) за счёт увеличения количества крупных (более 5 мм) гранул, центрами которых служат куски древесной щепы. Насыпной вес окомкованной шихты снижается на 4,3 %, а влажность увеличивается на 0,2 % (абс.)



а – древесная щепа различных фракций 0-20 мм; 0-40 мм; 0-70 мм (сверху вниз);
б - древесная щепа с накатанным железорудным материалом; в - крупные каверны на месте
выгорания частиц щепы

Рисунок 1. Изменение внешнего вида древесной щепы в процессе окомкования и спекания

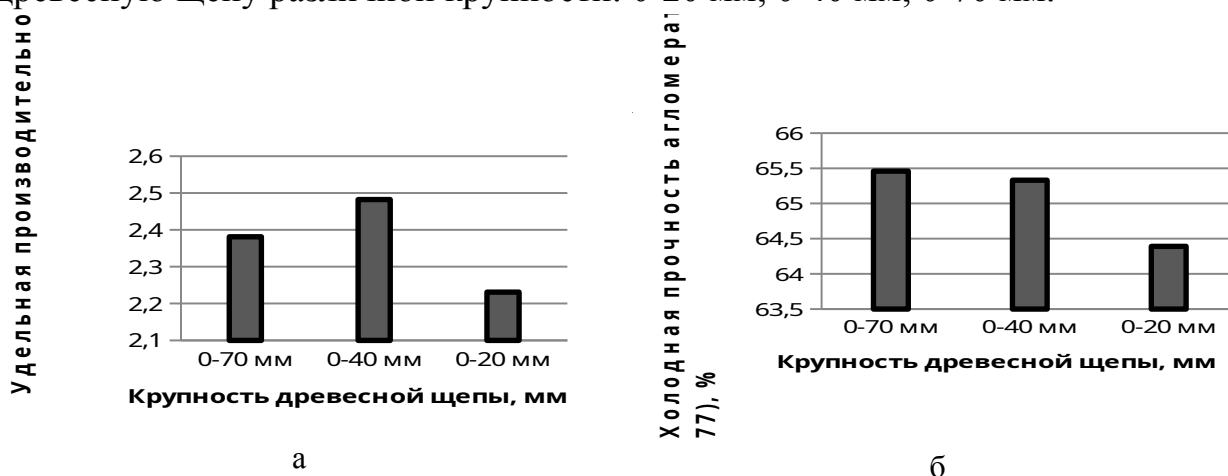
Введение щепы оказывает некоторое влияние на процесс окомкования, а именно:

-требуется больше воды на окомкование, т.к. сухая щепа активно впитывает влагу;

- более равномерно распределяется влага по объёму, т.к. щепа может устранять локальное переувлажнение, впитывая избыток воды.

2.2 Изучение влияния крупности щепы на показатели спекания

В лабораторных условиях из одного соснового бруса приготовили древесную щепу различной крупности: 0-20 мм; 0-40 мм; 0-70 мм.



а – удельная производительность; б – холодная прочность агломерата
 Рисунок 2. Изменение показателей спекания и качества агломерата в зависимости от крупности древесной щепы

Полученные результаты спеканий (рис.2) показывают, что наиболее оптимальным вариантом является применение в агломерационной шихте древесной щепы крупностью 0-40 мм. Следует также отметить, что снижение верхнего предела крупности древесной щепы до 20 мм оказывает существенно более негативное влияние (снижается выход годного на 1,5 %, а вертикальная скорость спекания на 7%), чем увеличение верхнего предела до 70 мм (выход годного практически не изменяется, вертикальная скорость спекания снижается на 5 %).

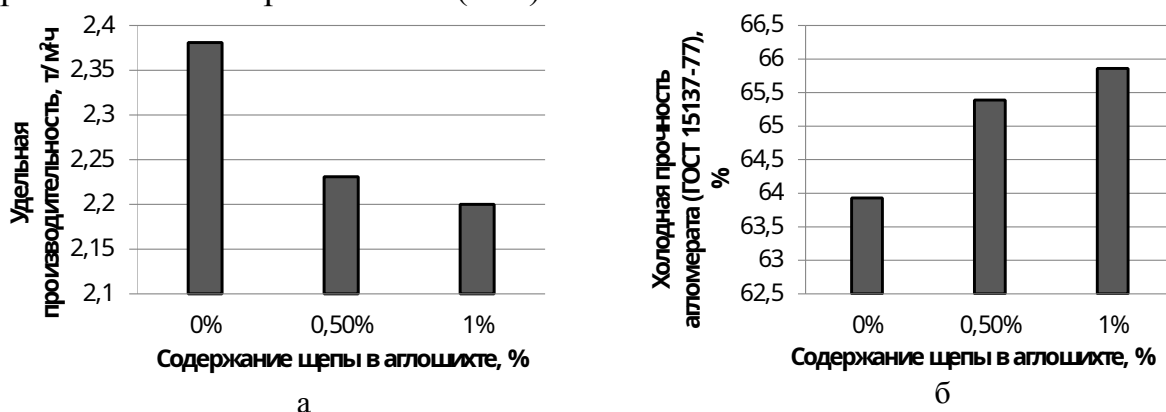
Полученная закономерность связана, по всей видимости, с закатыванием мелких частиц щепы и неполным их сгоранием. Ранее проведенные эксперименты с древесными опилками также показали негативный результат, что подтверждает необходимость ограничения содержания мелких фракций в древесных отходах, применяемых в агломерации.

2.3 Оценка возможности применения древесной щепы в качестве дополнительного топлива

Исходя из возможных объёмов поставки, содержание древесной щепы в аглошихте не превышало 1 % от массы шихты, что соответствует расходу 14 кг

агломерата. Древесную щепу вводили в состав аглошихты таким образом, чтобы происходило снижение содержания всех прочих компонентов.

Изменение показателей спекания и качества агломерата представлено на рис. 3. Как и ожидалось, использование древесной щепы в количестве до 1 % повышает скорость спекания до 14 %, снижает выход годного до 8 %, снижает на 4-5 % массу спека и в результате существенное падение производительности - на 6-8 %. При этом происходит уменьшение размера куска годного агломерата с 15,6 до 14,3 мм (среднегармонический диаметр) и ощутимый рост холодной прочности агломерата на 2 % (абс.).



а – удельная производительность; б – холодная прочность агломерата

Рисунок 3. Изменение показателей спекания и качества агломерата в зависимости от содержания щепы в шихте

Добавка древесной щепы позволяет повысить вертикальную скорость спекания за счёт следующих факторов:

1) щепки выполняют ту же функцию, что и крупные частицы руды или возврата – повышают газопроницаемость спекаемого слоя в зоне переувлажнения и зоне сушки, т.е. там, где происходит разрушение гранул окомкованной шихты. Щепки «армируют» слой, не давая ему переуплотниться и ухудшать газопроницаемость;

2) щепки выгорают быстрее и несколько раньше (температура воспламенения около 250-300 °С), чем кокс (температура воспламенения около 700-900 °С), формируя пустоты (рис. 1в) которые повышают количество проходящего через слой газа, тем самым повышая вертикальную скорость спекания.

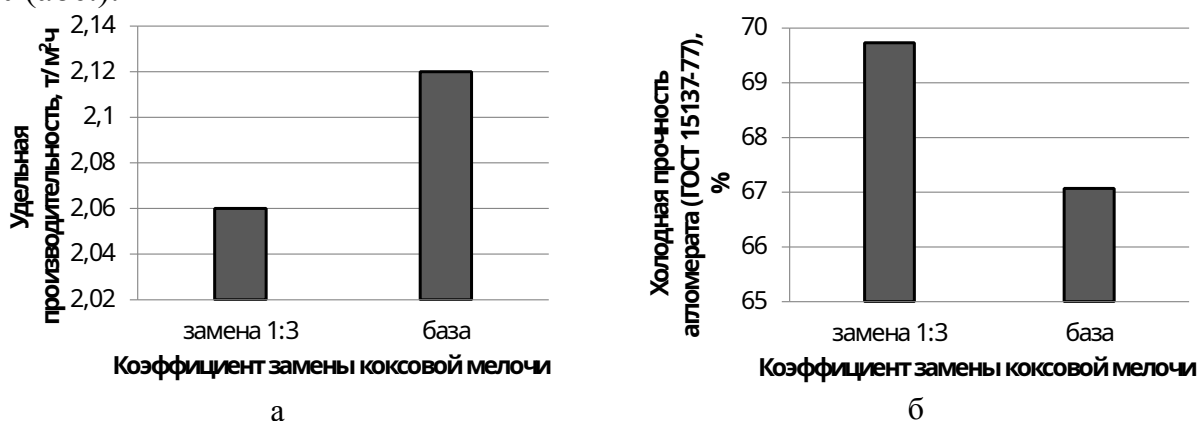
Основным негативным фактором является снижение производительности, что связано со снижением насыпной плотности шихты на 2,4-4,6 %. Снижение насыпной плотности на 4 % при неизменной высоте спекаемого слоя приводит

к уменьшению массы шихты загружаемой на одну паллету на 0,24 т (для агломашины АКМ-312) и, соответственно, снижению массы спека. Кроме того, уменьшается выход спека за счёт практически полной газификации щепы.

Согласно расчётам компенсировать снижение массы спека при использовании древесной щепы можно повысив на 20-25 мм высоту спекаемого слоя. В лабораторных спеканиях масса спека полученного из базовой шихты (без щепы) при высоте слоя 500 мм составила – 41,2 кг, масса спека из шихты содержащей 1 % щепы при высоте слоя 530 мм – 41,88 кг.

2.4 Определение коэффициента замены коксовой мелочи на древесную щепу

Проведённые лабораторные спекания показали, что коэффициент замены коксовой мелочи на древесную щепу, исходя из условия сохранения холодной прочности агломерата, должен быть 1:3 (по массе). При этом наблюдается прирост вертикальной скорости спекания на 2,5 % и снижение выход годного на 3 % (абс.).



а – удельная производительность; б – холодная прочность агломерата

Рисунок 4. Изменение показателей спекания и качества агломерата при замещении кокса древесной щепой (высота спекаемого слоя 530 мм, содержание древесной щепы 1%)

Замена кокса на древесную щепу в соотношении 1:3 позволяет повысить прочность агломерата и вертикальную скорость спекания, при этом производительность снижается из-за падения выхода годного агломерата и насыпной плотности аглошихты.

2.5 Оценка влияния на химический состав агломерата

Изменение химического состава агломерата при использовании древесной щепы происходит только по содержанию FeO. В случае применения древесной

щепы как дополнительного топлива FeO увеличивается на 0,5 %, при замещении коксовой мелочи – снижается на 0,4 %.

Выводы

1. Оптимальная крупность древесной щепы – 0-40 (70) мм. Сухая древесная щепа имеет низкую насыпную плотность 0,19-0,22 т/м³ и плохо смешивается с компонентами аглошихты. Целесообразно подавать древесную щепу в железорудный штабель совместно с материалом, имеющим высокую влажность (железорудный концентрат, металлургические отходы).
2. В ходе окомкования негативного влияния щепы не обнаружено, на поверхность щепы накатывается концентрат толщиной до 2-3 мм. Среднегармонический диаметр окомкованной шихты увеличивается на 0,1-0,2 мм (3-6 %). При использовании сухой древесной щепы увеличивается расход воды на окомкование.
3. Применение древесной щепы в качестве дополнительного топлива (расход до 14 кг/т агломерата) позволяет увеличить вертикальную скорость спекания до 14 % и повысить холодную прочность агломерата до 2 %. Однако, вследствие снижения насыпной массы шихты на 2,4-4,6 % и снижении выхода годного на 4-8 % происходит снижение производительности на 6,3-7,6 %.
4. Коэффициент замены коксовой мелочи древесной щепой составляет 1:3.
5. Изменение химического состава агломерата при использовании древесной щепы происходит только по содержанию FeO. В случае применения древесной щепы как дополнительного топлива FeO увеличивается на 0,5 %, при замещении коксовой мелочи – снижается на 0,4 %.

Список литературы

- [1] Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Официальный сайт ООН. - Режим доступа URL: <https://www.un.org/ru/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.
- [2] Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году". Официальный сайт министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации Режим доступа URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okrzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/
- gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okrzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2018_/.
- [3] Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2019 г. № 1228. Режим доступа URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/>.

- [4] Monsen B., Tangstad M., Midtgaard, H. Use of charcoal in silicomanganese production Режим доступа URL: https://www.researchgate.net/publication/242591146_USE_OF_CHARCOAL_IN_SILICOMANGANESE_PRODUCTION.
- [5] Cristobal Feliciano-Bruzual. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO2 reduction potential and economic prospects // Journal of Materials Research and Technology (JMRT) vol 3. June-September 2014. p. 233-243. Режим доступа URL: <https://jmrt.com.br/en-charcoal-injection-in-blast-furnaces-articulo-S2238785414000489>.
- [6] Injection of solid biomass products into the blast furnace and its potential effects on an integrated steel plant / Chuan W., Jonas L., Leif N., Pelle M. // Energy Procedia vl 61. December 2014. p. 2184-2187. Режим доступа URL: <https://www.researchgate.net/publication/271721756>
- [7] Исследование процесса спекания агломерата с повышенным содержанием техногенных железобитуминозных отходов и различного твердого топлива в аглошихте / А.С. Нестеров, А.Д. Джигота, В.С. Якушев, Л.И. Гармаш // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровськ.: ІСМ НАН України, 2010. Вип. 21. С. 88-96. Режим доступа URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/63125/07-Nesterov.pdf?sequence=1;88>.
- [8] Способ производства агломерата для доменной плавки: пат. 2418079 С2 RU, МПК С22В 1/16 / М.А. Гуркин, М.С. Табаков, В.Н. Логинов, Е.А. Кашкаров и др. - № 2009125834/02: заявл. 2009.07.06; опубл. 2011.05.10.
- [9] Лесун Б.В. Рациональное использование местных минеральных ресурсов Горная механика и машиностроение 2014 №3 С. 47-55. Режим доступа URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/18929/%20.%2047-55.pdf?sequence=1>
- [10] Study of biomass utilisation in the iron ore sintering / Kieush L., Yaholnyk M., Boyko M., Koveria A., Ihnatenko V. // Acta Metallurgica Slovaca, Vol. 25, 2019, No. 1, p. 55-64. Режим доступа URL: <http://www.qip-journal.eu/index.php/ams/article/view/1225/1081>
- [11] Zandi M., Martinez-Pacheco M., Fray T. Biomass for iron ore sintering / Minerals Engineering Volume 23, Issue 14, November 2010, Pages 1139-1145. Режим доступа URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.010>
- [12] Jun-Ling Dong. Study on applicability of biomass in iron ore sintering process / Renewable and sustainable energy reviews. Volume 80, December 2017, Pages 399-407 Режим доступа URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.246>
- [13] Биотопливо в агломерационном процессе / Михайлов В.Г. [и др.] // Сб. научных трудов. Современная металлургия нового тысячелетия. Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. 2016. С. 132-137.
- [14] Findorák R., Fröhlichová, M., Legemza J. Effect of saw-dust addition from pine and oak wood on iron-ore sintering performance. / Conference: 14th SGEM GeoConference on SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING P. 973-980. Режим доступа URL: https://www.researchgate.net/publication/291064871_The_effect_of_saw-dust_addition_from_pine_and_oak_wood_on_iron-ore_sintering_performance
- [15] Стеблецов М.С., Прохорова Т.В., Михайлов В.Г. Первый опыт применения древесного угля в агломерационном процессе // Металлургия и химия. Тенденции развития современной науки. Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 14-18 апреля 2018 г. 2018. Издательство: Липецкий государственный технический университет (Липецк) С.189-191

УДК 669.162.2

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ УЧАСТКА ПОДГОТОВКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ К ЗАГРУЗКЕ НА КОЛОШНИК ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Кузьмин А. Ю.¹, Жильцов А. П.¹

¹ *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF THE SET OF EQUIPMENT OF PREPARATION AREA OF THE CHARGING MATERIALS TO LOAD ON THE TOP OF A BLAST FURNACE

Artem Kuzmin¹, Alexander Zhiltsov¹

¹ *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

Аннотация

Рассмотрена общая схема подготовки шихтовых материалов к загрузке на колошник доменной печи. Выявлены узкие места. На основе предложенных критериев разработаны и обоснованы варианты компоновочных решений по типам, количеству агрегатов и их взаимному расположению.

Ключевые слова: *оборудование, загрузка шихты, доменная печь, производительность, сортировка*

Abstract

The general scheme of preparing charge materials for loading onto the top of a blast furnace is considered. Bottlenecks is identified. Options for layout decisions are developed and based on the proposed criteria, sorted by types, number of units and their relative positioning.

Key words: *equipment, charge loading, blast furnace, productivity, screening*

Введение

Эффективность работы современных доменных печей (ДП) определяется рядом основных показателей: производительность, интенсивность плавки, удельный расход топлива и других шихтовых материалов, себестоимость чугуна. Эти показатели достигаются применением комплекса различных применяемых технологий: использованием пылеугольного топлива (ПУТ) [1,2], эффективностью дутьевых параметров как средства интенсификации доменной плавки [3], распределением газа и шихты в рабочем пространстве доменной печи [4], и др. При этом суточная производительность ДП, определяемая количеством выпусков чугуна за сутки с учетом коэффициента использования полезного объема (КИПО) и собственно полезного объема ДП, напрямую связана с эффективностью работы комплекса оборудования для транспортирования, временного хранения и подачи шихтовых материалов на колошник ДП. Важно отметить, что существенным фактором повышения эффективности доменного

процесса является совершенствование систем шихтоподготовки в доменном производстве [5].

Комплекс шихтоподготовки, в общем случае включающий в себя бункера, сортировочное, весовое и конвейерное оборудование, промежуточные воронки и оборудование для подачи материалов на колошник доменной печи, обеспечивает необходимую интенсивность подачи с дозированием по весу шихтовых материалов (агломерата, окатышей, добавок) и топлива (кокса) посредством скипового подъемника или главного конвейера на колошник доменной печи. Все технологические операции данного процесса взаимосвязаны и обусловлены временной последовательностью работы оборудования с учетом энергосиловых, скоростных параметров и принятых проектно-планировочных решений по количеству агрегатов и их взаимному расположению. Упрощенная схема типового объемно-планировочного решения комплекса показана на рисунке 1.

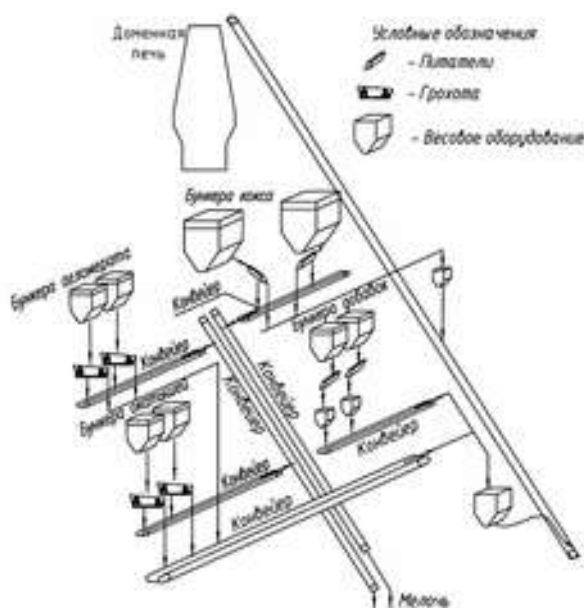


Рисунок 1. Упрощенная схема типовой планировки расположения оборудования участка загрузки.

Анализ и разработка вариантов объемно-планировочных решений

Анализ работы комплексов оборудования участков подготовки шихтовых материалов показывает, что при росте производительности доменной печи за счет внедрения современных технологий, требуется повышение интенсивности подготовки и подачи шихтовых материалов, т.е. применения новых обосо-

ванных проектно-планировочных решений по комплексу оборудования участков. Это возможно при совместном рассмотрении требований, вариантов компоновок с учетом ограничений (узких мест), выборе рационального решения с учетом обоснованных критериев и оценке эффективности выбора, удовлетворяющего требованиям.

Общая схема разработки и выбора рационального варианта компоновочного решения представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Общая схема разработки и выбора рационального варианта

Таким образом, при различных условиях постановки задачи может быть выбрано несколько рациональных вариантов в зависимости от ограничений и более приоритетных критериев. С учетом объемно-планировочных, экономических и временных ограничений, наиболее рациональным решением может быть установка нового оборудования, что позволит повысить производительность, а также сократить простои связанные с ремонтом оборудования.

В условиях пространственных ограничений невозможно достичь решения, которое устраивает и технологический, и ремонтный персонал. Все принятые решения, которые находятся в рамках определенного объема и времени, являются компромиссными. В этом случае будет затруднено выполнение технологических требований, в том числе по количеству поступающих материалов, по соблюдению необходимых эксплуатационных параметров и показателей.

В этих условиях возможен вариант с незначительным повышением качества шихтовых материалов, подаваемых на колошник печи, за счет установки более современного сортировочного оборудования, а также некоторое увеличение запаса части материалов. При этом в условиях действующих пространственных ограничений возможно произвести модернизацию только некоторой части оборудования с установкой дополнительного бункера.

Вариант модернизации участка загрузки шихтовых материалов доменной печи с учетом вышеуказанных ограничений с установкой дополнительного бункера показан на рисунке 3.

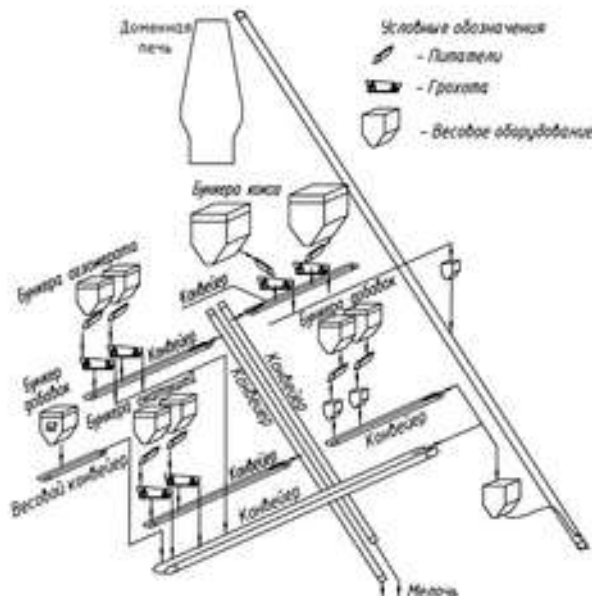


Рисунок 3. Упрощенная схема варианта №1 планировки расположения оборудования участка загрузки.

В случае отсутствия пространственных и временных ограничений возможно увеличение количества хранимых материалов за счет установки большего количества дополнительных бункеров, повышение производительности участка с применением нового конвейерного оборудования, увеличение качества шихтовых материалов, подаваемых на колошник, путем установки более совершенного сортировочного оборудования. Реконструкция большей части участка по варианту модернизации №2 позволит повысить производственные показатели как системы загрузки, так и комплекса в целом. Такой вариант приведен на рисунке 4, в котором предусмотрены установка дополнительных бункеров агломерата, окатышей, добавок, нового сортировочного оборудования, а также применение конвейеров, обеспечивающих необходимую пропускную способность.

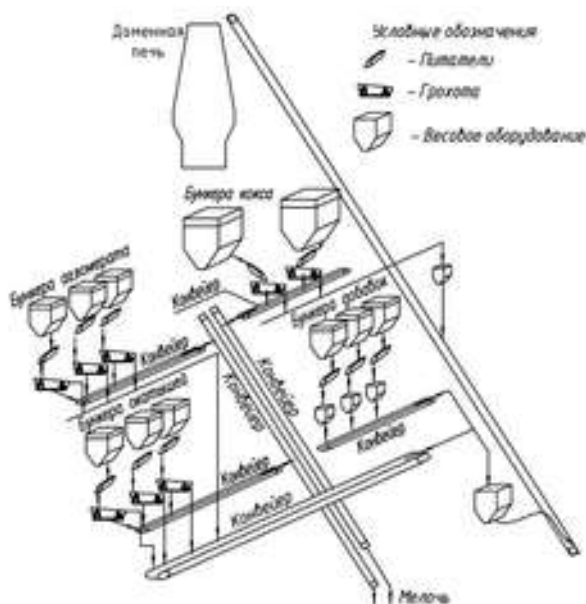


Рисунок 4. Упрощенная схема варианта №2 планировки расположения оборудования участка загрузки.

Заключение

1. Проведенный анализ вариантов обоснования решений свидетельствует, что выбор из нескольких вариантов требует комплексного подхода к анализу ситуации с учетом влияния отдельных факторов, приведенных выше.

2. При отсутствии пространственных ограничений установка дополнительных бункеров и нового сортировочного оборудования с учетом пропускной способности конвейеров позволяет повысить производственно-технологические показатели комплекса оборудования участка загрузки.

Список литературы

- [1] Черноусов П.И., Серегин С.Н., Голубев О.В. Обзор и анализ современных методик изучения полноты сгорания ПУТ в доменной печи // Черные металлы: - №3 (1047). – 2019. – с. 19-25.
- [2] Семенов, Ю.С. Эффективность реализации окружной неравномерности распределения ПУТ по воздушным фурмам доменной печи / Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, И. Ю. Семион, А. Ю. Оробцев, Е. И. Шумельчик // Черные металлы. - №10 (1054). – 2019. – с. 11-16.
- [3] Коршиков, Г.В. Оценка эффективности дутьевых параметров как средства интенсификации доменной плавки / Г.В. Коршиков, В.В. Титов, А.В. Карпов, А.В. Безгин // Вестник ЛГТУ. - №2 (36). – 2018. – с. 92-101.
- [4] Карпов, А.В. Оценка распределения материалов на колошник доменной печи / А.В. Карпов // Вестник ЛГТУ. - №3 (37). – 2018. – с. 95-101.
- [5] Вайсберг, Л.А. Совершенствование систем шихтоподготовки в доменном производстве/ Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, Г.С. Подгородецкий// Черные металлы: №8.-2017.-с.24-27.

УДК 669.18

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ КОВШЕВОГО ШЛАКА В КОНВЕРТЕРНОМ ЦЕХЕ №1 ПАО «НЛМК»

Долгих Ю. Н.¹, Шиловских О. Ю.¹, Бучек Д. Б.¹, Терехов А. А.¹

¹ ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк, Россия

THE APPLICATION OF MAGNESIUM MATERIALS FOR THE GUIDANCE OF LADLE SLAG IN THE CONVERTER SHOP №1 PJSC "NLMK"

Iurii Dolgikh¹, Oleg Shilovskih¹, Dmitry Buchek¹, Aleksandr Terehov¹

IPJSC «NLMK», Lipetsk, Russia

Аннотация: Представлены результаты опробования технологии применения магнезиальных материалов для наведения шлака в сталеразливочном ковше в Конвертерном цехе №1 (КЦ-1) ПАО «НЛМК».

Ключевые слова: доломит, ковшевой шлак, ковш-печь.

Abstract: The results of testing the technology of using magnesia materials for the formation of slag in a ladle in BOF-1 NLMK.

Key words: dolomite, slag, ladle furnace.

Введение

Одним из ключевых показателей конвертерного производства является расход огнеупоров на производство стали. Такой показатель как стойкость футеровки сталеразливочного ковша оказывает значимое влияние на себестоимость стали.

К футеровке сталеразливочных ковшей предъявляются жёсткие требования, такие как термостойкость, устойчивость против коррозионного и эрозионного разрушения расплавленным металлом и шлаком, отсутствие химического взаимодействия с реагентами, вводимыми при обработке металла на агрегатах внепечной обработки. Для таких условий наиболее оптимальным является применение периклазоуглеродистых (в шлаковом поясе) и алюмопериклазовых огнеупоров (в зоне металла).

В основном, опережающий износ футеровки наблюдается в шлаковом поясе из-за растворения в шлаке и бойных зонах из-за механического воздействия падающей струи металла.

Присадка в шлак флюсов, содержащих MgO, позволяет уменьшить агрессивное воздействие шлака на футеровку, за счёт замедления массопереноса

MgO из футеровки в шлак, а также выделения из шлака кристаллов MgO и осаждения их на поверхности футеровки.

Стандартные условия наведения шлака в КЦ-1 ПАО «НЛМК» при производстве низкоуглеродистой и углеродистой стали с последующей обработкой на установке ковш-печь (УКП) предусматривают присадку извести и плавикового шпата в соотношении 1:5 и последующую корректировку состава шлака на УКП присадкой извести и высокоглиноземистого материала.

1.1. Постановка задачи

С целью повышения стойкости футеровки сталеразливочного ковша была поставлена задача снижения агрессивного воздействия ковшевого шлака при обработке плавов на УКП.

В качестве решения задачи выбрано направление применения магнезиальных материалов для наведения ковшевого шлака при обработке на УКП.

Доступные предложения по материалам для наведения магнезиального шлака приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики магнезиальных материалов для наведения шлака в сталеразливочном ковше

	Содержание элементов/соединений в материале, %				
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO
материал 1	70-75	не более 2,0	не менее 10,0	не более 4,0	ост.
материал 2	35-38	не более 3,0	8-11	3,0-6,0	42-45
материал 3	не менее 42,0	не более 3,0	не менее 11	не более 5,0	не менее 30,0
материал 4	39-43	не более 3,0	11-15	не более 5,5	32-36
доломит ошлакованный	не более 3,0	не более 2,0	не менее 30	не более 6,5	не более 65

В результате в качестве материала для опробования был выбран доломит ошлакованный производства ПАО «НЛМК». Выбор данного вида материала был произведен исходя из его низкой стоимости и доступности, а также исходя из оптимального соотношения содержания MgO и CaO.

Проведение опытных работ

Работа по опробованию доломита в качестве материала для наведения ковшевого шлака проводилась в два этапа.

Первый этап.

Работу проводили при производстве низкоуглеродистой стали по ГОСТ 9045 и рядовой углеродистой стали по ГОСТ 1050 и ГОСТ 380.

Выплавку и внепечную обработку опытных плавков производили по стандартной технологии, при этом на УКП в начале обработки производили присадку доломита ошлакованного, затем производили усреднительную продувку аргоном с расплавлением шлака электрической дугой. На плавках с присадкой доломита пропорционально снижали расход извести на УКП.

По результатам визуальной оценки качества ковшевого шлака замечаний не выявлено. Во время проведения опытных работ не отмечено нештатных ситуаций на плавках с применением доломита.

Значимого влияния присадки доломита на параметры обработки плавков на УКП и на химический состав стали на опытных плавках не отмечено. Также не выявлено негативного влияния применения доломита на степень рафинирования шлаком металла от неметаллических включений и, как следствие, на уровень дефектности холоднокатаного проката по дефектам сталеплавильного происхождения («плена»).

По результатам химического анализа ковшевого шлака отмечено, что на опытных плавках с применением доломита массовая доля MgO в пробе шлака перед передачей плавки на УНРС увеличилась по сравнению со сравнительными плавками на 10 отн. %.

В результате проведенной работы отмечено, что предложенный режим обеспечил оптимальное с позиции минимизации износа футеровки содержание MgO в шлаке на уровне 5 - 8 %.

Оценка стойкости футеровки сталеразливочных ковшей показала, что в период максимальной доли опытных плавков в общем объеме производства отмечен рост стойкости футеровки.

Передоложенный регламент применения доломита для наведения ковшевого шлака на УКП был внедрен в серийное производство.

Второй этап.

Учитывая положительные результаты применения доломита на первом этапе, было принято решение о продолжении работ в направлении снижения агрессивного воздействия ковшевого шлака на футеровку сталеразливочного ковша.

Применение в качестве разжижающего материала плавикового шпата в составе шлакообразующей смеси (присаживаемой при выпуске плавки из конвертера) также оказывает негативное влияние на стойкость футеровки ковша. Фторид кальция, содержащийся в шлаке, растворяет магнезит футеровки, поэтому его расход должен быть минимальным. Таким образом, отказ от его применения позволит решить поставленную задачу.

Следует отметить, что отказ от применения плавикового шпата без изменения режима наведения шлака потенциально может привести к неудовлетворительному состоянию ковшевого шлака (гетерогенный шлак).

Исходя из данных заключений было принято решение об отказе от применения плавикового шпата при производстве низкоуглеродистой стали по ГОСТ 9045 и рядовой углеродистой стали по ГОСТ 1050 и ГОСТ 380 с корректировкой режима наведения шлака в сталеразливочном ковше в целом.

Режим наведения шлака в сталеразливочном ковше был скорректирован следующим образом:

- плавиковый шпат во время выпуска плавки из конвертера в сталеразливочный ковш не присаживали;
- расход извести при выпуске плавки из конвертера был снижен на 40 % (для снижения эффекта гетерогенности шлака);
- при обработке плавов на УКП необходимую толщину (объем) ковшевого шлака получали за счет присадки доломита, извести и высокоглиноземистого материала (при необходимости).

По результатам оценки основных технологических параметров производства стали отмечено, что на опытных плавках относительно сравнительных:

- расход плавикового шпата снижен на 100 %;
- расход доломита на УКП увеличен на 75 % (в качестве сравнительных плавов также выступали плавки, произведенные по 1 этапу настоящей работы);
- общий расход извести в сталеразливочный ковш снижен на 40 %;
- расход высокоглиноземистых материалов на УКП остался на сопоставимом уровне;

- перепад температуры конвертер-УКП снизился на 5-8 °С (за счет снижения массы шлакообразующих материалов, присаживаемых при выпуске плавки из конвертера) (рис.1);
- время нагрева снизилось на 0,5-1,6 мин на плавку;
- расход электроэнергии на УКП снижен на 0,2-0,5 МВт*ч (рис.2).

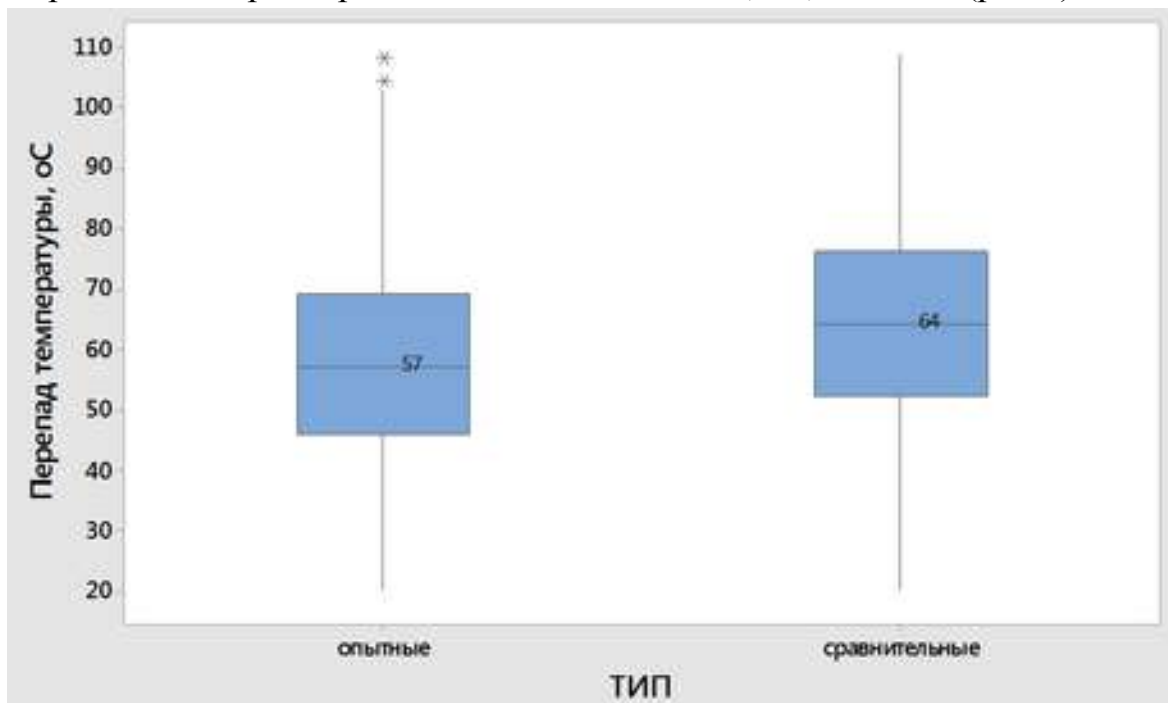


Рисунок 1. Перепад температуры металла на участке конвертер-УКП

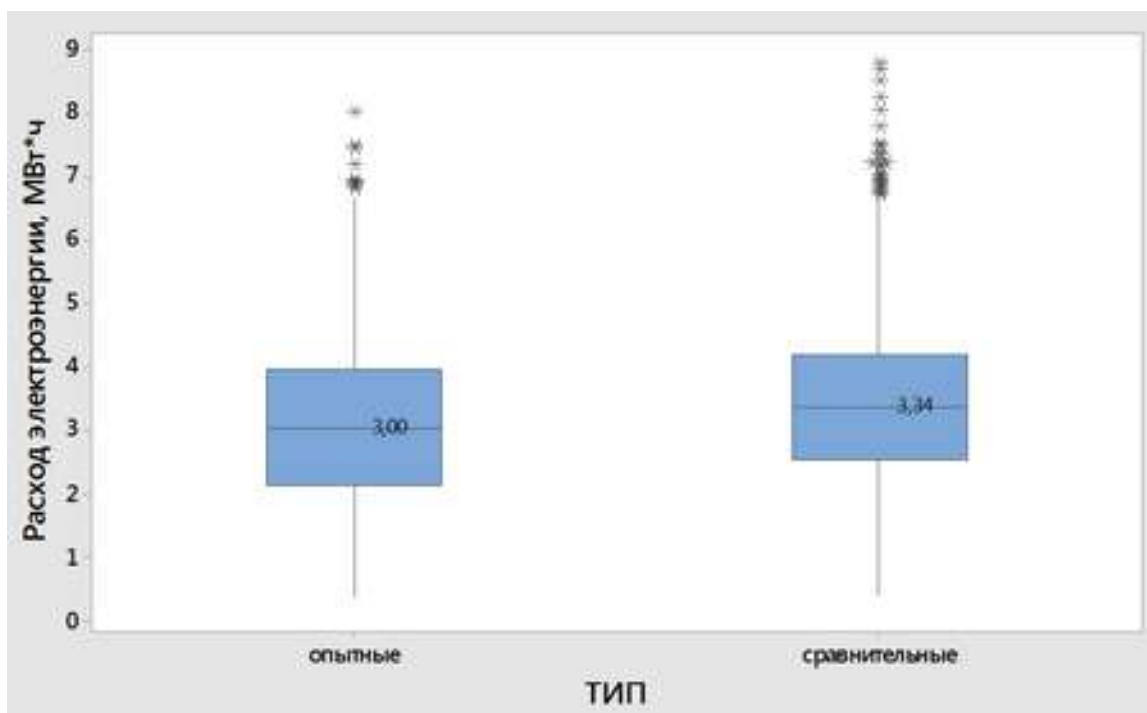


Рисунок 2. Расход электроэнергии на УКП

2. Обсуждение полученных результатов

Оценка изменения степени десульфурации металла в сталеразливочном ковше на плавках с проведением десульфурации на УКП (с раскислением шлака) влияния опытной технологии на степень десульфурации не выявлено.

Кроме того, отмечена положительная тенденция по снижению расхода электродов на УКП (за счет снижения продолжительности нагрева).

В период применения опытной технологии наведения ковшевого шлака отмечен рост стойкости футеровки сталеразливочных ковшей на 2 отн.%.

Также отмечено незначительное снижение отсортировки холоднокатаного проката по дефектам металлургического характера («плена»).

Таким образом, комплекс выполненных работ, направленных на снижение агрессивности ковшевого шлака позволил улучшить основные технико-экономические показатели плавков без ухудшения качественных характеристик готовой продукции. Данная технология внедрена в серийное производство.

УДК 669.04

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ

Жильцов А.П.¹, Соколов Д. С.¹, Костылев Д. Е.¹

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.

IMPROVING THE MAINTENANCE AND REPAIR OF EQUIPMENT OF THE ROLLING COMPLEX USING MOBILE SYSTEMS

Alexander Zhiltsov¹, Daniil Sokolov¹, Daniil Kostylev¹.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: Рассмотрены методы технического обслуживания и ремонтов оборудования для производства и отделки проката. Обоснована необходимость применения систем фиксации состояния оборудования. Показана эффективность использования мобильных систем

Annotation: The methods of maintenance and repair of equipment for the production and decoration of rolled products are considered. The necessity of using systems for fixing the state of equipment is substantiated. The effectiveness of using mobile systems is shown.

Ключевые слова: прокатное оборудование, техническое обслуживание, ремонт, мобильная система

Keywords: rolling equipment, maintenance, repair, mobile system

Введение

Реализуемая в настоящее время на металлургическом предприятии, в т.ч. в прокатных производствах система технического обслуживания и ремонта оборудования представляет собой по существу систему планово-предупредительных ремонтов и базируется на регламентах периодичности выполнения и содержание ремонтов [1].

Регламент периодичности и продолжительности ремонтов того или иного вида позволяет согласовать графики производства продукции с графиками проведения ремонтов, осуществить планирование производства запасных частей, загруженность как собственного ремонтного персонала, так и подрядных организаций, планировать бюджет на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР).

С другой стороны, реально дефекты, повреждения и отказы элементов машин могут возникать в разное время и скорость развития (увеличение) этих дефектов также различна. Поэтому в каждом конкретном случае проведения

ремонта того или иного вида фактическое техническое состояние ремонтируемой машины может быть таким, что часть запланированных к ремонту элементов машин не требуют, или часть элементов машин, не запланированных на данный ремонт, требуют ремонта.

Таким образом фактическое содержание каждого конкретного ремонта, его трудоемкость и затраты ресурсов отличается от регламентированных, «среднестатистических». В целях сокращения эксплуатационных расходов «ремонтировать необходимо только то, что нужно отремонтировать».

В этой связи целесообразным является переход от системы планово-предупредительного регламентированного, «среднестатистического» ремонта к системе ремонта по состоянию оборудования, базирующемся на контроле фактического технического состояния оборудования с использованием систем функциональной диагностики [2].

Основу систем ремонта по состоянию составляют методы и средства систематического контроля технического состояния оборудования, позволяющие оперативно обнаружить все дефекты и повреждения составных частей оборудования на начальной стадии их развития и использования результатов контроля для управления ремонтными работами [3].

Современные металлургические агрегаты представляют собой сложные механические комплексы, содержат большое число машин, механизмов, узлов и деталей, получающих в процессе эксплуатации различные дефекты и повреждения. Поэтому объём информации, характеризующей техническое состояние агрегата, чрезвычайно велик. В силу этого упорядоченное хранение, обработка, систематизация, формирование первичной ремонтной документации должны осуществляться на основе электронных баз данных и современных систем управления ими [4], например, в виде разработанного бланка в системе электронного документооборота (рис. 1) [1].

Помимо информационного аспекта, систематическое ведение базы данных, накопление систематизированной информации о дефектах, повреждениях и отказах позволяет выявить проблемные элементы оборудования, определить направления и программы повышения надежности и эффективности. В частности, широкое применение в последние годы находят различные мобильные системы, обеспечивающие накопление и оперативное использование систематизированной информации в процессе текущего технического обслуживания и ремонта оборудования [3, 5].

Работник ремонтной службы		Подразделение			Учетное		Машина		Дата	Код	
ЗАПИСЬ ВМЕШАТЕЛЬСТВА A					ТИПЫ АВАРИЙ C						
Время начала поломки	Описание (тип)	Диагностика (тип)	КТО	Какой продукт производила машина?							
Полое (запчасти) (тип)	Результат (тип)	Запчасть (тип)	КОГДА	Когда возникла проблема?	При запуске	При выключении	Во время работы	При перемещении	При настройке	При переключении	
Внешне-технологическое замечание	ТЭУ Механика, Гидравлика, Пневматика, Электрика, Программная область			ГДЕ	В какой части машины возникла проблема?						
Описание объекта оборудования (тип, марка, фотографии) B					КТО	Определили ли вы причину поломки на этой машине?					
					КАКОВЫ	Проблема повторяется на следующей машине?					
					КАКИ	Какие последствия для нормальной работы машины?					
Описание действий D											
5 "Панель" АВАРИЙ E					ПЕРСПЕКТИВЫ F						
	Панелька 1	Панелька 2	Панелька 3	Панелька 4	ОТСУТСТВИЕ БАЗОВЫХ УСЛОВИЙ	ОТСУТСТВИЕ НЕИЗВЕСТНЫХ ИЛИ НЕОЖИДАННЫХ УСЛОВИЙ	ОТСУТСТВИЕ ПРОБЛЕМ ОСЛОЖНЕНИЯ	НАДСТАРОК НАВЕСОК	НЕРИШЕВКА НА ДРУГИБИЛЬЩИКАХ	ВНЕШНИЕ ВЛИЯНИЯ	
1-я причина					Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Влияние персонала (оборудования (технологии))	
2-я причина					Недостаток информации	Недостаток информации	Недостаток информации	Отсутствует	Отсутствует	Неправильное использование	
3-я причина					Пренебрежение стандартами	Пренебрежение стандартами	Пренебрежение стандартами	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствие информации	
4-я причина					Вторичные причины						
5-я причина											
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ МЕРЫ F											
Действия для устранения неполадки	КТО				КТО				КОГДА		

Рисунок 1. Бланк определения конкретной причины аварийного отказа в системе электронного документооборота

Системы мобильного технического обслуживания

Реализованная в АНГЦ-3 система «Мобильного ТО» [5] обеспечивает основную информацию для анализа агрегатных журналов и выдачи заданий на техническое обслуживание и составление ведомостей дефектов на ремонт оборудования.

При этом обеспечивается: единство источника информации, выдача заданий на основании формализованных данных, отслеживание выполнения мероприятий и заданий по объектам ТОиР, отслеживание выполнения мероприятий и заданий по исполнителям.

Для обеспечения обслуживающего дежурного, ремонтного персонала мобильным средством обмена данными о заявках на обслуживание оборудования, информацией о его техническом состоянии, о результатах осмотров и технического обслуживания, обеспечения оперативного реагирования на выяв-

ленные дефекты и повреждения, мобильное ТО содержит автоматизированный мобильный комплекс (рис. 2), а оборудование при этом имеет идентификационные метки. Это позволяет с определённой периодичностью в процессе обходов дежурным персоналом обеспечить контроль состояния закрепленного оборудования и фиксацию параметров в базе данных.



Рисунок 2. Состав мобильного комплекса

В отличие от «мобильного ТО» в условиях АНГЦ-3 дальнейшее развитие системы мобильного ТО для оборудования прокатного комплекса, в частности, тонколистового стана 2000 горячей прокатки, предусматривает реализацию системы оперативного планирования и балансировки производственных мощностей с целью повышения качества планирования мероприятий ТОиР, управления загрузкой персонала и процессом исполнения регламентов ТОиР. Данные процессы реализуются посредством идентификации оборудования с помощью NFC-меток. Так, применительно к механическому, электрическому и гидравлическому оборудованию чистовой группы клетей и их приводов стана 2000 горячей прокатки пример расположения идентификационных меток показана на рисунке 3.

Данная мобильная система реализуется следующим образом. В процессе эксплуатации, ремонтов, технического обслуживания посредством считывания идентификационных шифров закрепленного за персоналом оборудования в зависимости от графика и плана производится идентификация отдельных узлов, механизмов, устройств и т.п.

Особенностью рассматриваемой системы, в отличие от «Мобильного ТО» АНГЦ-3, является возможность воспроизведения на экране мобильного устройства медиа файлов. Благодаря этому система может предоставить ремонтному персоналу визуализированный первичный инструктаж по проведению унифицированных ремонтных операций на типовых видах оборудования.

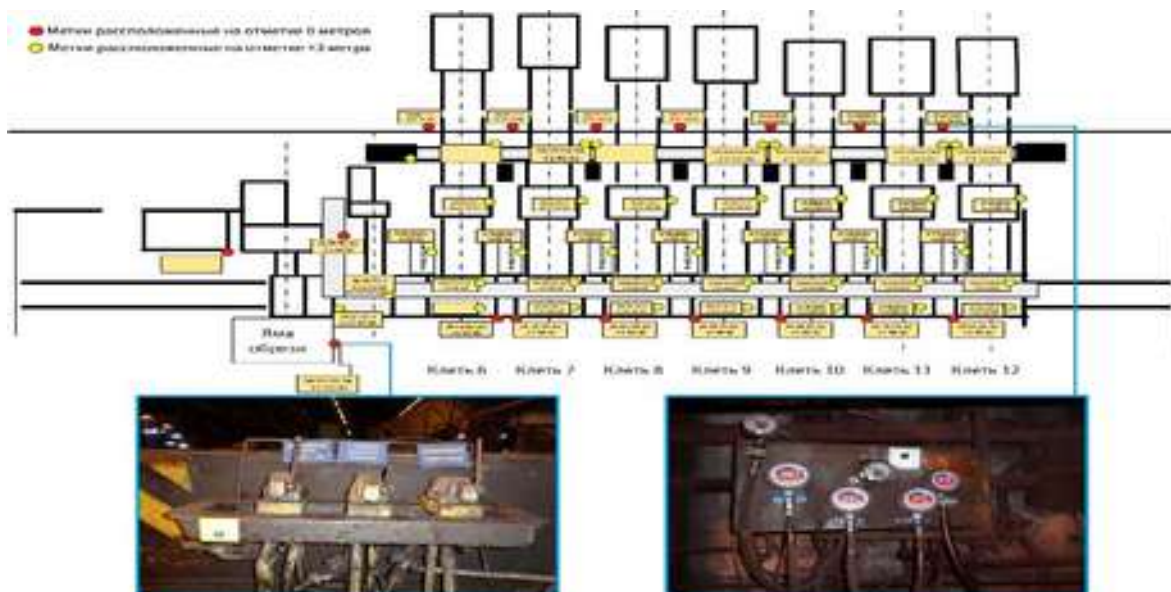


Рисунок 3. Фрагмент расположения NFC-меток применительно к оборудованию чистой группы клеток стана 2000

Также стоит отметить, что в базах данных системы присутствует пошаговое руководство проведения стандартных операционных процедур (СОП), которые включают в себя описание как стандартных, так и редких (сложных) и особо опасных ремонтных работ, а также карт технического обслуживания (КТО), которые включают в себя мероприятия, выполняемые в процессе диагностики с конкретизацией требуемых параметров. Пример последовательности выполнения обслуживающих действий (операций) выполнения КТО применительно, например, к системам гидравлики, приведен на рисунке 4.

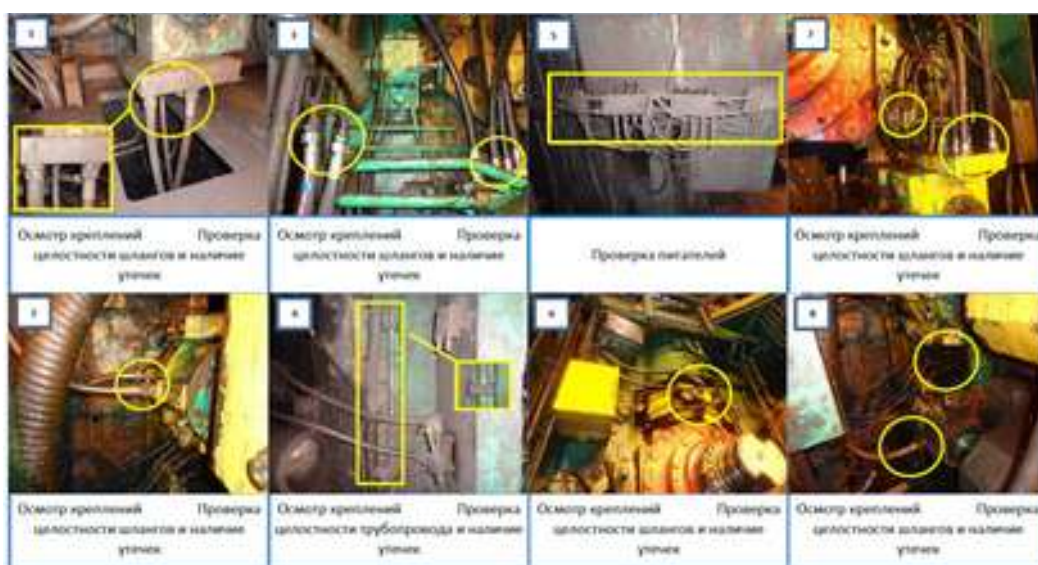


Рисунок 4. Пример последовательности выполнения обслуживающих действий (операций) выполнения КТО

Благодаря имеющимся серверам система способна предоставить работникам ремонтных служб все основные параметры оборудования, необходимые для реализации его нормальной работы. В ходе проведения осмотров и сбора фактических данных с использованием диагностических приборов мобильное устройство выводит на экран допускаемые минимальные и максимальные значения параметров, в пределах которых узлы и агрегаты стана работают штатном режиме. Данные с диагностических приборов, характеризующие выявленные дефекты, несоответствия нормативным показателям работы оборудования, через мобильное устройство вводятся в базу данных.

Заключение

1. Переход к форме технического обслуживания и ремонтов по фактическому состоянию оборудования требует поэтапного введения систем по накоплению информации об отказах, в частности, внедрения «Мобильного ТО» на начальном этапе.

2. Применение мобильных систем позволяет обеспечить оперативное управление загрузкой персонала и исполнение регламентов ТОиР с накоплением информации об отказах оборудования в информационной базе данных.

3. Визуализация карт технического обслуживания с использованием медиа-файлов и пошагового руководства при выполнении операционных процедур на мобильных устройствах минимизирует количество «личностных» ошибок персонала и повышает качество и быстродействие реализуемого ТОиР.

Список литературы

- [1] 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, №17 (60). – 2019, с. 98-104.
- [2] Ишметьев, Е.Н. Разработка систем защитного отключения, контроля и функциональной диагностики технологического оборудования металлургических предприятий / Е. Н. Ишметьев, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, С.М. Андреев // Черные металлы, №11, 2019. – с. 36-40.
- [3] Жильцов А.П. Методы оценки состояния оборудования при реализации технического обслуживания и ремонта в металлургическом производстве // А.П. Жильцов, А.А. Харитоненко, В.Д. Стаценко // Вестник Липецкого Государственного Технического Университета, №3 (41). – 2019, с.90-98.
- [4] Нойер, М.И. Цифровые технологии в производстве стали / М.И. Нойер, А. Эбель и др. // Черные металлы, №11, 2019. – с.54-59.
- [5] Жильцов А.П., Цупров А.Н. Эксплуатация и ремонт АНГЦ-3 ОАО «НЛМК» / Липецк: ОАО «НЛМК», 2014. – 214с.

УДК 621.771.23-415

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛОС ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ,
ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМОЙ И КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ
ПУТЕМ ПРАВКИ ИЗГИБОМ С РАСТЯЖЕНИЕМ**

Шаталов Р.Л.¹, Максимов Е.А.²

¹*Московский политехнический университет, г. Москва, Россия*

²*НТПП «Интрай», г. Челябинск, Россия*

**IMPROVEMENT OF QUALITY OF STRIPS FROM HIGH-ALLOY, HIGH-
DEFORM AND CORROSION BECAME BY EDITING BY THE BEND WITH
EXTENSION**

Shatalov R. L.¹, Maksimov E.A.²

¹*Moscow polytechnical university, Moscow, Russia*

²*NTPP "Intraj", Chelyabinsk, Russia*

Аннотация: В связи с инновационным развитием экономики нашей страны производство полос из хромоникелевой нержавеющей стали, используемой в химической промышленности, судостроении, ракетостроении и авиации является актуальной задачей. Приведены зависимости для определения натяжений, возникающих при охвате роликов натяжных станции полосой на непрерывном агрегате правки изгибом с растяжением. Представлены результаты исследований процесса правки непрерывным изгибом с растяжением полос из высоколегированной, труднодеформированной и коррозионностойких сталей с различными геометрическими размерами, механическими свойствами, дефектами неплоскостности на непрерывном агрегате правки растяжением. В результате правки полос из стали 12Х18Н10Т их плоскостность соответствует требованиям ГОСТ 19904-90 по улучшенной и высокой плоскостности.

Ключевые слова: правка изгибом с растяжением, высоколегированные и труднодеформированные стали, коррозионностойкие стали.

Abstract: Dependences for definition of the tension originating at coverage of rollers tensioning station by a strip on the continuous assembly of editing by a bend with extension are resulted. Industrial research of process of editing by a continuous bend with extension of strips from high-alloy, high-deform and corrosion steels with various geometrical sizes, mechanical properties, defects of nonflatness is presented.

Key words: editing by a bend with extension, high-deform steels, corrosion steels.

Введение. В связи с инновационным развитием экономики нашей страны производство полос из хромоникелевой нержавеющей стали, используемой в химической промышленности, судостроении, ракетостроении и авиации является актуальной задачей. Повышение требований к качеству полос вызывает необходимость дополнительной технологической операции правки в тех случаях, когда при прокатке трудно обеспечить отсутствие серповидности и неплоскостности прокатываемых полос. На металлургических предприятиях для правки полосового проката из высоколегированной, труднодеформируемой и коррозионностойкой стали наиболее широко используется способ непрерывной правки полос изгибом с растяжением [1-4].

Материалы и методы исследований. В высокопроизводительных линиях непрерывной правки растяжением с изгибом (АПР) установлены входная и выходная натяжные многороликовые станции, состоящие традиционно из четырех роликов диаметром 610 – 710 мм. Между натяжными станциями установлены специальные устройства для перегиба полосы вокруг неприводных роликов малого диаметра. В зависимости от требуемой деформации по толщине полос диаметр роликов устройства для изгиба полос изменяется от 10 мм до 15 – 20 мм, диаметр опорных роликов равен 38 мм. Благодаря малому диаметру роликов и высокому натяжению обеспечивается высокое качество правки полос.

Процесс непрерывного изгиба с растяжением, заключается в том, что деформируемая полоса охватывает на определенный угол ролики входной и выходной натяжных станции, вращающиеся с различной окружной скоростью. Причем, окружная скорость роликов выходной станции больше, чем окружная скорость роликов входной станции.

Необходимое удлинение полосы при правке обычно составляет 0,5– 2,0 %. При правке полос изгибом с растяжением в первую очередь деформируются более короткие участки полосы, что позволяет устранить ее неплоскостность. Процесс правки полос контролируется по величине удлинения и амплитуды неплоскостности. Натяжные ролики обычно покрыты синтетическим полиуретановым материалом, позволяющим увеличить трение между полосой и поверхностью роликов, а также уменьшить вероятность повреждения полосы при правке.

При правке к свободным концам полосы прикладываются натяжения, а полоса охватывает оба ролика по S – образной кривой (рис.1). Натяжение на дугах охвата роликов полосой создает резерв сил трения покоя. При охвате

ведущего ролика полосой в плоскости входа действует усилие T_1 , а к свободному концу полосы приложено натяжение T_{1i} .

Аналогично, при охвате ведомого ролика полосой в плоскости выхода действует усилие T_0 , а к свободному концу полосы приложено натяжение T_{0i} . Натяжения T_1 и T_0 определяются технологией процесса, а натяжения на свободных концах

полосы T_{0i} и T_{1i} определяются по закону Л.П. Эйлера

$$T_{0i} = T_0 / e^{f\phi_0}, \quad T_{1i} = T_1 / e^{f\phi_1}, \quad (1)$$

где T_0 , T_1 – натяжения в плоскости входа и выхода полосы из роликов,

f – коэффициент трения между роликом и полосой,

ϕ_1 , ϕ_0 – углы охвата полосой ведущего и ведомого роликов.

Анализ зависимости (1), показал, что натяжения T_{0i} и T_{1i} , прикладываемые к свободным концам полосы, определяются величиной натяжений T_1 и T_0 в плоскости входа и выхода полосы из натяжных роликов, коэффициентом трения при охвате натяжных роликов и полосой, а также углами охвата полосой ведущего и ведомого роликов. Следует отметить, что технология правки полос различного сортамента и марки стали на предприятиях черной металлургии различна и зависит от эксплуатируемого оборудования, которое определяет режимы натяжений и охвата натяжных роликов полосой.

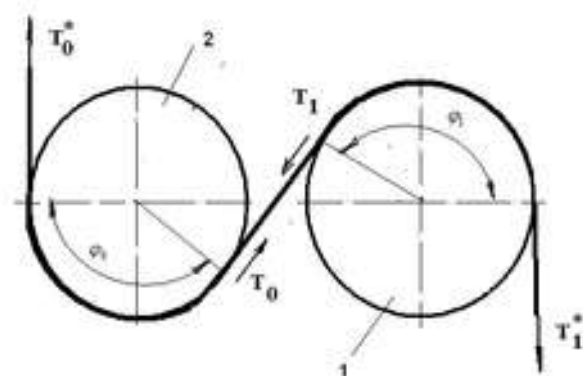


Рисунок 1. Схема действия сил натяжения при охвате полосой натяжных роликов и растяжении ленты между ними: 1– ведущий ролик, 2– ведомый ролик

Непрерывный агрегат правки растяжением ПАО ЧМК состоит из разматывателя и моталки, правильных и корректирующих головок, входной и выходной натяжных многороликовых станций, прижимных и обводных роликов, стрессометра (рис.2).

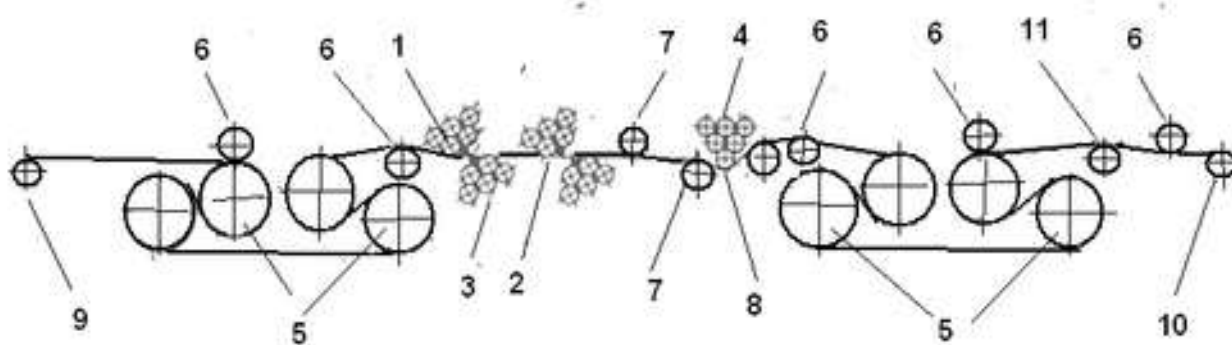


Рисунок 2. Схема непрерывного агрегата правки растяжением (АПР): 1– правильные ролики, 2,3,4– опорные ролики промежуточных и корректирующих головок, 5– барабаны натяжных станций, 6,7– прижимные, обводные ролики, 8– рабочий ролик корректирующей головки, 9– разматыватель, 10– моталка, 11– стрессометр

Диаметр роликов входной и выходной натяжных многороликовых станций равен 1500 мм, диаметр правильных роликов 30– 40 мм. Скорость перемещения полосы в агрегате правки 130– 160 м\мин. Правке подвергались полосы толщиной 0,3– 1,5мм, пределом текучести 200– 1500 МПа.

Правка полос из хромоникелевой нержавеющей стали типа 12X18Н10Т, 08X18Н10Т, 08X18Н10, 08X13, 12X17, а также AISI (США) 316, 310, 321, AISI (США) 410, 420, 430 на непрерывном агрегате правки растяжением заключается в следующем. При правке использовались правильные ролики диаметром 30 мм, перекрытие правильных роликов, определяющее протяженность дуги контакта с полосой, изменялось в пределах 5– 13мм, разность скоростей входной и выходной натяжных станций не превышала 0,7% .

Величину перекрытия правильных роликов и разность скоростей входной и выходной натяжных станций подбирались таким образом, чтобы амплитуда волны неплоскостности полосы соответствовала – улучшенной и высокой плоскостности по ГОСТ 19904-90. Правку полос начинали с деформации 0,2% , перекрытия роликов 5мм, скорости 40– 50 м\мин.

Для достижения амплитуды волны, соответствующей улучшенной и высокой плоскостности, деформацию полосы увеличивали с 0,2% до 0,5 % , перекрытие роликов с 5 мм до 13мм. Параметры неплоскостности полос до и после правки контролировались при остановке агрегата в ручном режиме с

помощью линейки, имеющей выдвижной шуп с определенной шкалой, деформацию полосы определяли на базе равной 500 мм с помощью специальной скобы.

Кроме того, распределение удельных натяжений по ширине полосы, позволяющее качественно определить характер неплоскостности полосы, проводилась с помощью стрессометра, уставленного в хвостовой части агрегата.

Полученные результаты и их обсуждение

Параметры правки полос из стали 12X18H10T на непрерывном агрегате правки растяжением ПАО ЧМК представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры правки полос из стали 12X18H10T на непрерывном агрегате правки растяжением ПАО ЧМК

Размер полосы мм	Относительное удлинение ε %	Отклонение от плоскостности до правки мм	Отклонение от плоскостности после правки мм	Эффективность правки %
0,8 – 1030	0,3	6,0	1,0	83,3
0,8 – 1030	0,3	5,0	1,0	80,0
0,8 – 1030	0,3	6,0	2,0	66,6
1,0 – 1030	0,4	7,0	1,0	85,7
1,0 – 1030	0,4	6,0	1,5	75,0
1,0 – 1030	0,4	8,0	3,0	62,2
1,5 – 1030	0,5	7,0	1,5	78,5
1,5 – 1030	0,5	8,0	4,0	50,0
1,5 – 1030	0,5	9,0	4,0	55,5

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показал, что при правке полос из стали 12X18H10T типоразмером 0,8–1030 мм при $\varepsilon = 0,3\%$ амплитуда волнистости снижается с 5–6 мм до 1–2 мм, то есть эффективность правки соответствует 66,6 – 83,3%, для типоразмера 1,0 – 1030 мм $\varepsilon = 0,4\%$ амплитуда волнистости снижается с 6 – 8 мм до 1–3,0 мм, то есть эффективность правки соответствует 62,2 – 85,7 %, для типоразмера 1,5 – 1030 мм $\varepsilon = 0,5\%$ амплитуда волнистости снижается с 7–9 мм до 1,5–4,0 мм, то есть эффективность правки соответствует 55,5 – 78,5%.

Необходимо отметить, что в результате правки полос из стали 12X18H10T их плоскостность соответствует требованиям ГОСТ 19904-90 по улучшенной и высокой плоскостности.

Выводы.

1. Приведены зависимости для определения натяжений, возникающих при охвате роликов натяжных станции полосой на непрерывном агрегате правки растяжением.

2. Исследование процесса правки непрерывным изгибом с растяжением полос из коррозионностойких сталей с различными геометрическими размерами, механическими свойствами, дефектами неплоскостности на непрерывном агрегате правки растяжением, показало, что полосы после правки соответствуют ГОСТ 19904-90 по центральной волнистости: плоскость высокая, по краевой волнистости плоскостность: нормальная и улучшенная.

Список литературы

- [1] Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. -М.: Теплотехник, 2008.-336с.
- [2] Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М., Шефтель Е.Н., Просвирнин В.В., Акопян Е.Е. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликотправильных машинах // Производство проката .2016.№7 .С.2-8.
- [3] Мухин Ю.А, Соловьев В.Н., Бахаев К.В. Совершенствование аналитической модели правки полосы растяжением с изгибом // Производство проката .2006. №9 .С. 40-42.
- [4] Хольцмюллер Г. Комплексное определение параметров толстого листа // Черные металлы . 2007. № 6.– С.58-62.

УДК 621.7.04(7-5):669.018

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ МЕТОДАМИ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ И ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОКАТНО-ПРЕССОВОЙ ЛИНИИ

Медведев В. А.¹, Загоскин Е. Е.², Шаталов Р. Л.¹

¹*Московский политехнический университет, г. Москва, Россия*

²*Богородский филиал АО «НПО «Прибор», г. Ногинск, Россия*

STUDY OF EFFICIENCY OF VARIOUS TECHNOLOGIES OF PRODUCTION OF DEFORMED STEEL THIN-WALLED VESSELS BY COLD STAMPING AND HOT DEFORMATION ON THE ROLLING-PRESS LINE

Medvedev Vadim¹, Zagoskin Egor², Shatalov Roman¹

¹*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

²*Bogorodsky branch of NPO Pribor JSC, Noginsk, Russia*

Аннотация: Исследованы временные затраты при производстве стальных тонкостенных сосудов на предприятии АО НПО Прибор. Сравнивали технологичность методов производства: холодной штамповкой с применением чередующихся отжигов снятием и нанесением смазки и терма-деформационную обработку на прокатно-прессовой линии. Для холодной объёмной штамповки использовали сталь 15ФЮА, а для производства на прокатно-прессовой линии сталь 50. Проведен сравнительный анализ эффективности используемых технологий. Установлено, что производство чистовых сосудов методом холодной штамповки приводит к увеличению технологического цикла по сравнению с прокатно-прессовой линией.

Ключевые слова: холодная объёмная штамповка, прокатно-прессовая линия, коэффициент использованного материала.

Abstract: The time costs in the production of steel thin-walled vessels at the enterprise NPO Pribor JSC are investigated. The manufacturability of production methods was compared: cold stamping with the use of alternating annealing by removal and application of lubricant and thermal-deformation processing on a rolling-press line. Steel 15FYUA was used for cold volume stamping, and steel 50 was used for production on a rolling and press line. A comparative analysis of the effectiveness of the technologies used was carried out. It has been established that the production of finishing vessels by cold stamping leads to an increase in the technological cycle in comparison with the rolling-press line.

Key words: cold forging, rolling-press line, coefficient of material used.

Введение

Современные машиностроительные предприятия в последнее время увеличивают выпуск стальных тонкостенных сосудов (колпачки, муфты, баллончики и т.д.) ответственного назначения, с заданными механическими

свойствами. Существуют две основных технологии производства тонкостенных стальных сосудов: холодная штамповка (ХШ) из пластичных низкоуглеродистых сталей и горячая терма-деформационная обработка на прокатных станах с прошивкой оправкой или горячее прессование [1-3].

На Российском машиностроительном предприятии АО НПО Прибор при производстве тонкостенных стальных сосудов ХШ используют низкоуглеродистую сталь 15ФЮА. Технология предусматривает многократную термическую индукционную обработку (отжиг) для локального снятия наклёпа, при этом проводят промежуточные операции нанесения и снятия смазки.

Спроектированная и созданная на АО НПО Прибор прокатно-прессовая линия (ППЛ) позволяет изготавливать за один этап в горячую из прутков заготовок стали 50 чистовые тонкостенные сосуды с требуемыми качественными характеристиками геометрических размеров и механических свойств [4]. Объёмы производства чистовых сосудов из стали 50 на созданной ППЛ увеличиваются, поскольку технология ХШ применяемая ранее с применением промежуточных операций нанесения и удаления смазки и термических обработок, является более длинной [5].

Цель работы: исследовать эффективность различных технологий производства деформированных стальных тонкостенных сосудов методами холодной штамповки и горячей деформации на прокатно-прессовой линии

Модели и методы

Для оценки эффективности производства чистовых сосудов на АО НПО Прибор был проведен анализ **конструкторско-технологической документации** и применяемых технологий для выпуска чистовых сосудов [6]. Определены два основных способа производства: 1 – ХШ с применением многократной термической обработки с промежуточным снятием окалина, нанесением и снятием смазки; 2 – горячая прокатка и калибровка штамповкой на ППЛ с применением доводки механической обработкой. В качестве исходных материалов для сравнительного анализа технологий производства чистовых сосудов методами ХШ и ППЛ применялись стали 15ФЮА изготовленная по ГОСТу 10230-75 и СТ 50 изготовленная по ГОСТу 1050-2013. Стоимость распространённой горячекатаной стали 50 в круге 36мм. на рынке находится в диапазоне 45 – 50 т/р за тонну. Специальная качественная обточенная сталь 15ФЮА в круге 34мм. 78-92т/р за тонну, при этом она имеет узкоспециальное назначение и мало распространена на рынке [7].

В условиях предприятия АО НПО Прибор был проведен анализ производства двух партий чистовых сосудов по 1000шт. каждая изготовленных по двум технологиям: методом ХШ прутков заготовок из стали 15 ФЮА и на ППЛ из прутков заготовок стали 50.

Обсуждение полученных результатов

Общее время необходимое для производства партии 1000 шт. чистовых сосудов из стали 15ФЮА методом ХШ на предприятии АО НПО Прибор составляет около 42 час. или 151сек/шт.

На рисунке 1 приведены доли составляющих производства партии чистовых сосудов 1000 шт. из стали 15ФЮА методом ХШ.

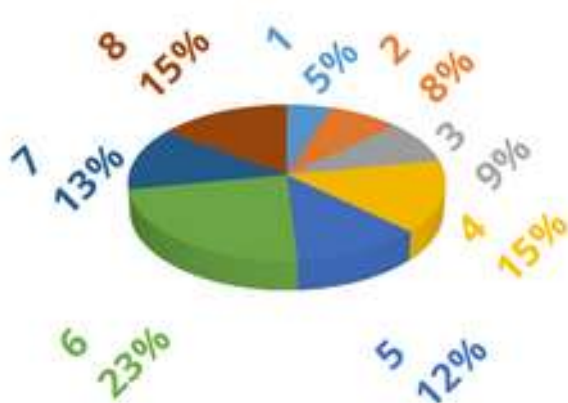


Рисунок 1. Доли составляющих производства чистовых сосудов из стали 15ФЮА методом ХШ где: 1 – резка прутков заготовок на ленточной пиле на мерную длину, 2 – время затраченное на перемещение в процессе производства от прутков заготовок до чистовых сосудов, 3 – время необходимое на обработку осадка и ХШ за 3 этапа, 4 – термическая обработка предварительный отжиг в печи сопротивления, 5 – термическая обработка локальный индукционный отжиг, 6 – нанесение на заготовки гальваническим способом промежуточного покрытия фосфата и смазки (мыло), 7 – снятие окалины гальваническим травлением в кислоте, 8 – снятие фосфата и смазки, обезжиривание.

Чистовые сосуды из стали 15 ФЮА полученные методом холодной объёмной штамповки имеют законченные геометрические размеры: длина 120мм, глубина полости 113мм, диаметры наружный и внутренний 32 и 25мм соответственно. Заданные механические свойства достигались за счёт упрочнения наклёпом в процессе третьей вытяжки.

Общее время необходимое для производства партии 1000 шт. чистовых сосудов из стали 50 в горячую на созданной ППЛ предприятия АО НПО Прибор с дальнейшей механической обработкой до необходимых размеров составляет около 29 час. или 103 сек/шт.

На рисунке 2 приведены доли составляющих производства партии чистовых сосудов 1000 шт. из стали 50 на ППЛ.

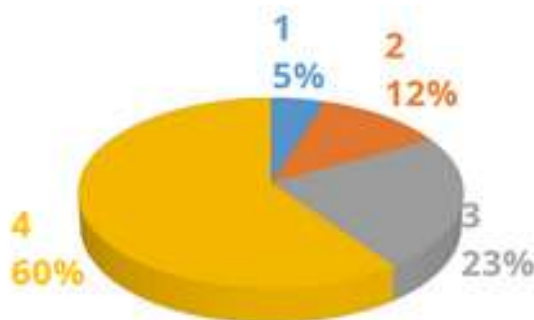


Рисунок 2. Доли составляющих производства сосудов из стали 50 на ППЛ
 где: 1 – резка прутков заготовок на ленточной пиле на мерную длину, 2 – время затраченное на перемещение в процессе производства от прутков заготовок до чистовых сосудов, 3 – время необходимое на горячую обработку на ППЛ прокатку и штамповку с последующей закалкой в масле, 4 – механическая обработка сосудов с ППЛ до заданных геометрических размеров.

После механической обработки сосудов из стали 50 полученных с ППЛ, изделие имеет законченные геометрические размеры и механические свойства.

Проводили исследование коэффициента использования материала (КИМ) при изготовлении тонкостенных сосудов методами ХШ и на ППЛ методом взвешивания на электронных весах MAUL с погрешностью измерения ± 1 грамм. В таблице 1 приведены результаты изменения массы чистовых тонкостенных сосудов, изготовленных на ППЛ и ХШ.

Таблица 1 Изменение массы чистовых тонкостенных сосудов, произведенных на ППЛ и ХШ

Название технологической операции	Изменение массы, кг	
	ХШ	ППЛ
Начальная масса в количестве шт. на длину прутка 3м, кг	0.302	0.560
Раскрой прутка	0.300	0.556
Термическая обработка	0.294	0.554
После химического снятия окалины (травления)	0.290	0.550
Механическая обработка	0.276	0.276

Исходя из таблицы 1 видно, что чистовые тонкостенные сосуды, произведённые по технологии ППЛ имеют существенные потери по сравнению с ХШ. При учёте суммарных КИМ двух технологий: ППЛ около 50% уходит в стружку при этом около 2% в окалину и травление, при ХШ около 9% с учётом снятия окалины травлением и механической обработки.

Механические свойства упрочнённого металла чистовых тонкостенных сосудов из сталей 15ФЮА и СТ50 проверяли на разрывной машине INSTRON мод.3342 в соответствии с методами испытания металлов ГОСТ1497-84, твёрдость на твердомере Роквелла мод. TP5014 метод определения твёрдости металлов ГОСТ9013-59. В таблице 2 приведено сравнение механические свойств чистовых тонкостенных сосудов, полученных методом ХШ и на ППЛ, а также указаны требования конструкторской документации (КД) предприятия АО НПО Прибор.

Таблица 2. Механические свойства чистовых сосудов, полученных методом ХШ и на ППЛ

Механические характеристики металла сосуда	HRC	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
15ФЮА	28	588	763	16
Сталь 50	30	663	824	14.5
Требуемые значения КД	28-32	500-700	700-900	14-16

Из таблицы 1 видно, что механические характеристики полученных тонкостенных стальных сосудов от ППЛ и ХШ находятся в рамках допуска КД предприятия АО НПО Прибор. Разница между механическими свойствами сосудов полученного за счёт термического упрочнения и наклёпом составляет: твёрдость HRC 7%, предел текучести $\sigma_{0.2}$ МПа около 11%, временное сопротивление σ_b , МПа 7%, относительное удлинение 9%

Список литературы

- [1] Медведев В.А., Шаталов Р.Л., Загоскин Е.Е. Контроль и управление температурой в процессе обработки на прокатно-прессовой линии для обеспечения равномерности механических свойств стальных тонкостенных сосудов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2018. №6. С.152-156.
- [2] Гамин Ю.В., Романцев Б.А. Особенности процесса прошивки коротких заготовок малого диаметра на мини-стане винтовой прокатки // Производство проката. 2015. № 11. С. 25–31.
- [3] Медведев В.А., Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Влияние условий горячего деформирования стальных сосудов на структуру и механические свойства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 5.Ч. 1. С.215-221.
- [4] Романцев Б.А., Гамин Ю.В., Гончарук А.В., Алещенко А.С. Инновационное оборудование для получения экономичных полых заготовок деталей машиностроения малого диаметра // Металлург. 2017. № 3. С. 36–38.
- [5] Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С. и др. Совершенствование режимов горячей прокатки труб на мини ТПА 70–270 // Металлург. 2015. № 5. С. 41–43.
- [6] Выдрин А. В. Развитие технологий горячей прокатки бесшовных труб // Черные металлы. 2012. № 9. С. 16–20.
- [7] Шаталов Р.Л., Медведев В.А. Влияние неравномерности температуры деформируемой заготовки на механические свойства тонкостенных стальных сосудов при обработке на прокатно-прессовой линии //Металлург. 2019. №2. С. 53-58.

УДК 631.371:621.311.004.18

БЕСТРАНСМИССИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ И ЕГО ПРЕИМУЩЕСТВА

Филатов М. А.¹, Левченко Э. П.¹, Карпук И. А., Кащеев А. В.¹

¹ Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

TRANSMISSION-FREE TRANSMISSION OF LOADING DOWNLOADS AND ITS ADVANTAGES

Maxim Filatov¹, Eduard Levchenko¹, Igor Karpuk¹, Andrey Kashcheev¹

¹Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

Аннотация: Рассмотрены возможности бестрансмиссионного обеспечения движения мелющих тел в электромагнитном измельчителе, применительно к диспергированию материалов в металлургическом производстве. Выявлены недостатки существующих конструкций дробильно-измельчительных машин, основанных на механическом принципе приведения в движения рабочих органов. Разработан измельчитель электро-магнитного действия, обеспечивающий движение мелющей загрузки с помощью электрического магнитного поля. Приведены варианты конструктивного исполнения электромагнитного измельчителя и основные аналитические зависимости, описывающие особенности действия магнитного поля. Показана картина распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне рабочей камеры устройства.

Ключевые слова: электромагнитный измельчитель, мелющие тела, магнитное поле, рабочая камера, энергоэффективность.

Abstract: The possibilities of transmissionless support for the movement of grinding media in an electromagnetic grinder, as applied to the dispersion of materials in the metallurgical industry, are examined. The disadvantages of existing designs of crushing and grinding machines based on the mechanical principle of driving the working bodies into motion are revealed. An electro-magnetic shredder was developed, which provides the movement of the grinding load with the help of an electric magnetic field. Variants of the design of the electromagnetic chopper and the main analytical relationships describing the features of the magnetic field are given. The distribution pattern of the vector magnetic potential in the active zone of the working chamber of the device is shown.

Key words: electromagnetic chopper, grinding media, magnetic field, working chamber, energy efficiency

Введение

Известно, что около 5 % всей электроэнергии, которая производится в мире затрачивается именно на процессы дробления и измельчения материалов [1], при этом измельчение обладает значительно большей энергоемкостью, чем дробление.

подавляющее большинство существующих в настоящее время дробильно-измельчительных машин в качестве привода рабочих органов имеют

классическую схему передачи движения от электродвигателя через муфту и редуктор, посредством механической трансмиссии на рабочие элементы, воздействующих на материал разными способами его разрушения.

Недостатками такого подхода является повышенный расход электрической энергии, так как часть полезной энергии расходуется для преодоления моментов сил сопротивления на валу двигателя, а непосредственно потери ее в трансмиссии могут достигать 10-15 % и более [2].

1 Существующие методы

В типовых классических схемах построения привода дробильно-измельчительных машин разного принципа действия потери энергии в самой трансмиссии могут складываться из расхода энергии на преодоления сил трения в зубчатом зацеплении, подшипниках, сальниках (манжетах) и упругой деформации компенсирующих муфт.

При наличии в передаче жидкостной смазки к вышеперечисленным потерям дополнительно добавляются потери гидравлическое перешивание и разбрызгивание масла при вращении деталей, обслуживающих передачи, а именно, валов и зубчатых колес.

1.1 Постановка задачи

Основной задачей работы является создание и разработка инновационного метода изготовления и эксплуатации бестрансмиссионного измельчителя с целью обеспечения движения мелющих тел в рабочей камере посредством переменного магнитного поля, обеспечивающим эффективное взаимодействие материала и рабочих органов.

1.2 Описание метода и устройства для его реализации

Для повышения энергоэффективности процессов диспергирования материалов в настоящее время одним из перспективных направлений научных исследований является разработка и создание электромагнитных измельчителей, обеспечивающих движение мелющих тел в рабочей камере за счет переменного магнитного поля. Данные устройства обеспечивают уменьшение энергоемкости процесса диспергирования в связи с отсутствием нужды в дополнительных источниках электроэнергии для создания разрушающих материал сил. Однако пока еще к некоторым факторам, ограничивающими широкое применение подобных машин, относятся сравнительно низкая производитель-

ность, узкоспециализированная область применения, повышенные расходы на эксплуатацию, а также недостаточная отработка решения вопросов регулирования крупности готового продукта по фракционному составу [3].

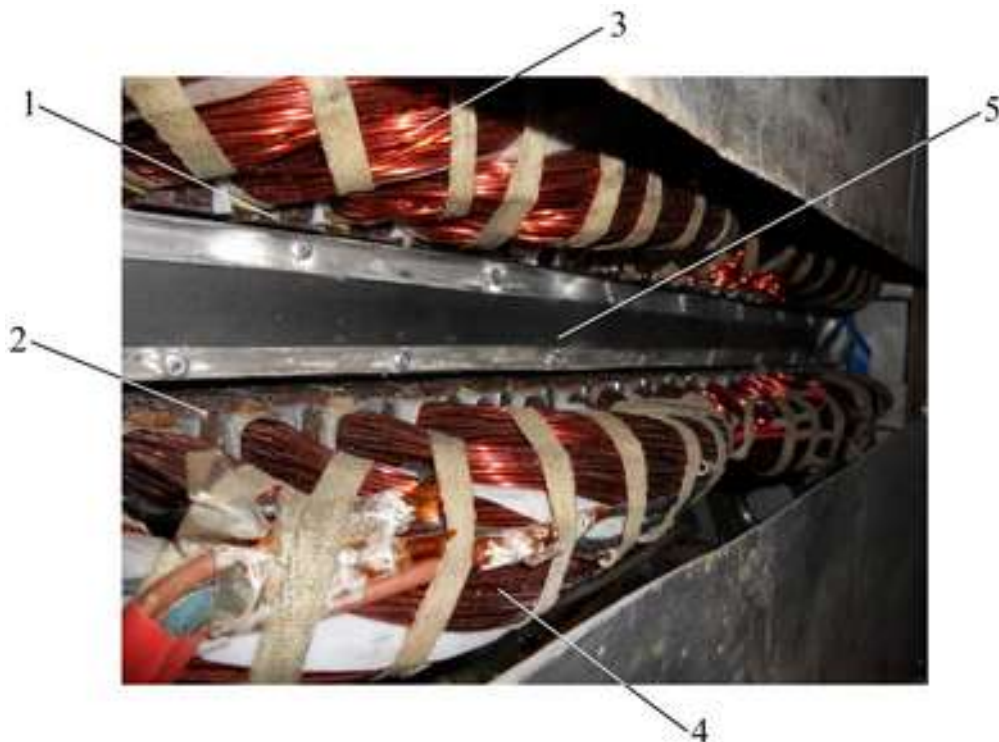
В Донбасском государственном техническом университете спроектирована, разработана и исследуется конструкция электромеханического измельчителя [4], представленная на рисунке 1, который состоит из корпуса со смонтированными в нем обмотками возбуждения (рисунок 2) переменного магнитного поля.

При протекании электрического тока в обмотках возбуждения генерируется переменное магнитное поле, приводящее к направленному движению мелющей загрузки в виде ферромагнитных тел, которые совершают вращательные движения и взаимное столкновение в рабочей камере измельчителя (рисунок 3), где находится и материал, подлежащий диспергированию на более мелкие компоненты.

Переменный характер магнитного поля, создаваемого электромагнитами наилучшим образом способствует обеспечению хаотического движения мелющих рабочих органов и измельчаемого сырья, тем самым обеспечивая его более равномерное перемешивание, повышающее способность образования новых поверхностей материала.



Рисунок 1. Общий вид экспериментального образца электромеханического измельчителя



1, 2 – индукторы бегущего поля; 3, 4 – трехфазные обмотки; 5 – рабочая камера
Рисунок 2. Экспериментальный образец электромеханического измельчителя



Рисунок 3. Рабочая камера электромеханического измельчителя

2 Моделирование работы измельчителя

Дифференциальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторного магнитного потенциала представляется как [5]

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \bar{A} \right) - \gamma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \operatorname{rot} \left(\bar{v} \cdot \operatorname{rot} \bar{A} \right) = - \bar{J}_{\text{суп}} \quad (1)$$

где $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость; γ – удельная электрическая проводимость; v – вектор скорости движения электропроводящей среды относительно источника магнитного поля; $J_{стор}$ – плотность сторонних токов.

Для непроводящих областей справедливо уравнение Пуассона, имеющее вид:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \bar{A} \right) = - \bar{J}_{стор}, \quad (2)$$

Картина распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне рабочей камеры электромеханического измельчителя показана на рисунке 4, откуда видно, что она четко отражает конструктивные особенности выполнения и расположения электромагнитных катушек в корпусе измельчителя по всей длине его рабочей камеры.

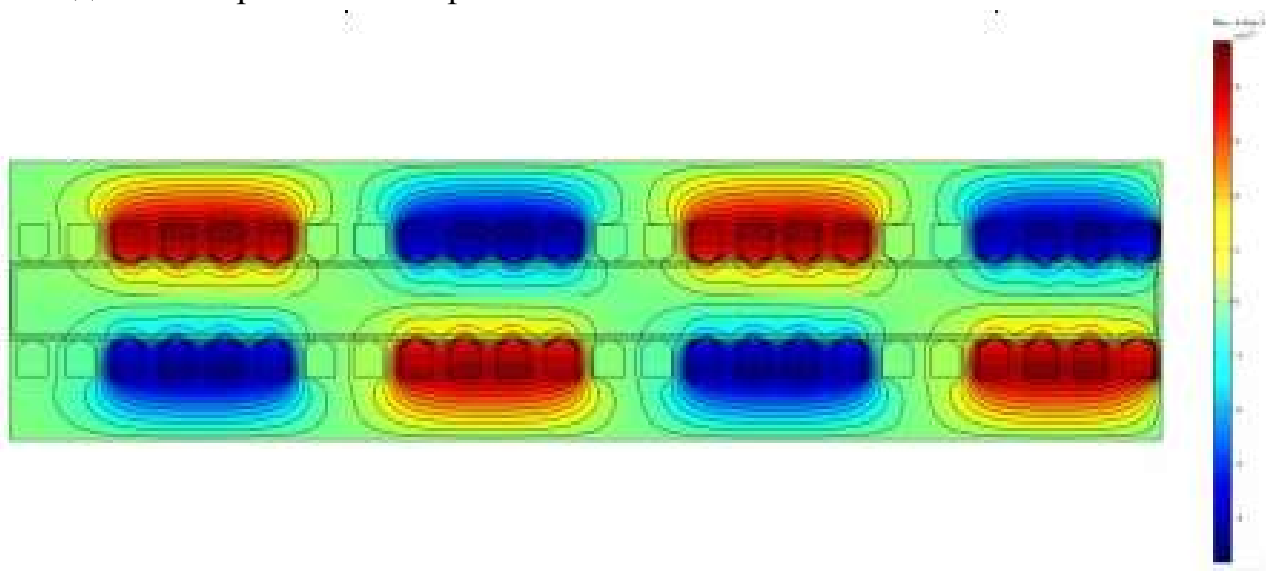


Рисунок 4. Распределение векторного магнитного поля

3 Полученные результаты

Магнитное поле представлено устойчивым зубчатым характером, а его величина достигает 0,084 Тл, что является вполне характерным с точки зрения организации движения ферромагнитных мелющих тел.

В экспериментальной модели загрузка исходного продукта и выгрузка готового материала осуществляется периодически, однако в дальнейшем планируется организация непрерывной подачи и выгрузки, например, с помощью пневмотранспорта.

Предварительные поисковые эксперименты показали, что данный тип измельчителя хорошо подходит для измельчения угля, что может быть

применено в металлургическом производстве при приготовлении коксика, входящего в состав лёточной массы для заделки выпускных каналов доменных печей, который является обязательным компонентом в составе огнеупорного материала, обеспечивающим его затвердевание.

Данный принцип приготовления готового продукта может быть полезным в агломерационном производстве при выполнении химического анализа спечённого агломерата, когда требуется его предварительное измельчение.

Кроме того, данный принцип обеспечения движения мелющих тел может быть полезным в лакокрасочном производстве, где перетирание пигмента и растворителя осуществляется в бисерной мельнице – вертикально вытянутом трубчатом корпусе, наполненном твердыми круглыми ферромагнитными телами, которые при взаимодействии друг с другом и сырьем интенсивно перетираются до необходимой величины и смешиваются с олифой.

Таким образом предложенный электромагнитный способ измельчения материалов предполагает снижение затрат электроэнергии на диспергирование, ввиду отсутствия дополнительных подвижных механических частей в виде трансмиссии и может быть применён в металлургии и химическом производстве.

Список литературы

- [1] Андреев С. Е., Зверевич В. В., Перов В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1980. — 415 с.
- [2] Кузнецов Е. С., Воронов В. П., Болдин А. П. и др. Техническая эксплуатация автомобилей — М. : Транспорт, 1991. — 413 с.
- [3] Волков, В. С. Разработка ресурсо- и энергосберегающего электромагнитного способа механоактивации витаминизированной биологически активной кормовой добавки: дис. ... к-та техн. наук : 05.20.02 / Волков Владимир Сергеевич ; ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный аграрный университет». — Санкт-Петербург, 2014. — 179 с.
- [4] Патент на корисну модель №87222 України, МПК (2006.01) H02K 41/025, B01F 13/08. Електромеханічний пристрій багатofакторної дії для обробки матеріалів / Заблодський Н. Н., Філатов М. А., Шинкаренко В. Ф. и др. — № 210310641; заявл. 03.09.13; Опубл. 27.01.14. Бюл. № 2. — 4 с.
- [5] Заблодский Н. Н., Филатов М. А., Грицюк В. Ю. Моделирование электромагнитного поля электродинамического дезинтегратора / Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 39. — Алчевск: ДонГТУ, 2013. — С. 221–226.
- [6] Филатов М. А., Левченко Э. П., Карпук И. А. и др. Электромагнитный способ измельчения материалов и его применение для пробоприготовления в агломерационном производстве / Сборник научных трудов ДонГТУ. Вып. 59. — Алчевск: ДонГТУ, 2019. — С. 47–52.
- [7] Филатов М. А., В. Ю. Грицюк, В. В. Лысак Оценка возможности использования электромеханического дезинтегратора в технологии приготовления водоугольного топлива / Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2012. Вып. 37. — С. 325–329.

УДК 669.2

**НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ
ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ ДИАМЕТРОМ 0.30 ММ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОКОРДА**

Москалев Д. Н.¹, Цыганов И. А.²

¹ООО "Бекарт Липецк", Липецкая обл., ОЭЗ ППТ "Липецк", Россия

²Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

**NON-METALLIC INCLUSIONS UNDER THE SURFACE OF THE THIN
WIRE BY DIAMETER 0.30 MM FOR PRODUCING THE STEEL CORD**

Dmitry Moskalyov¹, Igor Tsyganov²

¹ "Bekaert Lipetsk" LLC, Lipetsk Region, Special Economic Zone "Lipetsk", Russia

² Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: Получены изображения неметаллических включений под поверхностью стальной латунированной проволоки диаметром 0.30 мм.

Ключевые слова: неметаллические включения, трещины, металлокорд, проволока

Abstract: In this work the images of non-metallic inclusions under the surface of the steel brassing wire by diameter 0.30 mm were done.

Key words: non-metallic inclusions, cracks, steel cord, wire

Введение

Основным фактором влияющим на обрывность проволоки во время мокрого волочения и последующего свивания в канаты является наличие неметаллических включений.

Основными направлениями борьбы с обрывами связанными с неметаллическими включениями являются: снижение количества неметаллических включений в катанке, выбор режима волочения, когда неметаллические включения дробятся и деформируются, своевременная замена волок при мокром волочении.

Снижение обрывности повышает производительность цеха навивки канатов и является перспективным направлением при производстве новых конструкций металлокорда из проволоки более высокой прочности: Super Tensile с прочностью 3 200–3 500 Н/мм² и Ultra Tensile с прочностью 3 400–3 800 Н/мм² и выше [1].

1. Модели и методы

1.1. Постановка задачи

Для производства тонкой проволоки диаметром 0.30 мм прочностью НТ (High Tensile) 2 800–3 200 Н/мм² использовалась катанка диаметром 5.0 мм

марки стали 80, которая деформировалась сухим волочением до диаметра 1.67 мм с последующим патентированием и латунированием.

Исследование рельефа поверхности проводилось под растровым электронным микроскопом фирмы Vega3 TESCAN при увеличении в 5 000 раз, на шлифе диаметром 5 мм поперечного сечения проволоки, травление шлифа осуществлялось в 2–3 % растворе HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в течение 2 секунд. Исследование поверхности проводили в режиме SE детектора.

1.2. Полученные результаты

Было получено изображение лунки у поверхности тонкой проволоки, оставленной неметаллическим включением, рис. 1.

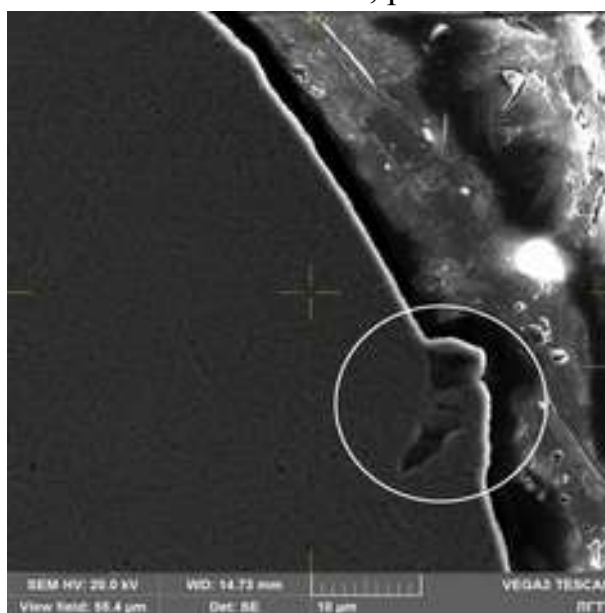


Рисунок 1. Рельеф поверхности проволоки диаметром 0.30 мм и неметаллическое включение под поверхностью, увеличение $\times 5\,000$

2. Обсуждение полученных результатов

Материалом для проволоки под металлокорд является катанка высокого качества, диаметром 6–5,5 мм из сталей 70 и 80. Так как металлокорд в реальных условиях эксплуатируется под знакопеременными нагрузками, к нему предъявляются требования по высокой выносливости, которая зависит от количества неметаллических включений, соединений S, включений P и Cu, а также Ni в заготовке, которые позиционируются как концентраторы напряжений, в местах которых появляются трещины, их максимальный размен не должен превышать 2 баллов [2].

Обезуглероженный слой катанки на поверхности является браком, сама структура катанки должна быть однородной, так же не допускаются поверхностные дефекты, такие как сколы, трещины, навары [3].

Диаметр катанки может находиться в диапазоне 5.0–8.0 мм [4].

Если карбиды и неметаллические включения в проволоки находятся в большом количестве, то при волочении их размер может достигать размера диаметра заготовки, т.к. они плохо дробятся и растягиваются во время холодной деформации [5].

Влияние неметаллических включений на обрывность рассмотрено в работе [6, 7].

В работе [8] рассмотрено влияние металлургических факторов на качество катанки под металлокорд.

Связь между неметаллическим включением и основной текстурой в [9] рассматривается, как связь двух фаз. Вакансии и межузельные атомы (включение: O, N, S, H; матрица: C, N, O, H) могут находиться в границе включения-матрица как четко различимые точечные дефекты, могут быть расщеплены между несколькими атомными позициями [9].

Неметаллические включения увеличивают напряжения (эквивалентные до 974 МПа) во время волочения в первой волоке. Был произведен ряд исследований развития трещин [10, 11] с помощью электронного микроскопа [12, 13], которые подтверждают взаимосвязь наличия неметаллических включений, трещин и концентрации напряжений между собой [14].

Вокруг неметаллических включений образуются завихрения фрагментов текстуры, твердость вокруг включения повышается, что влияет на процесс обжатия во время волочения [7]. Замечено, что низкая шероховатость волок позволяет захватывать больше смазки, что происходит из-за увеличения контактной поверхности эмульсии и инструмента [15].

Неметаллические включения, как замечено в [9] могут поворачиваться, изменять положение и деформироваться, раскалываться и дробиться в ходе деформации и по ее направлению.

Как видно на рис.1, (рис.2 источника [16]) деформация вокруг неметаллического включения у поверхности протекает иначе, образуется рельефная поверхность проволоки.

Можно сделать вывод, что поведение неметаллических включений под поверхностью тонких проволок изучено недостаточно. Из-за нарушения деформации латунного покрытия над рельефным участком, содержащим в себе неметаллическое включение под поверхностью, может происходить дополнительное откалывание латунного слоя [17] и формироваться "свежее" покрытие [1, 18].

Также не уточнено влияние неметаллических включений под поверхностью на плотность тока на поверхности при электроосаждении меди и цинка их влияние на толщину покрытия.

Список литературы

- [1] Харитонов В.А., Столяров А.Ю. Совершенствование технологии производства высокопрочной проволоки для армирующих материалов автомобильных шин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – 97 с.
- [2] Цыбулина А.А., Стариков А.К. Производство металлокорда. – Москва: Metallurgia, 1979. – 64 с.
- [3] Серегина Е.С. Обрывность проволоки во время волочения по причинам наличия поверхностных дефектов наследованных от катанки // Литье и металлургия. 2017. №4(89). С. 26-31.
- [4] Орлов Г.А. Технологические процессы обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013. – 200 с.
- [5] Красильников Л.А., Лысенко А.Г. Волокочильщик проволоки: пособие для средних профессионально-технических училищ. – Москва: Metallurgia, 1987. – 320 с.
- [6] Wright, Roger N. Wire technology: process engineering and metallurgy. 2011. P.337.
- [7] Парусов Э.В., Губенко С.И., Сычков А.Б., Чуйко И.Н. О поведении неметаллических включений на разных стадиях деформации при производстве высокопрочной проволоки // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). 2017. №3. С. 6-15.
- [8] Кинжер М., Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я. Влияние металлургических факторов и термической обработки на структуру катанки под металлокорд // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №2. С. 83-94.
- [9] Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения. – Д.: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 526 с.
- [10] Laird C. The influence of metallurgical structures on fatigue crack propagation: a review. 1967. 131 p.
- [11] Blochwitz C., Tirschler W. In-Situ scanning electron microscope observations of the deformation behaviour of short cracks // Materials science and engineering. 2000. P. 273.
- [12] Nakajima K., Terao K., Miyata T. The effect of microstructure on fatigue crack propagation of $\alpha+\beta$ titanium alloys // Materials science and engineering.
- [13] Williams D.B., Carter C.B. Transmission electron microscopy: a textbook for materials science. Plenum press. 1996.
- [14] Барышников М.П., Чукин М.В., Гун Г.С., Бойко А.Б. Анализ влияния неоднородности структуры на напряженно-деформированное состояние стальной проволоки в процессе волочения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 1. С. 57-62.
- [15] Крымчанский И.И. Высокоскоростное волочение стальной проволоки и волочильный инструмент. // "СТАЛЬ". 2013. №12. С. 41-47.
- [16] Москалев Д.Н., Цыганов И.А., Мочалин И.М. Исследование неравномерности толщины латунного покрытия проволоки под металлокорд // Гальванотехника и обработка поверхности. 2020. Т. 28. №1. С. 11-19.
- [17] Столяров А.Ю., Мелихова Н.В. Оценка напряженного состояния латунного покрытия высокоуглеродистой проволоки при волочении // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2013. №1(39) С. 56-60.
- [18] Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. Москва: Metallurgia, 1989. 136 с.

УДК 621.891

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Харламов Ю. А.¹, Петров П. А.¹, Вишневецкий Д. А.¹

Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

RESTORING THE QUALITY PARAMETERS OF THE WEARED FRICTION SURFACES

Yuriy Kharlamov, Pavel Petrov, Dmitriy Vishnevskiy

Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine

Аннотация: Рассмотрены основные показатели качества поверхностей трения, характер изменения их начальных показателей и выходных параметров узла трения в течение межремонтного цикла. Описана схема потери и восстановления показателей качества поверхности трения в течение жизненного цикла детали. Предложены формулы для определения оптимальных припусков для обработки на ремонтные размеры. Перспективно использование комбинированных способов восстановления.

Ключевые слова: качество поверхности; восстановление деталей; припуск на обработку; ремонтный размер.

Abstract: The main indicators of the quality of friction surfaces are considered. The nature of changes in the initial surface quality indicators and the output parameters of the friction unit during the overhaul cycle is considered. The sequence of the loss and restoration of the friction surface quality indicators during the life cycle of the part according to the method of repair dimensions is analyzed. Formulas are proposed and given for determining optimal allowances for machining operations for repair dimensions. The possibility of using combined recovery technologies using the repair size method is shown.

Key words: surface quality; restoration of parts; machining allowance; repair dimension.

Введение.

Большие затраты ресурсов в ремонтном комплексе (РК) предприятий металлургии связаны с восстановлением размеров, расположения, формы, шероховатости и других показателей качества изношенных поверхностей [1–3]. При этом одновременно формируются и эксплуатационные свойства поверхностей, соответствующие их функциональному назначению, и прежде всего для обеспечения износостойкости и антифрикционности. Основными способами размерного восстановления деталей являются [4]: метод ремонтных размеров; метод установки дополнительных ремонтных деталей (ДРД); метод нанесения восстановительного покрытия; восстановление размерной точности деталей поверхностным пластическим деформированием с заданным перераспределением материала; комбинированные методы. Первые два способа, несмотря на

длительную историю применения, продолжают развиваться. Успешно развиваются и находят практическое применение в РК способы нанесения достаточно толстых восстановительных слоев и покрытий – разнообразные технологии наплавки и газотермического напыления. Однако эти технологии весьма затратны, требуют больших капитальных вложений. Поэтому анализ технологических возможностей других методов восстановления и поиска путей снижения затрат на восстановление изношенных поверхностей представляет практический интерес.

Анализ последних исследований и публикаций. Технологическим особенностям восстановления деталей различными методами посвящено много работ [5–8], главным образом, их физико–технологическим возможностям. Но весьма ограничено количество публикаций по размерному анализу восстановительных технологий обоснованному назначению припусков на переходы обработки восстанавливаемых поверхностей и толщину наносимых покрытий и пр., более подробно изучены проблемы механической обработки восстанавливаемых деталей. Проблемной является задача выбора оптимального метода восстановления изношенных поверхностей.

Цель и задачи исследования заключаются в разработке методики определения промежуточных размеров изношенных поверхностей деталей при восстановлении методом ремонтных размеров и припусков на операциях их обработки.

Основной материал исследования. Основными показателями качества поверхностей трения являются: макроотклонения размеров и формы (отклонение от плоскостности, цилиндричности и др.); волнистость; шероховатость; остаточные напряжения; структура основного материала детали; структура поверхностного слоя; текстура микрорельефа поверхности (направление следов обработки, наличие специального маслостойкого рельефа и пр.) [9]. Исходные показатели качества поверхности в процессе трения изменяются [10]. Исключение составляют остаточные напряжения и структура основного материала, которые могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей. В большинстве случаев уже в период приработки существенно меняются шероховатость и структура поверхностного рельефа. Волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании, а геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допускаемых значений, принятых при изготовлении, практически до конца службы узла трения, если оценка его работоспособности производится по пара-

метрам точности. Схема изменений исходных показателей качества поверхности трения в процессе эксплуатации узла трения представлена на рисунке 1. Здесь в качестве выходного параметра рассматривается размер поверхности трения. Однако в практике встречаются случаи, когда определяющую роль в обеспечении работоспособного состояния поверхности трения играют параметры шероховатости, текстуры микрорельефа, формы изношенной поверхности и др.



Рисунок 1. Схема изменения начальных показателей качества поверхности и выходных параметров триботехнической системы (ТС) в процессе трения в пределах допустимых отклонений (I – участок приработки; II – участок нормального изнашивания; III – участок форсированного изнашивания)

До достижения участка форсированного изнашивания деталь должна быть подвергнута восстановлению одним из указанных выше методов. Рассмотрим случай восстановления методом ремонтных размеров (МРР). На рис. 2 показана схема потери и восстановления работоспособного состояния поверхности трения в течение жизненного цикла детали. В течение первого межремонтного срока службы расходуется поверхностный слой толщиной X_1 , соответствующий достижению предельного значения размера поверхности для используемого сопряжения, деталь при восстановлении обрабатывается на первый ремонтный размер. При этом снимается Z_{o1} припуск на обработку под первый ремонтный размер. В целом для обработки на первый ремонтный размер расходуется слой толщиной $X_{p1} = X_1 + Z_{o1}$. В следующем межремонтном цикле деталь изнашивается до следующего предельного размера и расход

толщины поверхностного слоя достигает значения X_2 и поверхность подвергается обработке под второй ремонтный размер со снятием припуска Z_{o2} . Для обработки на второй ремонтный размер расходуется слой толщиной $X_{p2} = X_2 + Z_{o2}$. Такая последовательность процессов изнашивания и восстановления подвергается многократно до полного допустимого расходования толщины рабочего слоя поверхности детали Δ .

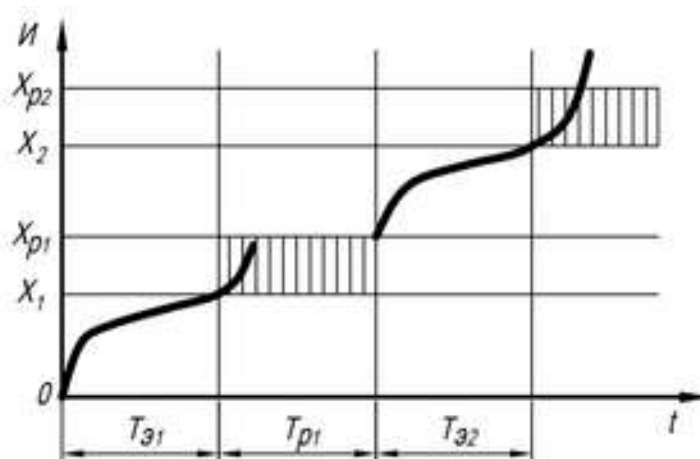


Рисунок 2. Схема потери и восстановления показателей качества поверхности трения в течение жизненного цикла детали по методу ремонтных размеров

Для наружных поверхностей при обработке под ремонтный размер значение одностороннего минимального припуска на первой операции (переходе) обработки

$$Z_{1min} = (Rz_u + Wz_u + h_u) + Y_u + \varepsilon_1,$$

а общий припуск на обработку по всем переходам обработки

$$Z_0 = (Rz_u + Wz_u + h_u) + Y_u + \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^n [(Rz + h)_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_u],$$

где Rz_u – высотный параметр шероховатости изношенной поверхности; Wz_u – высотный параметр волнистости изношенной поверхности; h_u – глубина дефектного поверхностного слоя, образовавшегося при эксплуатации детали, включая локальные дефекты и отклонения по глубине следов износа и др.; Y_u – глубина профиля износа; Δ_1 – погрешность установки ремонтной заготовки на первом переходе обработки данной поверхности; Rz_{i-1} , h_{i-1} , ρ_{i-1} – соответственно высотные параметры шероховатости, глубина дефектного поверхностного слоя и суммарные значения пространственных отклонений, оставшихся от предыдущей обработки; Δ_{yi} – погрешность установки ремонтной заготовки на

переходах обработки; n – количество переходов обработки, определяется требуемой точностью поверхности и принятым маршрутом обработки. Под знаком суммы в последнем выражении учитываются данные по следующим переходам выбранного маршрутного процесса обработки восстанавливаемой поверхности.

Тогда номинальное значение первого ремонтного размера

$$H_{p1} = H_0 - X_1 - Z_{01},$$

где H_0 – начальный (исходный) размер.

Допустимая толщина поверхностного слоя, расходуемого для восстановления МРР

$$\Delta = H_0 - H_{\text{дкр}},$$

где $H_{\text{дкр}}$ – предельно возможный минимальный размер детали по условиям напряженно-деформированного состояния, конструктивным требованиям и другим конструктивно-технологическим критериям.

С другой стороны

$$\Delta = \sum_{i=1}^m (X_i + Z_{0i}) = \sum_{i=1}^m X_{pi},$$

где m – количество возможных ремонтных размеров, X_{pi} – толщина поверхностного слоя, расходуемого при каждом межремонтном цикле.

При надлежащей организации эксплуатации можно принять значения общих припусков на обработку под ремонтные размеры одинаковыми. Тогда

$$m \leq \frac{\Delta}{X_{\text{ср}}},$$

где $X_{\text{ср}}$ – среднее значение толщины поверхностного слоя, расходуемого при каждом цикле восстановления.

Для цилиндрических поверхностей

$$2Z_{1\text{мин}} = 2 \left[(Rz_u + Wz_u + h_u) + Y_u + \varepsilon_1 \right].$$

Общий припуск с учетом последующих переходов обработки

$$2Z_0 = 2 \left\{ (Rz_u + Wz_u + h_u) + Y_u + \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^n \left[(Rz + h)_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i \right] \right\}.$$

Тогда номинальное значение первого ремонтного размера

$$D_{p1} = D_0 \pm 2X_1 \pm 2Z_{01},$$

где D_0 – начальный диаметр восстанавливаемой поверхности; знак «+» принимается для внутренних цилиндрических поверхностей, «-» – для наружных.

Наличие градиента физико-механических свойств поверхностного слоя по глубине может быть причиной изменения интенсивности изнашивания поверхностей и неравномерной величины износа в различных межремонтных циклах. Это может привести к изменению величины снимаемого припуска для получения требуемой величины ремонтного размера. По назначению (характеру) выполняемых ремонтных размеров следует различать обработку на:

- 1) свободные ремонтные размеры (получение требуемых значений показателей макро- и микрогеометрии поверхности и пространственного расположения);
- 2) переработка изношенной детали на аналогичную другого типоразмера;
- 3) ремонтный размер, рассчитанный с учетом замены (изготовления) сопрягаемой детали;
- 4) регламентированные (стандартные) ремонтные размеры;
- 5) устранение геометрических погрешностей сопрягаемых поверхностей деталей с последующей селективной сборкой сопряжения.

По материалам и конструктивным особенностям деталей можно различать следующие виды восстановления обработкой на ремонтные размеры:

- 1) деталей с однородными свойствами материала по всему сечению детали;
- 2) покрытий с однородными свойствами по толщине, допускающей обработку на ремонтные размеры;
- 3) модифицированных поверхностных слоев с отрицательным градиентом механических свойств (например, уменьшающейся твердостью по глубине);
- 4) градиентных материалов и покрытий;
- 5) многослойных покрытий с чередующимися рабочими и промежуточными слоями;
- 6) накладных или сменяемых элементов и дополнительных ремонтных деталей, допускающих обработку на ремонтные размеры.

Новые возможности восстановления сопряжений деталей узлов трения открываются с развитием аддитивных технологий и нанесение восстановительных слоев также может быть отнесено к технологиям ремонтных размеров с наращиванием поверхностных слоев.

Выводы.

1. Эффективность восстановления изношенных поверхностей методом ремонтных размеров может быть повышена обоснованным выбором припусков на обработку с учетом возникших при эксплуатации отклонений их параметров качества, а также созданием при изготовлении новых деталей поверхностных слоев с более равномерным распределением свойств по глубине.

2. Конструкция узлов трения должна быть технологичной, учитывающей назначение ремонтной обработки и наличие оптимальных конструктивных параметров поверхностных слоев.

Список литературы.

- [1] Золотарев А. В., Кондаков А. И. Характерные дефекты деталей металлургического оборудования и технологическое обеспечение их ремонта на примере машин непрерывной разливки стали // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – №11. – С. 38–42.
- [2] Repair and maintenance weld overlay solutions for steel mills. Voestalpine Böhler Welding – Voestalpine, 2018. – 28 p.
- [3] Sustainable Renovation within Metallurgical Production: monograph / Janette Brezinová, Ján Viňáš, Pavlo O. Maruschak, et.al. – Slovakia, Technical University of Košice. – 2017. – 200 p.
- [4] Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Петров и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 673 с.
- [5] Рябцев И. А., Сенченков И. К. Теория и практика наплавочных работ. – К.: «Екотехнология», 2013. – 400 с.
- [6] Золотарев А. В. Научно–методическая база технологического обеспечения эксплуатационных свойств роликов установок непрерывной разливки стали при их ремонте // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 12. С. 39–45.
- [7] Наследование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств изделий с покрытиями / С. А. Клименко, А. Г. Колмаков, В. Я. Лебедев, В. И. Бородавко // Известия Национ. АН Беларуси. Серия физ.–техн. наук, 2015. №3. – С. 31–40.
- [8] Ситников А. А., Собачкин А. В., Камышов Ю. Н. Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями // Научно–технические технологии в машиностроении, 2019, № 2 (92). – С.29–36.
- [9] Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А. Г. Сулова. М: Машиностроение. 2008. – 320 с.
- [10] Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин / М. Л. Хейфец, А. С. Васильев, А. И. Кондаков, Л. Танович // Известия НАН Беларуси. Серия физико–технических наук. – 2015. №3. – С.10–22.

УДК 621.771.23

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Пономарев М. К.¹, Бахаев К. В.¹

Липецкий Государственный Технический Университет, г. Липецк, Россия

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF LOW-ALLOYED STEEL AFTER COOLING

Maksim Ponomarev¹, Konstantin Bakhaev¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Аннотация: В данной работе проведено математическое моделирование формирования микроструктуры низколегированной стали после горячей прокатки и охлаждения. Моделирование осуществлялось с использованием программного обеспечения QTSteel.

Ключевые слова: Прокатка, микроструктура, нагрев, охлаждение, моделирование.

Abstract: In this paper, mathematical modeling of the formation of the microstructure of low-alloy steel after hot rolling and cooling is carried out. The simulation was performed using QTSteel software.

Key words: Rolling, microstructure, heating, cooling, modeling.

На сегодняшний день активно проводятся исследования в области совершенствования свойств низкоуглеродистой стали ответственного назначения. Одной из главных целей таких исследований является получение мелкозернистой структуры, обеспечивающей уникальное сочетание прочностных и пластических свойств. Экспериментальные исследования в данной области обходятся дорого, поэтому в большинстве случаев применяют математическое моделирование. Математические модели помогают рассмотреть тела не только на макро-, но и на микроуровне, позволяют изучать внутреннюю структуру материала [1].

За счет изменения структурного состояния сталей и получения, например, ферритно-бейнитной или ферритно-мартенситной структуры удастся обеспечить значительное повышение комплекса свойств традиционных марок конструкционных сталей. Необходимо заметить, что структуры современных сталей, обеспечивающие высокий комплекс ее механических свойств, являются неравновесными и чрезвычайно сложными. Их интерпретация и математическое описание требует специализированного оборудования и отработанных методик [1].

Программное обеспечение QTSteel разработано для прогнозирования влияния термической обработки закаленных, углеродистых и легированных

сталей с точки зрения микроструктуры и механических свойств. Оно позволяет выбрать соответствующую сталь и оптимизировать термическую обработку для новых и существующих компонентов. Путем наложения данных кривой охлаждения на диаграмму ССТ (непрерывность, охлаждение и преобразование) программное обеспечение предсказывает микроструктуру по толщине и механические свойства.

Программа QTSteel рассчитывает соотношение различных микроструктурных составляющих и механических свойств сталей после термической обработки (закалки, отпуска). Начиная с химического состава и условий аустенизации времени и температуры, программа вычисляет соответствующую диаграмму ССТ, которая описывает разложение переохлажденного аустенита на феррит, перлит, бейнит и мартенсит. Предсказанные или определенные пользователем диаграммы ССТ можно использовать для компьютерного моделирования изотермического преобразования указанной стали для predetermined кривой охлаждения. Программное обеспечение позволяет разделить кривую охлаждения на последовательности с равномерной скоростью охлаждения и рассчитать процентное содержание различных микроструктурных компонентов (феррит, перлит, бейнит или мартенсит) для каждой последовательности. На основе микроструктуры спрогнозировать значение твердости по Виккерсу (HV), которое после этого можно преобразовать в типичное значение прочности R_m или твердость в других шкалах (HB, HRC, HSH). В QTSteel существуют специальные алгоритмы для оценки предела текучести. Компьютерное моделирование разложения аустенита может сопровождаться условиями отпуска (время и температура), которые затем позволяют рассчитать конечные механические свойства стали. Полученные свойства выбранной стали могут быть показаны либо для одной выбранной кривой охлаждения с последующими условиями отпуска, либо с использованием изолиний механических свойств, распределенных по 2D-корпусу, либо в виде линейных графиков механических свойств на различных расстояниях ниже поверхности детали.

В данном исследовании рассматривалась конструкционная низколегированная сталь 09Г2С со следующим химическим составом (масс. %): C=0,100; Mn=1,420; Si=0,590; Cr=0,050; V=0,002; Al=0,042; N=0,005; Ni=0,020. Были построены математические модели прокатки с различной скоростью охлаждения (0,1; 1; 2; 50°C/c).

Минимальный уровень прочностных свойств стали 09Г2С наблюдается после охлаждения со скоростью 0,1°C/c, когда формируется феррито-перлитная

структура. Увеличение скорости охлаждения до 1 и до 2°С/с приводит к определенному повышению пределов текучести и прочности. Наиболее высокий уровень прочностных характеристик обеспечивает охлаждение со скоростью 50°С/с, при котором формируется преимущественно бейнитная структура. Термокинетическая диаграмма стали 09Г2С при скорости охлаждения 50°С/с приведена на рисунке.

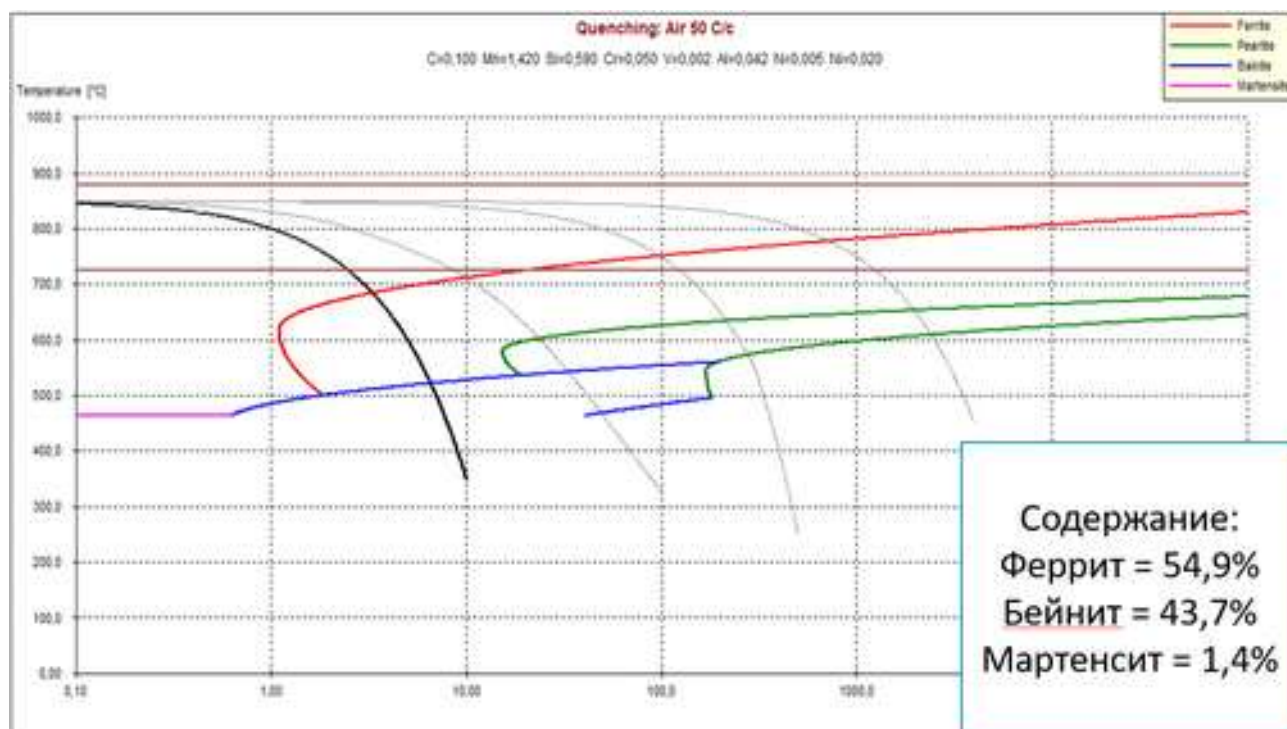


Рисунок 1. Термокинетическая диаграмма стали 09Г2С при скорости охлаждения 50°С/с

При ускоренном охлаждении формируется более мелкодисперсная структура, а технологические параметры и химический состав стали позволяют управлять величиной зерна и соотношением структурных составляющих, а также их расположением и, в результате, свойствами металла [2].

Таким образом, применение технологии ускоренного охлаждения листового проката позволяет облегчить условия работы оборудования листопркатных станов в результате снижения усилий прокатки в чистовой стадии деформации и повысить их производительность. При этом, совершенствуется микроструктура, состоящая из смеси игольчатого феррита и бейнита по всей толщине листа, благодаря чему обеспечивается необходимое упрочнение при меньшем расходе легирующих элементов и повышается ударная вязкость стали [3].

Список литературы

- [1] Шкатов В.В., Мазур И.П., Кавалек А., Жучкова Т.С. Модель кинетики статической рекристаллизации аустенита в углеродистых и низколегированных сталях при горячей прокатке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 69–74.
- [2] Формирование микроструктуры из наклёпанного аустенита стали марки 09Г2С. Бобков Е.Б., Аленичев И.О. Тенденции развития современной науки: сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов ЛГТУ в 2-х ч. Ч.1. - Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. - с. 184-185.
- [3] Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Кн.1: Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.

УДК 669.184

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА АЦВ КЦ-1
С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ ПОНИЖЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ
УГЛЕРОДА В РАСПЛАВЕ**

Саитгараев А. А.¹

¹ПАО «НЛМК», г. Липецк, Россия

**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL MODE OF RH VACUUM UNIT
WITH THE PURPOSE OF ACHIEVING THE REDUCED CARBON
CONTENT IN THE MELT**

Saitgaraev Albert¹

¹PJSC «NLMK», Lipetsk, Russia

Аннотация: В статье описан способ решения задачи достижения и стабилизации содержания углерода на уровне 0,002 % в расплаве после процесса обезуглероживания на агрегате циркуляционного вакуумирования

Ключевые слова: обезуглероживание, вакуумирование

Annotation: The article provides a solution to the problem of achieving and stabilizing the carbon content at the level of 20ppm after the decarburization stage at the circulating vacuum unit

Key words: decarbonization, vacuuming

Введение

В Конвертерном цехе № 1 ПАО «НЛМК» при производстве изотропных марок сталей достижение углерода на уровне 0,002% после процесса обезуглероживания на агрегате циркуляционного вакуумирования (АЦВ) было не стабильно.

Модели и методы Постановка задачи

Подготовить базу данных с технологическими параметрами производства изотропных марок сталей. В соответствии с полученными данными выявить причины нестабильности технологического процесса, определить значимые параметры, влияющие на содержание углерода в пробе после процесса обезуглероживания. Создать модель прогноза содержания углерода без применения кислорода и с применением кислорода во время процесса обезуглероживания, который длится 18 минут.

Этап графического и статистического анализ

Первый шаг - анализ влияния времени вдувания кислорода на содержание углерода после обезуглероживания:

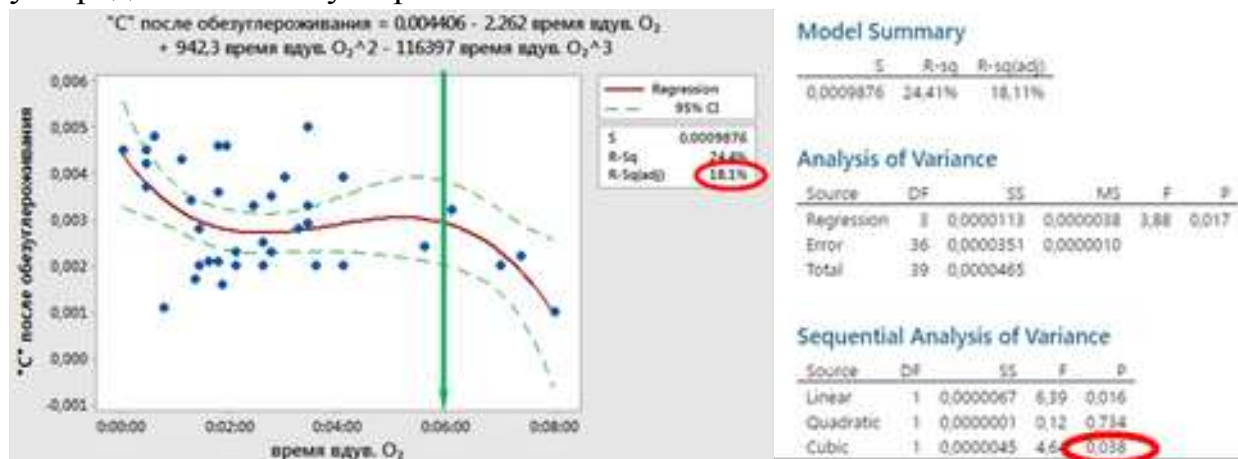


Рисунок 1. Зависимость влияния времени вдувания кислорода на содержание углерода

Выявлено наличие «площадки» между продолжительностью вдувания кислорода 2 и 6 минуты, что с технологической точки зрения говорит о процессе насыщения металла кислородом (рис. 1). В результате решено рассмотреть возможность вдувания кислорода с объемом 1200 – 1800 м³/ч не менее 6-ти минут в процессе обезуглероживания.

Регрессионный анализ

Регрессионный анализ фактических данных позволил спрогнозировать поведение углерода в зависимости от подачи лифт-газа. Для построения модели использованы данные фактической окисленности и температуры металла, которые были измерены перед плавкой.

Модель без подачи кислорода (рис.2). Для достижения уровня углерода 0,0027% модель предлагает вдувать лифт-газ с расходом аргона 80 м³/ч на минимальном уровне в течение 1,29мин (1мин 17сек) в начальный момент (минимальное историческое время), далее переход на расход лифт-газа 140 м³/ч в течении 16,71мин (16 мин 43 сек). Данная модель показывает, что для проведения глубокого обезуглероживания расплава необходимо увеличивать продолжительность времени подачи лифт-газа с повышенным расходом.

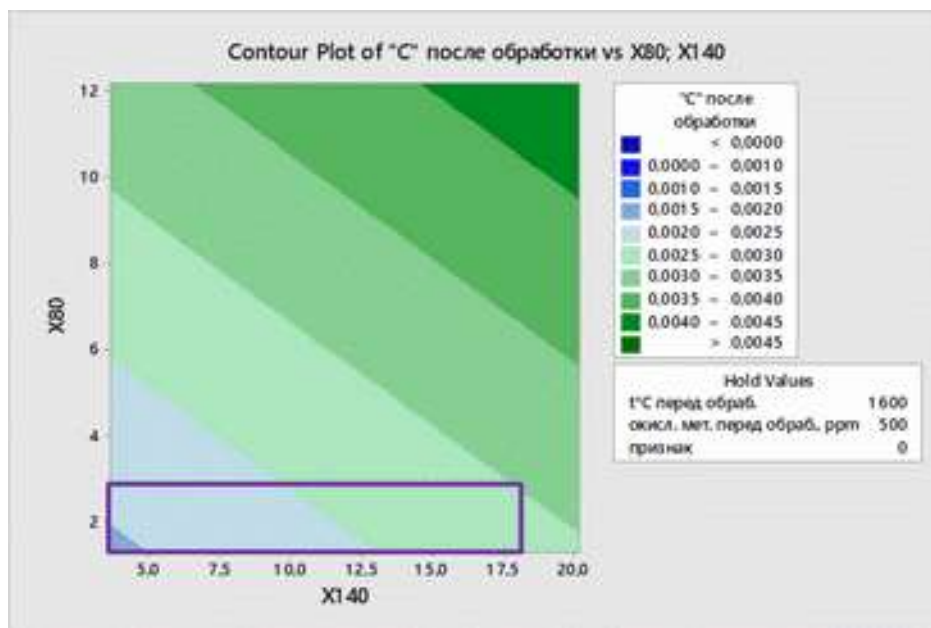


Рисунок 2. Создание модели процесса обезуглероживания без применения кислорода

Модель с вдуванием кислорода (рис.3). Для достижения уровня углерода 0,002% модель предлагает осуществлять вдувание лифт-газа с расходом аргона 80 м³/ч на уровне 10,57 мин (10 мин 34 сек) в начальный момент, и далее с расходом аргона 140 м³/ч – на уровне 7,43 мин (7 мин 26 сек). В результате при увеличении времени вдувания аргона с минимальным расходом лифт-газа (80 м³/ч) расплав, который медленно циркулирует через патрубки, более полно насыщается кислородом и как следствие достигается глубокое обезуглероживание.

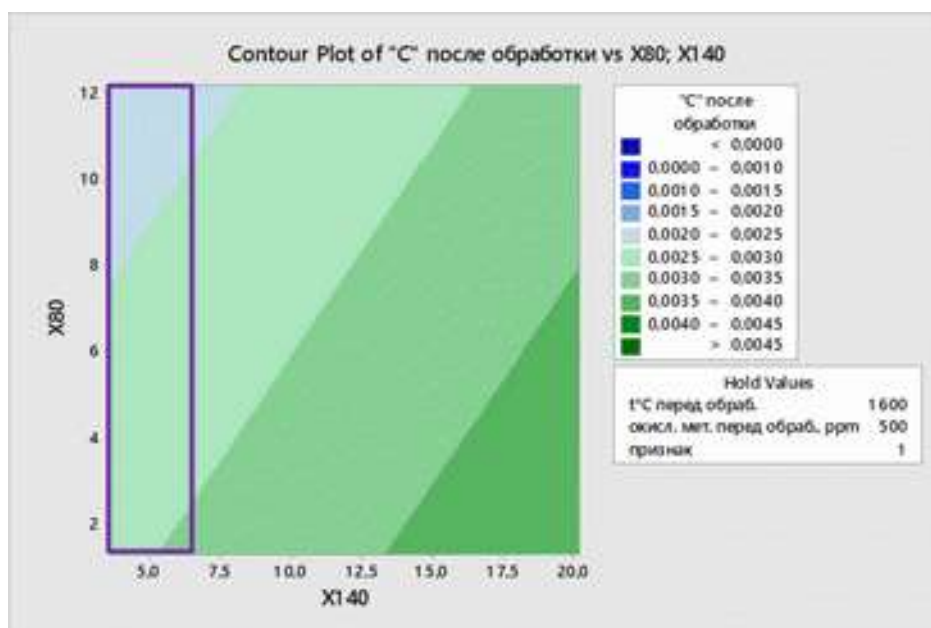


Рисунок 3. Создание модели процесса обезуглероживания с применением кислорода

По результатам проведения экспериментальных плавков установлена необходимость подачи кислорода на первой и второй плавках в серии, что позволяет установить в рабочем пространстве вакуумкамеры оптимальный температурный режим. Еще одно важное условие для обезуглероживания – промыв вакуумкамеры от гарнисажа содержащего углерод, образующийся после разогрева природным газом во время технологического простоя.

Обсуждение полученных результатов

1. В ходе проведения опытных плавков подтверждена положительная динамика снижения углерода в расплаве при продолжительности подачи кислорода не менее 6 минут в процессе обезуглероживания.

2. При использовании модели без подачи кислорода необходимо минимизировать продолжительность вдувания лифт-газа на уровне 80 м³/ч – не более 3-х минут на этапе бурного выделения СО в начальный период. Далее перевести процесс на максимальный расход лифт-газа – 140 м³/ч и поддерживать его до окончания процесса обезуглероживания (рис.4).

3. При использовании модели с подачей кислорода наилучший результат достигается при обеспечении продолжительности вдувания лифт-газа 80 м³/ч в течении 12 минут, с последующим переводом расхода лифт-газа до 140 м³/ч (рис.4).

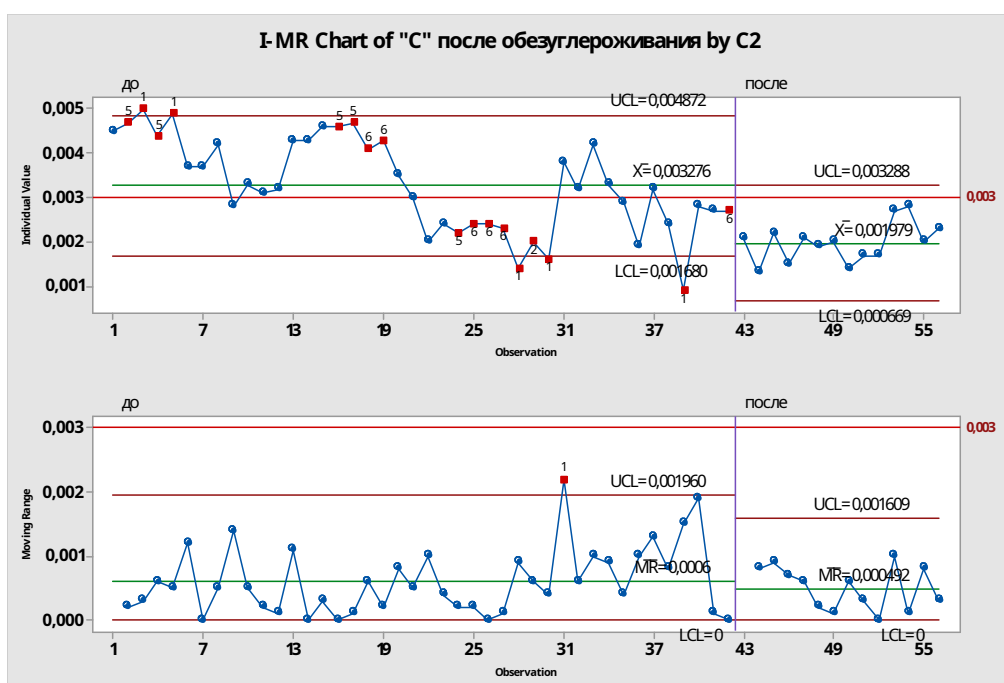


Рисунок 4. Анализ содержания углерода после этапа обезуглероживания подката 0405 до внедрения проекта и после

Выводы

1. В результате реализации мероприятий по оптимизации процесса обезуглероживания достигнуто снижение среднего содержания углерода в пробе с 0,003276 % до 0,001979 %.

2. Даны рекомендации по исключению последующего насыщения расплава углеродом – переход на ковши с монолитной футеровкой и использование низкоуглеродистых ферросплавов.

Выражаю благодарность за проведение опытных плавов на агрегате циркуляционного вакуумирования КЦ-1:

1 А.В. Ярошенко – директору Дирекции по планированию и организации производства;

2 В.Н. Караваеву – начальнику Конвертерного цеха № 1;

3 А.А. Сумину – начальнику участка внепечной обработки стали (АЦВ) КЦ-1;

4 Д.А. Ковалеву – начальнику Управления развития технологии;

5 Е.Н. Тюленеву – начальнику отдела Управления развития технологии.

УДК 005.6, 658.5, 669.018.583

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ LEAN SIX SIGMA ПРИ
ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ
РЕМОНТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ
АГРЕГАТОВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦЕХА ТРАНСФОРМАТОРНОЙ
СТАЛИ ПАО «НЛМК»**

Глущенко С. Р.¹

¹ПАО «НЛМК», г. Липецк, Россия

**APPLICATION OF THE LEAN SIX SIGMA METHODOLOGY IN THE
OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF PLANNED-PREVENTIVE
REPAIRS OF METALLURGICAL EQUIPMENT ON THE EXAMPLE OF
PROTECTIVE COATING UNITS OF THE TRANSFORMER STEEL SHOP**

Glushchenko Sergey¹

PJSC NLMK, Lipetsk, Russia

Аннотация: В 2017 году, ПАО «НЛМК» стартовал очередной стратегический цикл развития компании. Одним из ключевых направлений стало развитие ремонтной функции, а в качестве одного из ее базовых направлений была выделена оптимизация длительности планово-предупредительных ремонтов (ППР) основных металлургических агрегатов. Детальный анализ производственной цепочки помог определить узкие места, и в периметр проекта были взяты агрегаты защитных покрытий (АЗП) Цеха трансформаторной стали.

Ранее, в основе проектов по оптимизации длительности ППР в ПАО «НЛМК» лежали исключительно инструменты бережливого производства, такие как картирование, быстрая переналадка, стандартная операционная процедура и др., однако, данный проект был выполнен по методологии Lean Six Sigma, особенностью которой является комплексный подход, в т.ч. с применением инструментов статистического анализа.

Ключевые слова: бережливое производство, 6 сигм, картирование, быстрая переналадка, анализ системы измерений, регрессионный анализ, статистический контроль процессов.

Abstract: In 2017, NLMK entered another strategic development cycle for the company. One of the key directions was the development of the repair function, and as one of its basic directions the optimization of the duration of scheduled preventive maintenance (PM) of the main metallurgical units was highlighted. A detailed analysis of the production chain helped to identify bottlenecks, and the protective coating units of the Transformer Steel Workshop were taken into the project perimeter.

Previously, projects to optimize the duration of PM at NLMK were based solely on lean manufacturing tools, such as Value Stream Mapping, Single-Minute Exchange of Dies, Standard Operating Procedure, etc., however, this project was carried out using the Lean Six Sigma methodology, a feature of which is an integrated approach, incl. using statistical analysis tools

Key words: Lean, Six Sigma, Value Stream Mapping, Single-Minute Exchange of Dies (SMED), Measurement System Analysis (MSA), Regression Analysis, Statistical Process Control (SPC).

Введение

Методология Lean Six Sigma появилась в результате объединения методов бережливого производства (Lean), основой которого является сокращение потерь и ускорение процессов, и 6 сигм (Six Sigma), основой которого является улучшение качества с применением инструментов статистического анализа. Преимущество данной методологии заключается в системном подходе к решению поставленных задач, проекты четко структурированы, а также в наличии имеется широкий спектр инструментов.

1. Методология Lean Six Sigma

1.1. Определение границ и целей проекта

Условием успешной реализации любого проекта, в первую очередь, являются четкое определение его границ, метрик (первичной, вторичной, метрики последствий), а также правильный выбор цели, и методология Lean Six Sigma предлагает для этого ряд инструментов, основные из которых – SIPOC, Макрокарта процесса, а, кроме того, инструменты статистического анализа (диаграмма Паретто, описательные статистики и др.)

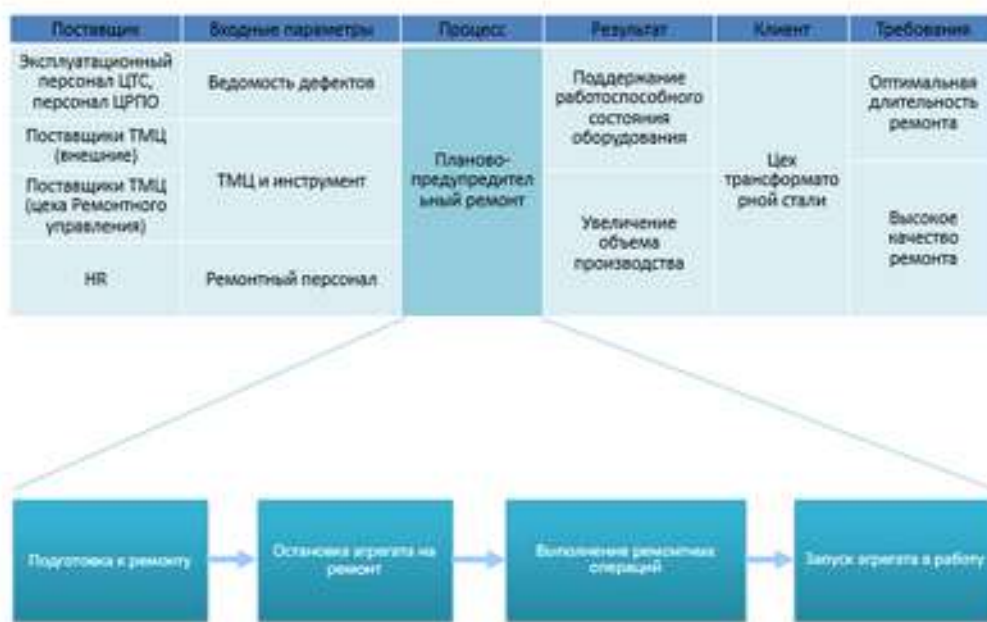


Рисунок 1. SIPOC и Макрокарта процесса для проекта «Увеличение производства продукции в Цехе трансформаторной стали ПАО «НЛМК» за счет оптимизации длительности ППР АЗП-1,2,4»

Так в периметр проекта «Увеличение производства продукции в Цехе трансформаторной стали ПАО «НЛМК» за счет оптимизации длительности

ППР АЗП-1,2,4» были включены все шаги Макрокарты, от подготовки к ремонту до запуска агрегата в работу, что позволило не только выявить и устранить потери, но и оценить эффективность взаимодействия ремонтных служб и технологического персонала. В качестве первичной метрики рассматривалась общая длительность ППР, вторичная метрика – увеличение объема производства Цеха трансформаторной стали, а в качестве метрики последствий была выбрана общая длительность внеплановых простоев в зоне ответственности ремонтного персонала.

1.2. Анализ возможностей процесса и построение карты текущего состояния

На первых этапах проекта Lean Six Sigma всегда выполняется анализ возможности процесса, который позволяет определить потенциал для улучшений, а также понять является ли процесс управляемым. От полученного результата в первую очередь зависит дальнейшее развитие проекта, вполне вероятно, процесс настолько стабилен, что для его сдвига потребуются значительные затраты (модернизация оборудования, внедрение новых технологий и / или материалов и т.п.)

Отдельно стоит отметить анализ системы измерений (MSA). В классическом понимании – это оценка соответствия существующей системы измерения требованиям процесса, т.е., проще говоря, сможем ли мы увидеть изменение метрик проекта до и после внедрения улучшений. С точки зрения, на сколько корректно фиксируется длительность ППР, проводить MSA в нашем случае было бы не целесообразно, поэтому проверке подверглась методика инструментального контроля технического состояния оборудования. Полученные результаты (табл. 1) свидетельствуют о том, что существующая система измерения соответствует требованиям процесса (процентная доля компонентов дисперсии равна 6.28%, что меньше 9%).

Таблица 1. Результаты анализа системы измерений (выполнено в соответствии с методом разрушающего контроля).

Наименование показателя	Величина компонентов дисперсии	Процентная доля компонентов дисперсии
Система измерения	47,990	6,28%
Повторяемость	47,990	6,28%
Воспроизводимость	0,000	0,00%
Влияние образца	715,738	93,72%
Общая вариация	763,728	100,00%

Для оценки текущего состояния была построена Диаграмма течения процесса (в т.ч. отмечены шаги, добавляющие и не добавляющие ценность, а также проведен анализ процесса на наличие «скрытых фабрик»), и на ее основе сформирована матрица причинно-следственных связей, которая в дальнейшем послужила основой для проведения анализа режимов воздействия отказов (FMEA). Картирование ремонта помогло выявить межоперационные потери, а также проблемы во взаимодействии ремонтного и технологического персонала. А повысить эффективность самих ремонтных операций удалось за счет такого инструмента бережливого производства, как SMED (быстрая переналадка). К примеру, длительность замены комплекта обводных роликов натяжной станции сократилась на 63% (с 16,5 до 6 часов)

1.3. Факторный анализ и проектирование карты будущего состояния процесса.

Еще на этапе подготовки к картированию было установлено, что длительность ППР никак не зависит от численности задействованного в работах персонала, объема запланированных работ и других факторов. Напротив, перечень работ составлялся исходя из имеющихся ресурсов, что приводило к тому, что некоторые неисправности оборудования не устранялись. В связи с этим было принято решения провести анализ, который выявил влияние отдельных факторов на метрику последствий (количество и длительность внеплановых простоев в зоне ответственности ремонтного персонала в межремонтный период). Так для каждого из агрегатов были определены свои статистически значимые факторы (табл. 2).

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа для АЗП-4 (значение P-Value = 0.039, меньше 0.05, указывает на то, что длительность межремонтного периода является статистически значимым фактором).

	P-Value
Межремонтный период	0,039

Ориентируясь на результаты картирования, а также принимая во внимание итоги статистического анализа, был проведен анализ режимов воздействия отказа, разработаны мероприятия по улучшению текущего состояния, и составлена карта будущего состояния процесса.

1.4. Внедрение улучшений и статистический контроль достигнутого результата

Заключительный этап проекта – внедрение решений по улучшению и мониторинг достигнутого результата. Для этого были разработаны график реализации мероприятий и план передачи проекта, с подробным описанием действий на случай ухудшения контролируемых метрик.

В качестве основного инструмента контроля над процессом методология Lean Six Sigma предлагает Контрольные карты. Как видно на рис. 2-3, после внедрения улучшений наблюдается сокращение длительности ППР и внеплановых простоев в зоне ответственности ремонтного персонала. А статистическая значимость изменений подтверждается тестом гипотез для непрерывных данных, т.к. центры каждой из выборок (медианы) не попадают в доверительный интервал друг друга (табл. 3-4).

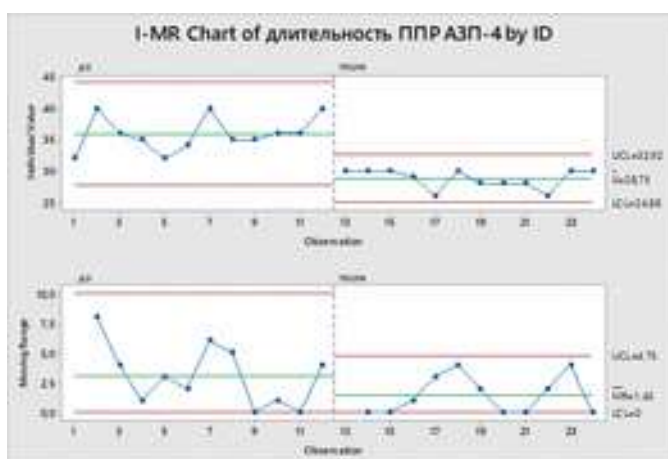


Рисунок 2. Контрольная карта длительности ППР для АЗП-4 до и после внедрения мероприятий по улучшению

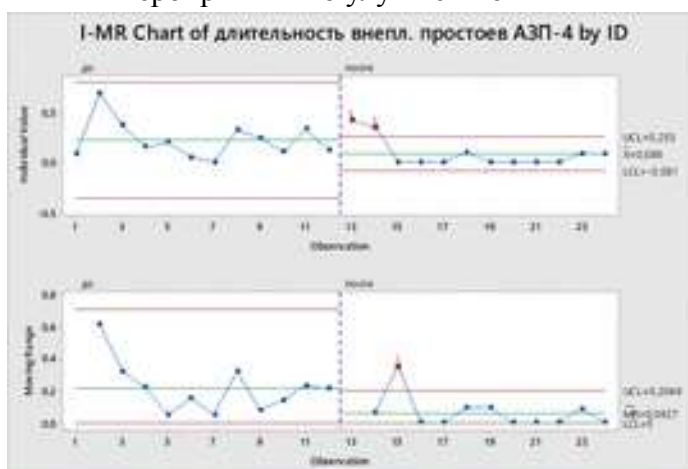


Рисунок 3. Контрольная карта длительности внеплановых простоев в зоне ответственности ремонтного персонала для АЗП-4 до и после внедрения мероприятий по улучшению

Таблица 3. Результаты теста гипотез для длительности ППР АЗП-4.

	Медиан а	Доверительный интервал для медианы
до	35,5	(34,2631; 38,9475)
после	29,5	(28; 30)

Таблица 4. Результаты теста гипотез для длительности внеплановых простоев АЗП-4.

	Медиан а	Доверительный интервал для медианы
до	0,175	(0,0852624; 0,327369)
после	0,000	(0; 0,0918951)

2. Результаты проекта

Проект был закрыт и передан владельцу процесса в декабре 2018 года. По итогам работы в 2019 году зафиксировано значительное улучшение процесса планово-предупредительного ремонта как с точки зрения сокращения общей длительности, так и с точки зрения повышения его качества:

- общая длительность ППР АЗП-1 сократилась на 24,8%, АЗП-2 – на 23,8%, АЗП-4 – на 21,4%;

- длительность внеплановых простоев в зоне ответственности ремонтного персонала АЗП-1 сократилась в 3,13 раза, АЗП-2 – в 2,29 раза, АЗП-4 – в 2,57 раз;

- общий фактически достигнутый экономический эффект проекта, за счет реализации дополнительного объема продукции, составил 34,8 млн. руб.

УДК 531+621.926

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВОБОДНОГО УДАРНОГО КОНТАКТА

Власенко Д. А.¹

¹ *Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, Украина*

ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE FREE IMPACT CONTACT PROCESS

Vlasenko Dmitriy Alekseyevich¹

¹ *Donbass State Technical Institute, Alchevsk, Ukraine*

Аннотация: В работе предложен аналитический метод определения основных параметров соударения условно абсолютно твердого ударного органа и куска материала в процессе его дробления свободным ударом. На основании законов сохранения энергии и импульса, зависимости механического напряжения и определения работы силы обоснованы математические зависимости для определения величины деформации дробимого тела при ударном контакте, максимального напряжения, возникающего в дробимом материале, максимальной силы и времени удара при контактном взаимодействии ударника и куска сферической формы. На основании сравнительного анализа полученных результатов обосновано применение комбинированного способа установки молотков на оси подвеса ротора в молотковых роторных дробилках.

Ключевые слова: свободный удар, деформация, напряжение, сила удара.

Abstract: The paper proposes an analytical method for determining the main parameters of the collision of a conditionally absolutely hard percussion organ and a piece of material in the process of its crushing by free impact. On the basis of the laws of conservation of energy and momentum, the dependence of mechanical stress and the definition of the work of force, mathematical dependences are substantiated to determine the magnitude of the deformation of the crushed body during impact contact, the maximum stress arising in the crushed material, the maximum force and time of impact during the contact interaction of the striker and a piece of spherical shape. On the basis of a comparative analysis of the results obtained, the use of a combined method of installing hammers on the rotor suspension axis in hammer impact crushers is justified.

Key words: free kick, deformation, stress, impact force.

Введение

В процессе дробления и измельчения каменно-рудных материалов используются различные способы разрушения, один из наиболее распространенных — наложение ударной нагрузки, который реализуется в различных типах ударных дробильно-измельчительных машин. Так, для фракционной подготовки различных шихтовых компонентов в химической и металлургической промыш-

ленности широкое применение получили молотковые роторные дробилки с различными способами установки ударных органов на роторе [1], в которых разрушение дробимого материала обеспечивается при реализации двух видов ударного нагружения: свободного удара [2] молотка по падающему куску и за счет удара разрушившихся частей куска, образовавшихся при свободном ударе молотка на первом этапе дробления о неподвижную преграду (отбойную плиту) [3].

Для обоснования основных технико-технологических характеристик дробилки и самого процесса дробления необходимо определить следующие параметры ударного контакта: деформацию куска в процессе ударного разрушения и силу удара, возникающую при соударении молотка с материалом.

Деформацию куска, напряжения и силу, возникающие на площадке контакта при ударном контакте с неподвижной преградой можно определить, воспользовавшись моделью ударного контакта Герца [4]. Процесс дробления различных материалов свободным ударом в данное время недостаточно рассмотрен и требует более детального изучения и обоснования его основных параметров.

Модели и методы

1.1. Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка аналитического метода определения силы удара, деформации куска материала и напряжений, возникающих в нем, а также времени соударения при реализации свободного удара условно абсолютно твердого ударника с куском материала сферической формы.

1.2. Основной материал исследования

Для математического моделирования процесса соударения условно абсолютно твердого ударника с куском дробимого материала сферической формы необходимо воспользоваться следующими положениями и законами классической физики и физики твердого тела [5]:

- принципом сохранения механической энергии;
- законом сохранения импульса;
- законом сохранения момента импульса;
- зависимостью работы силы в соответствии с определением энергии как риманова интеграла;

- определением деформации из теории упругости и пластичности;
- определением нормального механического напряжения.

При этом переход части кинетической энергии соударяемых тел в результате неупругих деформаций в тепловую не учитывается.

Схема взаимодействия ударника с куском дробимого материала в процессе свободного удара представлена на рисунке 1.

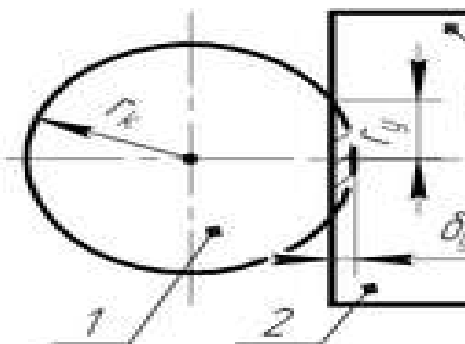


Рисунок 1. Схема ударного контакта условно абсолютно твердого ударника с куском дробимого материала сферической формы в процессе его деформации:
1 – дробимое тело; 2 – ударник.

При таком виде ударного взаимодействия механическая работа, совершаемая в процессе деформации куска материала, вычисляемая как интеграл от координат перемещения точки ударного контакта, равна изменению кинетической энергии ударника до ударного контакта и после его завершения:

$$\Delta E = \int_0^{x_{\max}} F(x) dx, \quad (1)$$

где ΔE — изменение кинетической энергии ударника;

$F(x)$ — сила удара, возникающая в процессе ударного контакта в зависимости от координат (зависит от площади контакта и предела прочности дробимого материала);

x — перемещение ударника в процессе деформации куска;

x_{\max} — координата конечного положения ударника в процессе деформации куска (после завершения ударного контакта).

После математических преобразований получается зависимость для определения деформации куска материала в процессе свободного удара:

$$\delta_y = \frac{\left(r_k - \frac{x}{2} \right) \left[\frac{x}{2} (1 + \sqrt{3}i) - r_k + \sqrt{3}i r_k \right]}{x}, \quad (2)$$

где r_k — условный радиус куска дробимого материала;
 χ — составляющая, определяющая условия ударного взаимодействия:

$$\chi = \sqrt[3]{4 \frac{\sqrt{\frac{3m_y(V_0^2 - V_k^2)}{2} \left[\frac{3m_y(V_0^2 - V_k^2)}{2} - 4\pi\sigma r_k^3 \right] - 6m_y(V_0^2 - V_k^2) + 8\pi\sigma r_k^3}}{\pi\sigma}}; \quad (3)$$

где m_y — масса ударного рабочего органа;
 V_0 — скорость ударника в начале ударного взаимодействия;
 V_k — скорость ударника после завершения ударного взаимодействия;
 σ — предел прочности материала при ударной нагрузке;
 i — мнимая единица.

Время удара можно определить как отношение расстояния (величина перемещения площадки контакта при максимальной деформации куска материала) к средней скорости ударника в процессе контактного взаимодействия:

$$t_y = \frac{2\left(r_k - \frac{\chi}{2}\right) \left[\frac{\chi}{2}(1 + \sqrt{3}i) - r_k + \sqrt{3}ir_k \right]}{\chi(V_0 - V_y)}. \quad (4)$$

Сила удара определяется как изменение импульса за время удара и зависимость для ее определения выглядит следующим образом:

$$F_y = \frac{m_y \chi (V_0^2 - V_y^2)}{2\left(r_k - \frac{\chi}{2}\right) \left[\frac{\chi}{2}(1 + \sqrt{3}i) - r_k + \sqrt{3}ir_k \right]}. \quad (5)$$

Максимальное напряжение, возникающее в куске материала на площадке контакта, расположенной на расстоянии от точки начала ударного контакта δ_y :

$$Q_{\max} = \frac{m_y \chi (V_0^2 - V_y^2)}{2\left(r_k - \frac{\chi}{2}\right) \left[\frac{\chi}{2}(1 + \sqrt{3}i) - r_k + \sqrt{3}ir_k \right] 2\pi(r_k \delta_y - \delta_y^2)}. \quad (6)$$

Для наглядного примера реализации полученного в работе метода определения основных параметров процесса свободного удара проведен сравнительный анализ результатов, полученных при определении деформации куска дробимого сырья, силы удара и максимального напряжения на площадке контакта от предела прочности материала для условий соударения, реализующихся в роторной молотковой дробилке ДМРиЭ 14,5×13 [6] в процессе дробления сырья с различными прочностными характеристиками при неподвижном (комбинированном) [7, 8] и шарнирном способе установки [2] молотков на оси подвеса ротора, представленных соответственно на графиках а, б, в (рисунок 2). При моделировании задавались следующие параметры процесса ударного

контакта: радиус куска материала — $r_k=0,04$ м; масса молотка — $m_y=16$ кг и конечная скорость — $V_k=45,37$ м/с для шарнирного способа установки рабочих органов; $m_y=192$ кг и $V_k=49,6$ м/с — для неподвижного способа подвеса молотков; $V_0=50,1$ м/с. Линейная скорость движения молотка в точке соударения после завершения ударного контакта с куском материала определялась по зависимости, предложенной в работе [9].

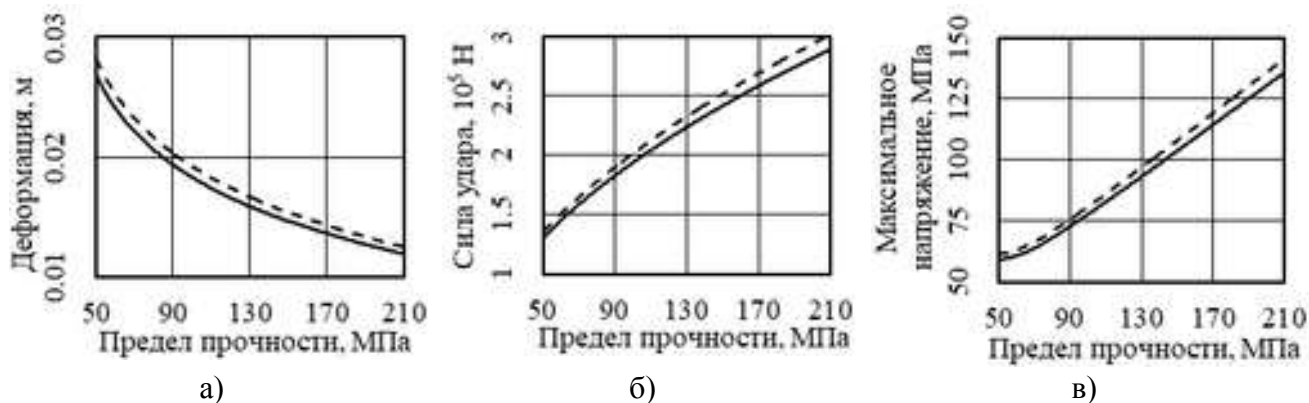


Рисунок 2. Графики зависимостей деформации куска (а), силы удара молотка по куску (б), максимального напряжения на площадке контакта (в) от предела прочности дробимого материала: (—) — при шарнирной установке молотков на оси ротора; (---) — при неподвижной установке.

Как видно из анализа графических зависимостей на рисунке 2 при использовании в ударных роторных дробилках молотков с комбинированным способом установки на оси подвеса ротора по сравнению с типовой конструкцией установки в процессе свободного ударного контакта рабочего органа с куском деформация дробимого материала увеличилась в среднем 1,05 раза, максимальное напряжение на площадке контакта — в 1,03–1,04 раза, а сила удара возросла на 4–5 %. При этом максимальное напряжение, возникающее в деформируемом куске при ударе, и при этом превышающее предел прочности дробимого материала, при котором обеспечивается гарантированное разрушение куска, выросло с 63 до 68 МПа, что позволяет подвергать дроблению каменно-рудное сырье с более высокими прочностными характеристиками.

2. Обсуждение полученных результатов

В работе разработан аналитический метод определения и получены математические зависимости таких основных параметров процесса свободного ударного контакта, как: величина деформации дробимого тела при ударном

контакте, максимальное напряжение, возникающее в дробимом материале, максимальная сила и время удара.

Проведен сравнительный анализ зависимостей деформации, силы удара и напряжения на площадке контакта от предела прочности материала для условий соударения, реализующихся в роторной молотковой дробилке ДМРиЭ 14,5×13 при неподвижном и шарнирном способе подвеса.

Установлено, что эффективность процесса дробления при использовании предложенного способа установки молотков на оси ротора выше, чем при типовой конструкции подвеса. При этом перспективным направлением исследования процесса дробления каменно-рудных материалов в роторных молотковых дробилках ударного действия является изучение процесса соударения молотка с материалом с целью определения требуемых энергосиловых и технологических параметров дробильной машины и конструктивных особенностей её рабочих органов.

В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом институте с привязкой к агломерационному и коксохимическому производству Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС».

Список литературы

- [1] *Власенко Д.А.* Обоснование конструктивно-технологических параметров процесса дробления материалов в молотковых дробилках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — 23 с.
- [2] *Борщев В.Я.* [и др.] Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2006. — 208 с.
- [3] *Кочетков А.В., Федотов П.В.* Некоторые вопросы теории удара // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». — 2013. — №5. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (дата обращения 10.10.2020).
- [4] *Герц Г.* Принципы механики, изложенные в новой связи. — М.: АН СССР, 1959. — 387 с.
- [5] *Орир Дж.* [Jay Orear] Физика: учебник. — Пер. с англ. и научная редакция Ю.Г. Рудого и А.В. Беркова. — М.: «КДУ», 2019. — 752 с.
- [6] ГОСТ 12376–71. Дробилки однороторные среднего и мелкого дробления. Технические условия. — Введ. 01.01.1973. (Изм. 01.01.1990).
- [7] Пат. 179695 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/16 (2006.01). Ротор молотковой дробилки / Д.А. Власенко, А.В. Карпов; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2018106733; заявл. 22.02.18; опубл. 22.05.18, Бюл. № 15. — 3 с.: ил.
- [8] Пат. 189059 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/16 (2006.01). Ротор молотковой дробилки / Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Э.П. Левченко; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2018143765; заявл. 10.12.18; опубл. 07.05.19, Бюл. № 13. — 3 с.: ил.
- [9] *Власенко Д.А., Левченко Э.П.* Влияние способа крепления молотков на оси ротора на скорость движения известняка к отбойной плите в ударной дробилке // Сб. науч. тр. ДонГТУ. Алчевск. — 2017. Вып. 48. — С. 180–184.

Научное издание

**СОВРЕМЕННАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ
НОВОГО ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ**

ПОСВЯЩАЕТСЯ 10-ЛЕТИЮ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ЛГТУ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

III ВСЕРОССИЙСКОЙ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

21-23 ОКТЯБРЯ 2020 г.

Издано в авторской редакции

Компьютерная вёрстка: С.В. Скаков

Издательство Липецкого государственного технического университета.
398055, Липецк, ул. Московская, 30

ISBN 978-5-00175-026-0



9 785001 750260 >